

**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 53. Том 2

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2026

**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 53. Volume 2

Section: Technical sciences

Dnipro, 2026

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2026. Вип. 53, том 2. 243 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026>.

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.

Погорлецкий Д.С.

Проніна О.І.

Прус В.В.

Пятикоп О.Є.

Саенко 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., КрНУ ім. Михайла Остроградського, Україна

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

д-р техн. наук, проф., Національний університет «Чернігівська політехніка», 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, 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-

логії, 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.pgutu@gmail.com, vestnik_pgutu@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.

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 9 від 26.03.2026 р.

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

© ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ»), 2026

ЗМІСТ

CONTENTS

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

**Якимець С.М., Чорна В.О.,
Шутько О.С.**

Автономні системи електроживлення
об'єктів спеціального призначення на
основі малих вітроенергетичних уста-
новок

7

**S. Yakymets, V. Chorna,
O. Shutko**

Autonomous power supply systems for
special-purpose facilities based on small-
scale wind turbines

**Вовк В.О., Ляшенко В.В.,
Семенов А.О.**

Енергоефективне керування осьовим
електроприводом пневмосепаратора
для калібрування насіння

19

**V.O. Vovk, V.V. Liashenko,
A.O. Semenov**

Energy-efficient control of the axial electric
drive of a pneumatic separator for seed
calibration

**Кулагін Д.О., Маслов І.З.,
Девочкін В.Ф.**

Дослідження нормативно-технічних
особливостей побудови систем елект-
ропостачання мобільних енергоустано-
вок з комбінованим пусковим джерелом

27

**D.O. Kulagin, I.Z. Maslov,
V.F. Dievochkin**

Research of regulatory and technical fea-
tures of the construction of power supply
systems of mobile power plants with com-
bined starting source

**Плешков П.Г., Зінзура В.В.,
Петрова К.Г., Гарасьова Н.Ю.,
Солдатенко В.П.**

Синтез робастної системи автомати-
чного керування енергоефективним
освітленням в умовах параметричної
невизначеності

37

**P.H. Plieshkov, V.V. Zinzura,
K.H. Petrova, N.Yu. Harasova,
V.P. Soldatenko**

Synthesis of a robust system for automatic
control of energy-efficient lighting under
conditions of parametric uncertainty

Нестеренко О.Г., Кунченко Т.Ю.

Модульна імітаційна модель електро-
мобіля з протибуксувальним керуван-
ням

46

O.H. Nesterenko, T.Yu. Kunchenko

Modular simulation model of an electric
vehicle with traction control

Сергієнко С.А., Онищенко А.О.

Сучасні підходи до оптимізації робочого
циклу кар'єрних екскаваторів

56

S.A. Serhiienko, A.O. Onyshchenko

Modern approaches to excavation cycle op-
timization for surface mining excavators

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

HEAT POWER ENGINEERING

Ленцов І.А., Умріхін М.О.

Дослідження впливу інфільтрованого
повітря на параметри роботи оберто-
вих печей

65

I.A. Lentsov, M.O. Umrikhin

A study of the effect of infiltrated air on the
hydraulic operating conditions of rotary
kilns

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES

Мірошниченко С.О.

Прогнозування успішності B2B-замовлень в умовах нестабільності: оцінка стійкості архітектур машинного навчання до концептуального дрейфу

75

S.O. Miroshnychenko

Batch vs. streaming machine learning for B2B order success forecasting: robustness to concept drift in industrial ERP systems

Горпинченко А.С.

Використання апроксимацій Паде для моделювання складних нелінійних систем

86

A.S. Gorpichenko

The use of Padé approximations for modeling complex non linear systems

БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

BIOMEDICAL ENGINEERING

Нечипоренко Н.І., Хоменко О.С., Лосіхін Д.А.

Двоетапна система глибокого навчання для класифікації уражень шкіри

93

N.I. Nechiporenko, O.S. Khomenko, D.A. Losikhin

A two-stage deep learning system for skin lesion classification

ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY

Белоконь К.В., Мальований М.С., Проскурнін О.А.

Підвищення рівня екологічної безпеки коксохімічних підприємств шляхом каталітичного знешкодження викидів на інтерметалідних Fe-Al каталізаторах

100

K.V. Belokon, M.S. Malovanyy, O.A. Proskurnin

Improving the environmental safety level of coke-chemical enterprises through catalytic emission neutralization on intermetallic Fe-Al catalysts

Волошин В.С., Бурко В.А.

Умови подолання принципу термодинамічної двоєдності, як механізму створення промислових відходів

110

V.S. Voloshyn, V.A. Burko

Conditions for overcoming the principle of thermodynamic duality as a mechanism for creating industrial waste

Копаниця О.Б.

Біоставки як необхідний технологічний елемент очищення стічних вод у випадках їх скидання в екологічно чутливі водні об'єкти

117

O.B. Kopanytsia

Polishing ponds as a necessary technological element of wastewater treatment in the case of discharge into environmentally sensitive water bodies

Цюман Є.С., Глухонець А.О., Цюман С.М.

Модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства (сектора) на засадах циркулярної економіки

129

Y.S. Tsiuman, A.O. Hlukhonets, S.M. Tsiuman

Model of decarbonization of an integrated transport enterprise (sector) based on circular economy principles

Барабаш О.В., Тарасюк М.В.

Технологія кількісного оцінювання антропогенної трансформації екосистем природоохоронних територій із застосуванням індексу фауністичної схожості

136

O.V. Barabash, M.V. Tarasiuk

Technology for quantitative assessment of anthropogenic transformation of ecosystems in protected areas using the faunistic similarity index

Дичко А.О., Єрмаков В.М.

Роль природно-заповідного фонду у збереженні біорізноманіття та забезпеченні сталого функціонування екосистем України

142

A.O. Dychko, V.M. Yermakov

The role of the nature reserve fund in biodiversity conservation and ensuring the sustainable functioning of ecosystems in Ukraine

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

CIVIL SECURITY

**Цопа В.А., Чеберячко С.І.,
Заболотна Ю.О., Шуваєв П.С.,
Шароватова О.П.**

Аналіз ризиків та розслідування причин прориву дамби у Куренівському районі міста Києва

150

**V. Tsopa, S. Cheberyachko,
Yu. Zabolotnaya, P. Shuvaiev,
O. Sharovatova**

Risk analysis and investigation of the causes of the dam break in the Kureniv district of Kyiv

**Мітіна Н.Б., Когтева О.П.,
Мініна Ю.О.**

Аналіз рівня психофізіологічного навантаження та його наслідків на працівників в Україні та Європі

159

**N.B. Mitina, O.P. Kohtieva,
Y.O. Minina**

An analysis of the level of psychophysiological stress and its effects on employees in Ukraine and Europe

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

RIVER AND SEA TRANSPORT

**Погорлецький Д.С., Грицук І.В.,
Худяков І.В., Філіпішина Л.М.,
Самарін О.Є.**

Покращення роботи системи паливопідготовки двигунів енергетичних установок суден морського флоту

167

**D.S. Pohorletskyi, I.V. Gritsuk,
I.V. Khudiakov, L.M. Filipishyna,
O.E. Samarin**

Improvement of the fuel preparation system of engines of power plants of navy vessels

**Volyansky S., Shcheniavskyi G.,
Mazur O., Ocheretna V.**

Causal analysis of risk factors in autonomous maritime platforms using the DEMATEL method

179

**S. Volyansky, G. Shcheniavskyi,
O. Mazur, V. Ocheretna**

Causal analysis of risk factors in autonomous maritime platforms using the DEMATEL method

Калініченко Є.В.

Порівняльний аналіз стратегій управління режимами головного двигуна контейнеровоза на маршруті Порт-Саїд – Порт-Кланг

187

Y.V. Kalinichenko

Comparative analysis of main engine operating mode control strategies for a container ship on the Port Said – Port Klang route

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

RAILWAY TRANSPORT

**Фомін О.В., Козинка О.С.,
Мельник О.М., Сулим А.О.,
Гулько Є.В.**

Використання рідкої гуми на основі поліуретану як демпфуючого матеріалу у вагонобудуванні для збільшення життєвого циклу навісних конструкцій

198

**O.V. Fomin, O.S. Kozynka,
O.M. Melnyk, A.O. Sulym,
I.V. Gunko**

Use of polyurethane-based liquid rubber as a damping material in railcar manufacturing to extend the service life of load-bearing structures

**Фалендиш А.П., Терещак Ю.В.,
Іванченко Д.А., Джус О.В.,
Грицишин П.М.**

Підходи до виявлення несправності тепловозних дизелів при обмеженні вихідних даних

209

**A.P. Falendysh, Yi.V. Tereshchak,
D.A. Ivanchenko, O.V. Dzhus,
P.M. Hrytsyshyn**

Approaches to detection of diesel engine failures with limited output data

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

ROAD TRANSPORT

**Подригало М.А., Подригало Н.М.,
Вахнюк С.А.**

Пружно-динамічний коефіцієнт корисної дії моторно-трансмісійної установки автомобіля

219

**M. Podrygalo, N. Podrygalo,
S. Vakhniuk**

Elastic-dynamic efficiency of a vehicle's engine-transmission system

**Тарандушка Л.А., Шльончак І.А.,
Мурований І.С.**

Дослідження пасажиропотоків міського транспорту на прикладі м. Черкаси

225

**L.A. Tarandushka, I.A. Shlonchak,
I.S. Murovanyi**

Research on passenger flows of urban transport on the example of Cherkasy city

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPES)

Кічкіна О.І., Кічкін О.В.

Цифрова трансформація інформаційного забезпечення перевізників малого та середнього бізнесу США та України з використанням технологій штучного інтелекту

233

O.I. Kichkina, O.V. Kichkin

Digital transformation of information support of small and medium business carriers in the USA and Ukraine using artificial intelligence technologies

ДО УВАГИ АВТОРІВ

243

INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.311.245:621.311.1

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359857

АВТОНОМНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ МАЛИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Якимець С.М.	канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2797-2796 , e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com ;
Чорна В.О.	канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3641-4152 , e-mail: chornajav@gmail.com ;
Шутько О.С.	магістрант, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук

У статті проведено комплексне наукове дослідження, спрямоване на розв'язання актуальної задачі забезпечення енергетичної автономності та стратегічної витривалості мобільних радіолокаційних станцій в умовах сучасної воєнно-політичної нестабільності. Встановлено, що систематичне ураження об'єктів централізованої енергосистеми України детермінує необхідність впровадження децентралізованих систем на основі відновлюваних джерел енергії, де особливе місце посідає мала вітроенергетика. У роботі детально проаналізовано режими функціонування сучасних малогабаритних радіолокаційних систем, таких як RADAR-X1-M, DELTA та KHARZA MRF, що дозволило класифікувати їх за енергетичними ознаками та визначити реальні добові потреби у генерації. Обґрунтовано, що для забезпечення безперебійної роботи споживачів першої категорії надійності в умовах помірного вітрового потенціалу Полтавського регіону необхідна встановлена потужність вітроенергетичної установки має становити не менше 2,5 кВт. Доведено, що попри теоретичну потребу у більшому діаметрі ротора для низьких швидкостей вітру, застосування серійної моделі з діаметром 5,6 м у поєднанні з інтелектуальною системою накопичення енергії забезпечує сталий профіцит генерації на рівні 50%. Синтезовано структуру енерговузла на базі літій-залізо-фосфатних акумуляторів, що гарантує автономну роботу радіолокаційної системи протягом 36 годин у періоди повного штилю. Особливу увагу приділено застосуванню MPPT-контролерів з алгоритмом WindCurveTracking та інверторного обладнання з чистою синусоїдою, що є критичним для стабільності високочастотних трактів радіолокаційних станцій. Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні концепції мобільного енергозабезпечення, яка дозволяє не лише досягти енергетичної незалежності військових об'єктів, а й суттєво знизити їхню теплову та акустичну помітність порівняно з дизель-генераторними установками. Результати дослідження мають практичне значення для підвищення живучості підрозділів системи моніторингу повітряного простору та розширення можливостей оперативного розгортання локальних вузлів спостереження у важкодоступних районах.

Ключові слова: вітроенергетична установка; радіолокаційна станція; автономне живлення; енергетична безпека; енергетичний баланс; акумулятор; інвертор.

Постановка проблеми

Енергетична безпека як домінантна складова національної безпеки держави в умовах сучасної воєнно-політичної нестабільності трансформується у фактор стратегічної витривалості. Повномасштабна збройна агресія проти України детермінувала критичну вразливість централізованої об'єднаної енергетичної системи (ОЕС). Систематичне вогневе ураження об'єктів генерації, магістральних мереж та вузлів розподілу призвело до деградації структурної цілісності енергосистеми, що вимагає перегляду парадигми енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури.

У контексті окреслених викликів стратегічного пріоритету набуває впровадження децентралізованих (локальних) систем електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Перехід від

ієрархічної структури енергопостачання до розподіленої генерації з можливістю роботи в острівному режимі дозволяє суттєво мінімізувати ризики каскадних відключень та забезпечити функціональну автономність споживачів. Серед номенклатури ВДЕ особливий науково-практичний інтерес становить вітроенергетика. Завдяки високому коефіцієнту використання встановленої потужності (КВВП) у певних регіонах України та технологічній адаптивності до автономної роботи, вітроенергетичні установки (ВЕУ) розглядаються як релевантне джерело енергії для розосередження об'єктів.

З огляду на високу енергоємність сучасних радіолокаційних засобів та їхню вразливість до дестабілізації зовнішніх мереж, актуалізується задача розробки автономних комплексів електроживлення. Інтеграція

автономних БЕУ в поєднанні з інтелектуальними системами накопичення енергії та гібридними інверторами дозволяє досягти наступних переваг:

- підвищення живучості – мінімізація теплового та акустичного демаскування порівняно з традиційними дизель-генераторами;
- автономність – забезпечення тривалого функціонування радіолокаційного обладнання у польових умовах без необхідності регулярного підвезення пально-мастильних матеріалів;
- мобільність – можливість розгортання локальних енерговузлів у важкодоступних районах зі сприятливим вітровим потенціалом.

Таким чином, синергія вітроенергетичних технологій та засобів радіолокації є перспективним напрямом наукових досліджень, спрямованих на зміцнення обороноздатності держави через призму енергетичної незалежності військових об'єктів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання оцінки вітрового ресурсу як фундаментального етапу проектування малих вітрових турбін (SWT) висвітлено у працях багатьох вітчизняних та закордонних учених [1-6].

Зокрема, методологічні підходи до класифікації та стандартизації SWT детально розглядаються в роботі [7], де акцентується увага на гармонізації національних нормативів із міжнародним стандартом IEC 61400-2 [8].

В оновленому Атласі енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України під редакцією С. О. Кудрі [9] представлено актуалізовані дані щодо розподілу вітрових потоків, що дозволяє уточнити зони ефективного впровадження малих вітроенергетичних установок у різних регіонах.

Питання визначення техніко-економічних меж використання автономних вітроелектричних систем ґрунтовно досліджено у працях [10-12]. Це дозволяє сформулювати методологічну базу для оптимізації параметрів малих вітрових турбін.

Проведений аналіз нормативної бази США (DOE) та Японії (ClassNK) [13, 14] свідчить про відсутність єдиного термінологічного підходу до визначення потужності «малої» енергетики, що підтверджує доцільність використання критерію площі ротора згідно з вимогами IEC [8].

Дослідженням вітроенергетичного потенціалу центральних регіонів України, зокрема Полтавської області, присвячені актуальні розвідки [15, 16]. Встановлено, що попри помірні показники швидкості вітру (3-3,5 м/с на висоті 10 м), перехід до висот 80-120 м дозволяє досягти значень 6-7 м/с, що корелює з даними Атласу енергетичного потенціалу ВДЕ (2024 р.) [9].

Разом з тим, залишаються недостатньо вивченими питання ефективності функціонування мікропроцесорних систем керування в умовах нестабільного

вітрового потоку Полтавщини, а також специфіки інтеграції автономних БЕУ в мобільні системи енергозабезпечення спеціального призначення, наприклад, для живлення РЛС.

Мета статті

Метою даного дослідження є обґрунтування технічних параметрів та розробка структури автономної мобільної системи електроживлення на основі малих вітроенергетичних установок (БЕУ) для забезпечення безперебійної роботи радіолокаційних станцій (РЛС) малої потужності в умовах змінного вітрового потенціалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати режими функціонування мобільних підрозділів системи моніторингу повітряного простору (черговий, робочий, піковий) та кількісно оцінити їхні добові потреби в електроенергії для визначення цільових показників генерації.
2. Визначити необхідну встановлену потужність та геометричні параметри ротора БЕУ, адаптовані до кліматичних умов Полтавського регіону, враховуючи обмеження щодо мобільності та габаритів обладнання.
3. Виконати порівняльний аналіз існуючих зразків малих вітрових турбін та обґрунтувати вибір конкретної моделі, здатної забезпечити позитивний річний енергобаланс для найбільш енергоємних об'єктів обраної групи.
4. Синтезувати систему накопичення енергії на базі літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторів, здатної підтримувати автономну роботу РЛС протягом доби в умовах відсутності вітру (штилю).
5. Розробити структуру енерговузла з використанням інтелектуальних систем керування (МРРТ-контролерів) для стабілізації вихідних параметрів мережі та підвищення скритності (теплової та акустичної) об'єктів спеціального призначення.

Матеріали та методи

Радіолокаційна станція (РЛС) розглядається як складний багатофункціональний радіотехнічний комплекс, що виконує завдання детекції, ідентифікації та супроводження об'єктів у різних середовищах. Відповідно до нормативних вимог щодо надійності електропостачання, РЛС належать до споживачів першої категорії, що обумовлює неприпустимість тривалих перерв у живленні та необхідність резервування потужності.

Експлуатаційна специфіка РЛС визначається наступними чинниками:

- Режим генерації: безперервний або квазібезперервний характер споживання з вираженою імпульсною складовою навантаження.
- Чутливість до якості електричної енергії: високі вимоги до стабільності напруги та частоти, що критично для роботи прийомо-передавальних трактів.

• Локація: функціонування в умовах автономності або віддаленості від централізованих мереж, що робить актуальним впровадження ВДЕ.

Для оптимізації параметрів автономної системи живлення на основі ВЕУ доцільно використовувати класифікацію РЛС за функціональними та енергетичними ознаками:

1. За функціональним призначенням та мобільністю: оглядові (виявлення повітряних та наземних об'єктів), станції супроводження, спеціалізовані комплекси (контрбатареї, морські, висотоміри), а також стаціонарні та пересувні системи.

2. За частотним діапазоном: метровий та дециметровий діапазони (VHF, UHF), що характеризуються високою енергоємністю передавачів; сантиметровий діапазон (S, X, C), де при меншій потужності зростають вимоги до спектральної чистоти та стабільності живлення.

Визначальним параметром для розрахунку номінальної потужності ВЕУ є встановлена потужність споживання РЛС (табл. 1).

Таблиця 1

Енергетична класифікація РЛС для вибору потужності ВЕУ

Тип РЛС	Типова потужність споживання, кВт
Малогабаритні мобільні	0,3–1
Тактичні мобільні	1–5
Оглядові 3D РЛС	10–30
Далекого виявлення	30–100

Наведена класифікація є вихідною базою для вибору номінальної потужності ВЕУ.

Електричне навантаження сучасних радіолокаційних комплексів характеризується високим ступенем нерівномірності та багатокомпонентною структурою. Для коректного синтезу системи автономного електропостачання (САЕ) на базі ВЕУ проведено декомпозицію основних споживачів за їх функціональним призначенням:

1. Передавальний тракт: основне джерело імпульсних навантажень та пікових струмів. Вимагає високої динамічної стабільності напруги для запобігання фазовим спотворенням сигналу.

2. Приймальний тракт та системи цифрової обробки сигналів: прецизійні споживачі, що потребують безперервного живлення з мінімальним рівнем кондуктивних перешкод.

3. Антенно-поворотні пристрої: динамічне навантаження, зумовлене роботою електроприводів, що змінюється залежно від механічного опору та вітрового тиску на дзеркало антени.

4. Системи термостабілізації та охолодження: енергоємний сегмент, на який припадає до 30–40% загального бюджету потужності. Ефективність цих систем безпосередньо корелює з показниками надійності всієї станції.

5. Допоміжні вузли: підсистеми зв'язку, телеметрії, діагностики та внутрішнього освітлення.

Проектування САЕ базується на розрахунку середнього та пікового споживання в межах трьох основних експлуатаційних режимів:

• Черговий режим (20–40% $P_{ном}$): функціонують лише системи моніторингу та критичні вузли керування.

• Робочий режим ($P_{ном}$): штатне функціонування при номінальній частоті зондування.

• Піковий режим: короточасні перевантаження, обумовлені максимальною шпаруватістю імпульсів випромінювання або інтенсивними обчислювальними операціями.

Процес поєднання РЛС із ВЕУ в єдину енергосистему ускладнюється двома критичними факторами:

1. Електромагнітна сумісність та завадозахищеність. Обертання лопатей вітротурбіни в зоні видимості радара створює специфічні завади, зокрема мікродоплерівські ефекти, що можуть призводити до хибних цілевказань або маскування реальних об'єктів. Це потребує розробки алгоритмів цифрової фільтрації або просторового рознесення ВЕУ та антени РЛС.

2. Кліматична адаптація. Експлуатація в екстремальних умовах (висока вологість, сольовий туман, вібраційні навантаження) вимагає від компонентів ВЕУ підвищеного класу захисту (IP) та корозійної стійкості.

Враховуючи стохастичний характер вітрового потоку, для забезпечення безперервності технологічного циклу РЛС, архітектура системи живлення обов'язково повинна включати блоки резервування: накопичувачі енергії та/або дизель-генераторні установки як гарантовані джерела живлення.

На основі аналізу технічних характеристик сучасних зразків РЛС, представлених у відкритих експортних специфікаціях, встановлено, що встановлена потужність споживання є базовим критерієм при синтезі архітектури автономної системи живлення. За результатами проведеної систематизації, досліджувані типи РЛС класифіковано на три енергетичні групи.

Малопотужні мобільні системи (встановлена потужність до 1 кВт). Типовими представниками даного класу за енергетичними показниками є комплекси типу RADAR-X1-M, DELTA та KHARZA MRF. Техно-економічне обґрунтування показує, що такі системи можуть функціонувати від локальної ВЕУ потужністю 1–5 кВт за наявності буферного накопичувача енергії ємністю 10–20 кВт·год. Це забезпечує високу мобільність та можливість розгортання на віддалених позиціях поза межами централізованої енергомережі.

РЛС середньої потужності (діапазон 5–10 кВт). До цієї групи віднесено модернізовані зразки типу P-18MA та TRASSA-1. Для забезпечення стабільного коефіцієнта готовності таких об'єктів доцільним є впровадження гібридних енергосистем (ВЕУ у поєднанні з фотоелектричними панелями та резервним дизель-

генератором), що дозволяє оптимізувати питому витрату палива.

Високопотужні радіолокаційні комплекси (понад 30 кВт). Представлені системами типу 36D6-M2 та 80K6M. З огляду на високу енергоємність, повне автономне живлення від БЕУ є технічно складним. Проте інтеграція вітрогенераторів дозволяє суттєво компенсувати навантаження на основні джерела живлення, зокрема під час роботи комплексу в черговому режимі.

Зважаючи на результати проведеного аналізу, для подальших досліджень обрано РЛС першої групи.

Виклад основного матеріалу

Для проведення порівняльного аналізу та подальшого розрахунку параметрів БЕУ визначено енергетичні характеристики трьох репрезентативних зразків РЛС малої потужності. Вихідні дані, що базуються на технічних специфікаціях [7], систематизовано в табл. 2.

Таблиця 2

Паспортні дані споживаної потужності РЛС

РЛС	Максимальна споживана потужність, Вт
RADAR-X1-M	300
DELTA	500
KHARZA MRF	≈ 600*

* Для моделі KHARZA MRF значення прийнято експертним шляхом з урахуванням сумарної потужності обчислювального модуля та активної антени С-діапазону

Експлуатаційний цикл РЛС розподілено на три характерні режими, що відрізняються інтенсивністю випромінювання та глибиною обробки даних. Для кожного режиму встановлено коефіцієнт навантаження ($k_{нав}$) та часовий інтервал (t_i) згідно з типовим добовим графіком чергування (табл. 3).

Таблиця 3

Режим	Коефіцієнти навантаження	
	Коефіцієнт навантаження $k_{нав}$	Тривалість t_i , год
Черговий	0,35	12
Робочий	0,7	10
Піковий	1,0	2

Розрахунок споживаної потужності для кожного режиму здійснюється за залежністю:

$$P_{реж} = k_{нав} P_{max}.$$

Результати обчислень для кожної моделі наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Потужність РЛС у різних режимах

РЛС	Черговий, Вт	Робочий, Вт	Піковий, Вт
RADAR-X1-M	105	210	300
DELTA	175	350	500
KHARZA MRF	210	420	600

Сумарне добове споживання електроенергії визначається як інтегральна величина за формулою:

$$E_o = P_i t_i.$$

Отримані дані дозволяють побудувати графіки навантаження (рис. 1), які є базою для розрахунку ємності акумуляторних батарей.

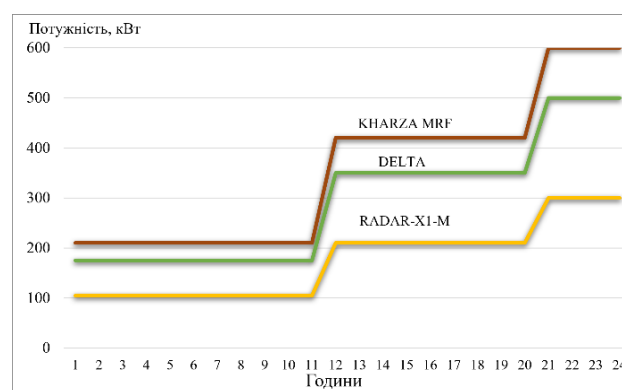


Рис. 1 – Графіки навантажень РЛС

Аналіз розрахункових даних свідчить про суттєву варіативність енергетичного профілю обраних систем:

1. RADAR-X1-M демонструє найбільш низький рівень енергоспоживання (3,96 кВт·год/добу), що робить цей комплекс оптимальним для інтеграції з мікро-БЕУ потужністю 1–2 кВт навіть в умовах низької вітрової активності.

2. DELTA займає проміжне положення (6,60 кВт·год/добу) і потребує стабілізації живлення за допомогою ESS (EnergyStorageSystem) для компенсації пікових навантажень у робочому режимі.

3. KHARZA MRF характеризується найвищою інтенсивністю енергоспоживання (7,92 кВт·год/добу), що обумовлено багатоканалністю обробки сигналів та розширеним функціоналом.

Для всіх розглянутих типів РЛС обов'язковим елементом автономної системи живлення має бути буферний накопичувач. Це необхідно для згладжування стохастичної природи вітрогенерації та забезпечення безперервного живлення в моменти переходу між експлуатаційними режимами.

Для подальших розрахунків використано наступні значення величин:

– коефіцієнт запасу за потужністю БЕУ $k_{зап} = 1,4$;

- глибина розряду АКБ (LiFePO_4) $DoD = 0,8$;
- ККД інвертора та контролера $\eta = 0,9$;
- номінальна напруга DC-шини 48 В.

Вибір номінальної потужності БЕУ (P_{BEU}) здійснюється на основі пікового споживання РЛС із урахуванням коефіцієнта запасу, що компенсує втрати в інверторі та нестабільність вітрового потоку.

Розрахункова потужність визначається з урахуванням коефіцієнта запасу.

Відповідно до розрахованих значень та стандартного ряду потужностей серійних БЕУ, встановлено необхідні номінальні параметри генерації (табл. 5).

Таблиця 5

Розрахунок потужностей БЕУ

Об'єкт дослідження	Розрахункова потужність, Вт	Прийнята потужність, кВт
RADAR-X1-M	$300 \cdot 1,4 = 420$	1
DELTA	$500 \cdot 1,4 = 700$	2
KHARZA MRF	$600 \cdot 1,4 = 840$	2–3

Для забезпечення безперервної роботи РЛС у періоди відсутності вітрового навантаження (штилю) або в темну пору доби (для гібридних систем) необхідне використання акумуляторних батарей (АКБ). Розрахунок необхідної ємності АКБ (C_{AKB}) виконано за методикою [17], виходячи з умови забезпечення автономної роботи протягом 24 годин:

$$C_{AKB} = \frac{E_d}{U \cdot DoD \cdot \eta}.$$

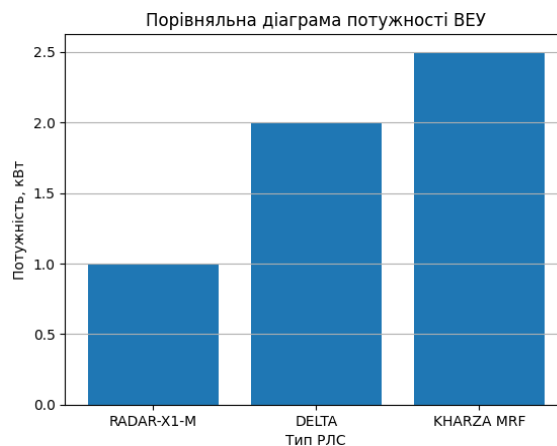
На основі проведених розрахунків сформовано підсумкову специфікацію основних компонентів автономної системи живлення (табл. 6). При виборі ємності накопичувачів враховано перехід на системну напругу 48 В, що є галузевим стандартом для мінімізації втрат на передачу енергії та уніфікації з інверторним обладнанням.

Таблиця 6

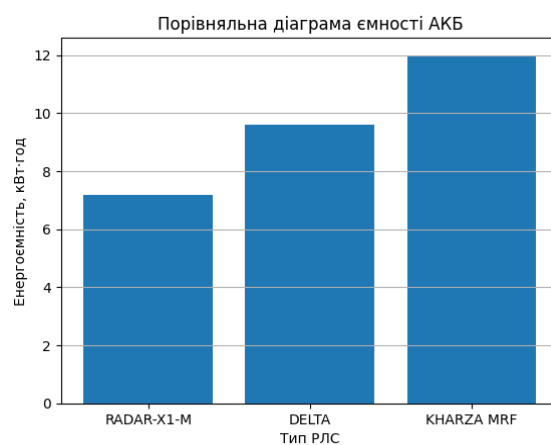
Зведені технічні параметри автономної системи живлення

Об'єкт дослідження	Потужність БЕУ, кВт	Ємність АКБ (48 В), А·год	Сумарна енергоємність, кВт·год
RADAR-X1-M	1,0	150	7,2
DELTA	2,0	200	9,6
KHARZA MRF	2,5	250	12,0

Візуалізацію співвідношення встановленої потужності генерації та ємності буферного накопичувача наведено у вигляді порівняльних діаграм на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2 – Порівняльні діаграми потужності БЕУ (а) та ємності АКБ (б)

Для оцінки потенціалу системи в реальних експлуатаційних умовах виконано розрахунок річного енергетичного балансу. Як базис прийнято кліматичні показники Полтавської області для відкритих ландшафтів. З урахуванням вертикального профілю вітру (формула Лайхтмана для висоти вежі 10–20 м) середньорічна швидкість вітру становить 5,5 м/с. КВВП для обраного класу БЕУ прийнято на рівні $k_{КВВП} = 0,25$.

Річна генерація електроенергії визначена за залежністю:

$$E_{річн} = P_{BEU} \cdot 8760 \cdot k_{КВВП}.$$

Результати зіставлення прогнозованої генерації та фактичного річного споживання наведено нижче (табл. 7).

$$E_{річн}^{RADAR-X1M} = 1 \cdot 8760 \cdot 0,25 = 2190 \text{ кВт/рік}.$$

Потреба складає 1460 кВт/рік. Баланс позитивний (запас $\approx 50\%$).

$$E_{річн}^{DELTA} = 2 \cdot 8760 \cdot 0,25 = 4380 \text{ кВт/рік}.$$

Потреба складає 2409 кВт/рік. Стійке покриття навантаження.

$$E_{\text{річн}}^{\text{KHARZA MRF}} = 2,5 \cdot 8760 \cdot 0,25 = 5475 \text{ кВт/рік.}$$

Потреба складає 2884 кВт/рік. Рекомендовано резервне джерело.

Позитивний баланс підтверджено розрахунками, проте з огляду на складність системи доцільним є варіант інтеграції резервного джерела (дизель-генератора) для критичних режимів роботи.

Отже, проведені дослідження підтверджують технічну доцільність та енергетичну ефективність застосування автономних вітроенергетичних систем для живлення РЛС малої потужності. У всіх розглянутих сценаріях розрахункова річна генерація БЕУ перевищує сумарне споживання об'єктів, що дозволяє не лише забезпечити безперервність технологічного циклу радіолокації, а й створити необхідний енергетичний резерв для роботи допоміжних систем у складних метеорологічних умовах.

Таблиця 7

Характеристики вибраних контролерів заряду для БЕУ

РЛС	БЕУ, кВт	Номинальна потужність	Контролер
RADAR-X1-M	1,0	~20 А	MPPT 48 В/30 А
DELTA	2,0	~40 А	MPPT 48 В 60 А
KHARZA MRF	2,5	~52 А	MPPT 48 В/80 А

Виходячи із попередніх розрахунків, обрано РЛС KHARZA MRF з урахуванням того, що за потреби спроектована БЕУ здатна підтримувати роботу інших розглянутих станцій.

Наступний етап досліджень полягає в розрахунках геометричних розмірів БЕУ для РЛС KHARZA MRF.

Потужність вітроенергетичної установки визначається за виразом [16]:

$$P_{\text{BEU}} = \frac{1}{2} \rho A v_{\text{cep}}^3 C_p \eta,$$

де A – площа, що омітається лопатями, м².

Перетворений відносно площі вираз має наступний вигляд:

$$A = \frac{2P_{\text{BEU}}}{\rho v_{\text{cep}}^3 C_p \eta}.$$

Діаметр ротора D горизонтально-осьової БЕУ розраховується з виразу:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}.$$

Для подальших розрахунків прийнято стандартне значення діаметра $D = 10$ м.

Частота обертання вітроколеса n критично залежить від швидкохідності z , яка визначається кількістю лопатей m згідно з [15]:

$$n = \frac{60v_{\text{cep}}Z}{L} = \frac{60v_{\text{cep}}Z}{\pi D}.$$

Стартовий обертовий момент $M_{\text{ст}}$ вітрових коліс може бути оцінений за наближеною формулою:

$$M_{\text{cm}} = \frac{v_{\text{cep}}^2 R^3}{Z^2} = \frac{v_{\text{cep}}^2 D^3}{8Z^2}.$$

Порівняльні динамічні характеристики вітроколіс представлені в табл. 8.

Таблиця 8

Порівняльні динамічні характеристики вітроколіс

Кількість лопатей m , шт	1	2	3	6	12
Швидкохідність вітряка z	9,0	7,0	5,0	3,0	1,2
Частота обертання n	94,33	73,53	52,52	31,51	12,6
Кутова швидкість ω , с ⁻¹	9,87	7,69	5,49	3,29	1,31
Стартовий обертовий момент $M_{\text{ст}}$	8,48	14,03	27,5	76,38	477,43

На основі критерію мінімізації відцентрових сил та забезпечення достатнього стартового моменту для подолання інерції генератора, для системи живлення РЛС обрано трилопатеву конфігурацію. Це забезпечує оптимальний баланс між швидкохідністю та механічною тривкістю конструкції.

Висота щогли H визначається з умови мінімізації впливу приземної турбулентності та екранування від перешкод:

$$H = (1,2 \div 1,5)D.$$

Для мобільних РЛС та відкритої місцевості прийнято $H = 10$ м. Радіус зони безпеки для таких об'єктів становить $1,25 \cdot H = 12,5$ м.

Вибір типу опори (щогла з розтяжками, фермова або трубчаста башта) залежить від мобільності комплексу. Для БЕУ потужністю до 2,5 кВт найбільш раціональним є використання щогли з системою розтяжок, що забезпечує мінімальну матеріаломісткість при високій стійкості.

Статичне вітрове навантаження на опору вітроустановки при екстремальних швидкостях вітру визначається згідно виразу:

$$P_{max} = R_x \left(\frac{H}{H_{mod}} \right)^2 V_{бур}^2,$$

де $V_{бур} = 40$ м/с – швидкість вітру під час бурі;

R_x – коефіцієнт лобового тиску, який вибирають залежно від форми опори; H – висота натурної опори, м; H_{mod} – висота моделі опори, м.

При швидкості вітру 40 м/с розрахункове навантаження становить 1307 кг, що враховується при проєктуванні вузлів кріплення та основи.

Для забезпечення заданих енергетичних параметрів об'єкта обрано промислову БЕУ малої потужності FORTIS Montana 2,5 кВт (табл. 9). Дана установка належить до класу SWT (Small Wind Turbines) згідно з IEC 61400-2 і характеризується високою експлуатаційною надійністю в автономних системах спеціального призначення.

Таблиця 9

Технічні характеристики FORTIS MONTANA

Параметр	Значення
Номинальна потужність	2,5 кВт
Номинальна напруга	48 В DC
Тип ротора	горизонтально-осьовий
Кількість лопатей	3
Діаметр ротора	5,6 м
Початкова швидкість вітру	2,5 м/с
Номинальна швидкість вітру	11 м/с
Максимальна швидкість вітру	60 м/с
Тип генератора	безредукторний, з постійними магнітами
Система захисту	пасивне флюгування
Рекомендована висота щогли	10–25 м

Слід зауважити, що розрахований раніше теоретичний діаметр ротора (10 м) забезпечував би номінальну потужність при швидкості вітру 5,5 м/с. Проте, з огляду на масогабаритні обмеження мобільних РЛС, обрано серійну модель із діаметром ротора 5,6 м. Необхідний енергетичний баланс досягається за рахунок стохастичного розподілу вітрового потенціалу та акумулювання енергії в періоди перевищення миттєвої потужності над споживанням.

З метою забезпечення безперервного циклу роботи РЛС у періоди штилю обрано літій-залізо-фосфатну (LiFePO₄) акумуляторну батарею PYLONTECH US5000 (табл. 10). Вибір зумовлений високою щільністю енергії та здатністю до глибокого розряду (DoD 90%) без втрати ресурсу (більше 6000 циклів).

Таблиця 10

Параметри АКБ Pylontech US5000

Параметр	Значення
Тип акумулятора	LiFePO ₄
Номинальна напруга	48 В
Номинальна ємність	100 А·год
Номинальна енергоемність	4,8 кВт·год
Глибина розряду (DoD)	до 90 %
Кількість циклів	>6000
Діапазон робочих температур	–10...+50 °C
ККД заряд/розряд	≥95 %

Для перетворення постійного струму в змінний (230 В, 50 Гц) обрано інвертор Victron Energy Multi Plus-II 48/3000/35 (табл. 11). Даний пристрій забезпечує формування чистої синусоїди, що є критичним для стабільної роботи високочастотних трактів РЛС.

Узгодження генератора БЕУ з АКБ здійснюється через контролер Midnite Solar Classic 200 (табл. 11) з підтримкою алгоритму MPPT (Wind Curve Tracking). Це дозволяє максимізувати відбір енергії при змінних швидкостях вітру.

Таблиця 11

Параметри контролера та інвертора

Параметр	Значення
Номинальна потужність інвертора	3,0 кВА (2,4 кВт)
Номинальна потужність інвертора	3,0 кВА (2,4 кВт)
Пікова потужність	6,0 кВА
Вхідна напруга DC	48 В
Вихідна напруга AC	230 В, 50 Гц
ККД	до 95 %
Форма вихідної напруги	чиста синусоїда
Вбудований зарядний пристрій	35 А
Робочий температурний діапазон	–40...+65 °C
Клас захисту	IP21
Тип контролера	MPPT для вітрогенераторів
Номинальна напруга системи	48 В
Максимальний струм заряду	79 А
Максимальна вхідна напруга	200 В DC
Максимальна потужність БЕУ	до 4 кВт (48 В)
ККД	до 98 %
Тип регулювання	MPPT (Wind Curve Tracking)
Підтримка DumpLoad	так (зовнішнє)
Сумісність з LiFePO ₄	так
Інтерфейси	Ethernet, RS-232
Робоча температура	–40...+60 °C
Клас захисту	IP20

Для верифікації обраного обладнання виконано розрахунок струмових навантажень DC-шини.

Струмові навантаження DC-шини визначені з урахуванням як генерації ВЕУ, так і споживання інвертора. Найбільш навантаженим є режим відсутності генерації, коли вся потужність забезпечується АКБ.

На відміну від спрощених підходів, де використовується стала потужність, у даному дослідженні застосовано енергетичний підхід, що базується на добовому споживанні. Еквівалентна середня потужність становить приблизно 330 Вт (рис. 1), тоді як пікова потужність, з урахуванням імпульсного характеру навантаження, досягає 1 кВт. Такий підхід забезпечує узгодження між аналітичними розрахунками, чисельним моделюванням та енергетичним балансом системи.

Інвертор повинен покривати повну (апаратну) потужність:

– для номінального режиму:

$$S_{ном} = \frac{P_{сеп}}{\cos\varphi} = \frac{330}{0,8} = 412,5 \text{ В} \cdot \text{А};$$

– для пікового режиму:

$$S_{пик} = \frac{P_{пик}}{\cos\varphi} = \frac{1000}{0,8} = 1250 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Максимальний струм у DC-шині з урахуванням ККД інвертора:

– для номінального режиму:

$$I_{DC} = \frac{P_{сеп}}{U_{DC}\eta_{инв}} = \frac{330}{48 \cdot 0,95} = 7,2 \text{ А};$$

– для пікового режиму:

$$I_{пик} = \frac{P_{пик}}{U_{DC}\cos\varphi} = \frac{1000}{48 \cdot 0,8} = 26 \text{ В} \cdot \text{А};$$

– для ВЕУ:

$$I_{ВЕУ} = \frac{P_{ном}}{U_{DC}} = \frac{2500}{48} = 52,1 \text{ А}. \quad (1)$$

При живленні від ВЕУ струмові навантаження DC-шини мають виражений динамічний характер, зумовлений змінністю генерації та імпульсним режимом роботи навантаження.

У зв'язку з цим у розрахунках введено коефіцієнт динамічності $k_{дин} = 2,5 \dots 3$, що враховує перехідні процеси та короточасні пікові навантаження. Це дозволяє уникнути заниження розрахункових струмів та забезпечує коректний вибір елементів системи.

Інверторний піковий струм становить:

$$I_{DC \max} = 26 \cdot 3 = 78 \text{ А},$$

перевищує струм генерації, тому його обрано за основу.

Згідно з (1), максимальний струм генерації становить 52,1 А. Оскільки контролер MidNite Solar Classic 200 має граничний вихідний струм 79 А, обрана модель забезпечує запас за струмом 33%, що сприяє стабільній роботі пристрою без перегріву.

Номінальний струм інвертора:

$$I_{инв} = \frac{P_{сеп}}{U_{DC}\eta} = \frac{330}{48 \cdot 0,95} = 7,24 \text{ А}.$$

Піковий струм пускових режимів:

$$I_{пик} \approx 2,5 \cdot I_{ном} \approx 18,1 \text{ А}.$$

Вибраний інвертор Victron Energy Multi Plus-II 48/3000/35 задовольняє вимогам системи, оскільки його номінальний струм споживання при повному навантаженні більше 60 А, що перевищує розрахунковий піковий струм.

Добове споживання РЛС складає $E_{доб} = 12 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Ємність обраних АКБ:

$$C = \frac{E_{доб}}{U \cdot DoD} = \frac{12000}{48 \cdot 0,9} = 287 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Вибрано три АКБ Pylontech US5000 300 А·год (14,4 кВт·год) забезпечує більше 24 год автономії.

При добовому споживанні 8,5 кВт·год сумарна ємність АКБ 14,4 кВт·год забезпечує час автономної роботи 36 годин.

Вибір перерізу кабелів виконано за умовою допустимого падіння напруги $\Delta U \leq 2\%$. Прийнято мідний кабель перерізом 16 мм². Захист системи реалізовано на базі DC-автоматів (80 А та 125 А) та пристрою захисту від перенапруг II типу для захисту від грозових перенапруг.

Конструктивна схема обраної ВЕУ FORTIS Montana базується на використанні горизонтально-осьової турбіни, встановленої на секційній трубчастій щоглі з розтяжками. Таке інженерне рішення є оптимальним для мобільних систем енергозабезпечення РЛС, оскільки забезпечує мінімальну матеріаломісткість при збереженні високої жорсткості конструкції.

Верхня частина установки (гондола) інтегрує трилопатеве вітроколесо, що характеризується високим значенням швидкохідності та стабільним моментом інерції. Використання трьох лопатей дозволяє досягти оптимального компромісу між аеродинамічною ефективністю та динамічною збалансованістю ротора, що мінімізує вібраційні навантаження на щоглу та, як наслідок, знижує рівень завад для антенних систем РЛС.

Горизонтальна орієнтація осі ротора дозволяє реалізувати пасивну систему флюгування, яка автоматично виводить турбіну з-під потоку при перевищенні номінальної швидкості вітру, забезпечуючи живучість установки без використання складних активних систем керування.

Щогла виконана у вигляді розбірної металевої трубчастої конструкції. Секційність щогли (фланцеві

з'єднання) суттєво підвищує мобільність комплексу, дозволяючи транспортування стандартними засобами логістики підрозділів ППО. Статична стійкість та вертикальність вежі забезпечується ярусною системою сталевих розтяжок із гвинтовими натягувачами (талрепами).

Використання розтяжок трансформує розрахункову схему щогли з консольної балки в багатопротітну нерозрізну систему, що працює переважно на стиск. Це дозволяє радикально знизити згинальні моменти в основі щогли, зменшити її діаметр і загальну масу металоконструкції на 30–40 % без втрати стійкості при ураганних вітрах (до 60 м/с).

Зважаючи на специфіку розгортання в польових умовах, конструкція фундаменту має комбінований характер:

- центральний залізобетонний вузол сприймає осьові зусилля стиску та стабілізує положення опори;
- анкерні блоки працюють на виривання та розташовані радіально під кутом 120°, забезпечуючи компенсацію перекидного моменту від тиску вітру на ротор.

Результати та їх обговорення

На основі аналізу тактико-технічних характеристик сучасних мобільних РЛС та прийнятих коефіцієнтів навантаження (черговий режим – 0,35; робочий – 0,7; піковий – 1,0) встановлено часові та кількісні показники енергоспоживання. Результати розрахунків свідчать, що для РЛС малої потужності (RADAR-X1-M, DELTA, KHARZA MRF) добова потреба в енергії становить від 4,2 до 8,5 кВт·год.

Найбільш енергоємним об'єктом у вибраній групі є мобільна станція KHARZA MRF з добовим споживанням 8,5 кВт·год. З урахуванням коефіцієнта запасу потужності БЕУ та ККД системи перетворення, необхідна встановлена потужність генерації має становити не менше 2,5 кВт.

Для забезпечення заданої потужності в умовах Полтавського регіону (середньорічна швидкість вітру 5,5 м/с) розрахункова площа омітання ротора становить 78 м². Проведений порівняльний аналіз промислових зразків SWT показав, що найбільш адаптованою до мобільних умов є БЕУ Fortis Montana номінальною потужністю 2,5 кВт.

Хоча розрахунковий діаметр ротора для низьких швидкостей вітру склав 10 м, для практичної реалізації обрано серійну модель з діаметром 5,6 м. Таке рішення обумовлене необхідністю збереження мобільності щогли та використанням стохастичного розподілу вітрових потоків, що підтверджується позитивним річним енергобалансом із запасом близько 50% (3066 кВт·год генерації проти 2190 кВт·год споживання для KHARZA MRF).

3. З огляду на вимоги до безперервності роботи РЛС (споживач першої категорії), синтезовано систему накопичення на базі трьох LiFePO₄ модулів Pylontech US5000. Вибір даного типу АКБ обґрунтований

високим ресурсом (більше 6000 циклів) та здатністю працювати при глибокому розряді до 90% без деградації пластин.

Сумарна енергоємність блоку АКБ становить 14,4 кВт·год, що гарантує автономну роботу РЛС протягом понад 24 годин у періоди повного штилю. Для стабілізації напруги та мінімізації електромагнітних перешкод у системі використано MPPT-контролер MidNiteSolarClassic 200, який реалізує алгоритм відстеження вітрової кривої потужності (Wind Curve Tracking).

Запропонована структура автономного енерговузла дозволяє не тільки забезпечити енергетичну незалежність РЛС, але й знизити теплову та акустичну помітність об'єкта, що є критично важливим у бойових умовах.

Висновки

1. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано концепцію створення автономних систем енергозабезпечення мобільних РЛС на основі малих вітроенергетичних установок, що дозволяє досягти високого рівня енергетичної децентралізації та живучості об'єктів спеціального призначення в умовах дефіциту потужності в ОЕС України.

2. На основі синтезу добових графіків навантаження встановлено, що для забезпечення функціонування сучасних малогабаритних РЛС (класу KHARZA MRF) необхідна встановлена потужність генерації повинна становити не менше 2,5 кВт із обов'язковим використанням буферних накопичувачів енергії ємністю від 14,4 кВт·год.

3. Виконано математичне моделювання енергетичного балансу для кліматичних умов Полтавського регіону, яке підтвердило, що використання БЕУ Fortis Montana забезпечує сталий профіцит енергії (близько 50% на рік), що дозволяє компенсувати стохастичний характер вітрової активності та гарантувати безперервність живлення споживача першої категорії.

4. Доведено, що застосування LiFePO₄ акумуляторів у поєднанні з інтелектуальними MPPT-контролерами дозволяє не лише стабілізувати параметри напруги в локальній мережі, а й суттєво знизити акустичну та теплову помітність об'єкта порівняно з традиційними дизель-генераторними установками.

5. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці адаптивних алгоритмів керування гібридними системами (вітро-сонячними), що дозволить оптимізувати масогабаритні показники енерговузлів для їх оперативного розгортання в польових умовах.

Перелік використаних джерел

- [1] Світовий досвід оцінювання вітрових ресурсів / Кудря С. О., Ткаленко М. А., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XXIII міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 19–20 трав.

- 2022 р. Київ: Ін-т відновлюваної енергетики НАНУ, 2022. С. 189–191.
- [2] Петренко К. В., Іванченко І. В., Кармазін О. О. Застосування діаграми Вороного для оцінки якості інформаційного покриття території України джерелами даних про вітер. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XXIV міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 18–19 трав. 2023 р. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2023. С. 248–250.
- [3] Оцінка можливості використання даних швидкості вітру, отриманих методом реаналізу, для вирішення задач вітроенергетики / К. В. Петренко та ін. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 3. С. 75–85. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).75-85](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).75-85).
- [4] Основи вітроенергетики : підручник / Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер М., Ципленков Д. Дніпро : НГУ, 2015. 335 с.
- [5] High-resolution large-scale onshore wind energy assessments: A review of potential definitions, methodologies and future research needs / R. McKenna et al. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 182. Pp. 659–684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.027>.
- [6] Bigger Is Not Always Better: Review of Small Wind in Brazil / F. Araújo et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 4. Article 976. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14040976>.
- [7] Відновлювані джерела енергії : підручник / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 392 с.
- [8] IEC 61400-2:2014. Wind turbines. Part 2: Small wind turbines. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2014. 172 р.
- [9] Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С. О. Кудрі. 3-тє вид., оновл. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 56 с.
- [10] Лесько В. О., Покровський К. Б., Ференсович Р. Я. Оцінка ефективності вітрогенераторів в реальних умовах з додатковими експлуатаційними витратами. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. Вип. 6. С. 37–41. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-37-41>.
- [11] A Techno-Economic Analysis of Power Generation in Wind Power Plants Through Deep Learning: A Case Study of Türkiye / Z. Demirkol et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 10. Article 2632. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18102632>.
- [12] Techno-Economic Analysis of a Stand-Alone Hybrid Wind-Power Fuel-Cell Grid System: A Case Study in Shahrvar Region of Tehran / Hashemi A., Derakhshan G., Alizadeh Pahlavani M. R., Abdi B. *Environmental and Climate Technologies*. 2020. Vol. 24, no. 1. Pp. 694–711. DOI: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0043>.
- [13] Distributed Wind Market Report: 2024 Edition. Washington : U.S. Department of Energy ; Richland : Pacific Northwest National Laboratory, 2024. 84 р. URL: <https://www.energy.gov/eere/wind/distributed-wind-market-report-2024-edition> (дата звернення: 22.10.2025).
- [14] Type Certification for Wind Turbines : Electronic resource. Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK). URL: <https://www.classnk.or.jp/hp/en/authentication/renewableenergy/windturbine.html> (дата звернення: 15.10.2025).
- [15] Вітроенергетичний сектор України 2021. Огляд ринку за рік до війни : УВЕА. URL: https://uwea.com.ua/up-loads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf (дата звернення: 18.10.2025).
- [16] Причини і результати перегляду оцінки потенціалу вітрових електростанцій України / С. О. Кудря та ін. *Відновлювана енергетика*. 2020. № 1. С. 6–16. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1\(60\).6-16](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).6-16).
- [17] Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: курс лекцій / С. О. Кудря, В. М. Головка; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». К. : НТУУ «КПІ», 2005. 132 с.

AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS FOR SPECIAL-PURPOSE FACILITIES BASED ON SMALL-SCALE WIND TURBINES

Yakymets S.	PhD (Engineering), associate professor, Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University, Kremenchuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2797-2796 , e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com ;
Chorna V.	PhD (Engineering), SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3641-4152 , e-mail: chornajav@gmail.com ;
Shutko O.	master's student, Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University, Kremenchuk

The article presents a comprehensive scientific study aimed at addressing the critical challenge of ensuring energy autonomy and strategic resilience for mobile radar stations amid contemporary military and political instability. It is

established that systematic strikes against Ukraine's centralized power grid necessitate the implementation of decentralized systems based on renewable energy sources, with small-scale wind power playing a pivotal role. The study provides a detailed analysis of the operational modes of modern compact radar systems, such as RADAR-X1-M, DELTA, and KHARZA MRF, which facilitated their classification by energy characteristics and the determination of actual daily generation requirements. It is substantiated that to ensure the uninterrupted operation of Category I reliability consumers under the moderate wind potential of the Poltava region, the installed capacity of the wind energy conversion system must be at least 2.5 kW. The research proves that despite the theoretical requirement for a larger rotor diameter at low wind speeds, the application of a production model with a 5.6 m diameter, coupled with an intelligent energy storage system, ensures a sustained generation surplus of 50%. A power node structure based on lithium iron phosphate (LiFePO₄) batteries has been synthesized, guaranteeing the autonomous operation of the radar system for 36 hours during periods of total calm. Particular attention is paid to the use of MPPT controllers featuring the WindCurveTracking algorithm and pure sine wave inverters, which are critical for the stability of the high-frequency circuits of radar stations. The scientific novelty of this work lies in the substantiation of a mobile power supply concept that not only achieves energy independence for military assets but also significantly reduces their thermal and acoustic signatures compared to diesel generator units. The findings are of practical importance for enhancing the survivability of airspace monitoring units and expanding the operational deployment capabilities of local surveillance nodes in remote areas.

Keywords: wind power plant; radar; autonomous power supply; energy security; energy balance; battery; inverter.

References

- [1] S. O. Kudria, M. A. Tkalenko, L. V. Yatsenko, and L. Ya. Shynkarenko, "Svitovyi dosvid otsiniuvannia vitrovyykh resursiv" ["World experience of wind resource assessment"], in *Proc. of the XXIII Int. Sci.-Pract. Conf. «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century»*, Kyiv, Ukraine, May 19–20, 2022, pp. 189–191. (Ukr.)
- [2] K. V. Petrenko, I. V. Ivanchenko, and O. O. Karmazin, "Zastosuvannia diahramy Voronoho dlia otsinky yakosti informatsiinoho pokryttia terytorii Ukrainy dzherelamy danykh pro viter" ["Application of the Voronoi diagram to assess the quality of information coverage of the territory of Ukraine by wind data sources"], in *Proc. of the XXIV Int. Sci.-Pract. Conf. «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century»*, Kyiv, Ukraine, May 18–19, 2023, pp. 248–250. (Ukr.)
- [3] K. V. Petrenko, M. P. Kuznietsov, I. V. Ivanchenko, O. O. Karmazin, and A. S. Borsuk, "Otsinka mozhlyvosti vykorystannia danykh shvydkosti vitru, otrymanykh metodom reanalizu, dlia vyrishennia zadach vitroenerhetyky" ["Assessment of the possibility of using wind speed data obtained by the reanalysis method for solving wind energy problems"], *Vidnovliuvana enerhetyka*, no. 3, pp. 75–85, 2023. doi: 10.36296/1819-8058.2023.3(74).75-85. (Ukr.)
- [4] H. Pivniak, F. Shkrabets, M. Neuberger, and D. Tsyplenkov, *Osnovy vitroenerhetyky* [Fundamentals of wind energy]. Dnipro, Ukraine: NHU, 2015. (Ukr.)
- [5] R. McKenna et al., High-resolution large-scale on-shore wind energy assessments: A review of potential definitions, methodologies and future research needs, *Renewable Energy*, vol. 182, pp. 659–684, 2022. doi: 10.1016/j.renene.2021.10.027.
- [6] F. R. P. de Araújo, M. G. Pereira, M. A. V. Freitas, N. F. da Silva, E. J. de A. Dantas, "Bigger Is Not Always Better: Review of Small Wind in Brazil," *Energies*, vol. 14, no. 4, article 976, 2021. doi: 10.3390/en14040976.
- [7] S. O. Kudria, Ed., *Vidnovliuvani dzherela enerhii* [Renewable energy sources]. Kyiv, Ukraine: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU, 2020. (Ukr.)
- [8] *Wind Turbines - Part 2: Small Wind Turbines*, IEC 61400-2:2014, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2014.
- [9] S. O. Kudria, Ed., *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy* [Atlas of energy potential of renewable energy sources of Ukraine], 3rd ed. Kyiv, Ukraine: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU Ukrainy, 2024. (Ukr.)
- [10] V. O. Lesko, K. B. Pokrovskiy, and R. Ya. Ferensovych, "Otsinka efektyvnosti vitroheneratoriv v realnykh umovakh z dodatkovyimi ekspluatatsiynymy vytratamy" ["Evaluation of the efficiency of wind generators in real conditions with additional operating costs"], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, no. 6, pp. 37–41, 2022. doi: 10.31649/1997-9266-2022-165-6-37-41. (Ukr.)
- [11] Z. Demirkol, F. Dayi, A. Erdoğan, A. Yanik, and A. Benek, "A Techno-Economic Analysis of Power Generation in Wind Power Plants Through Deep Learning: A Case Study of Türkiye," *Energies*, vol. 18, no. 10, article 2632, 2025. doi: 10.3390/en18102632.
- [12] A. Hashemi, G. Derakhshan, M. R. Alizadeh Pahlavani, and B. Abdi, "Techno-Economic Analysis of a Stand-Alone Hybrid Wind-Power Fuel-Cell Grid System: A Case Study in Shahryar Region of Tehran," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 1, pp. 694–711, 2020. doi: 10.2478/rtuect-2020-0043.
- [13] *Distributed Wind Market Report: 2024 Edition*, U.S. Department of Energy and Pacific Northwest National Laboratory, Washington, DC, USA, Rep. 2024, 84 p. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/distributed-wind-market-report-2024-edition>. Accessed on: Oct. 22, 2025.

- [14] Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK). Type Certification for Wind Turbines. ClassNK.jp. [Online]. Available: <https://www.classnk.or.jp/hp/en/authentication/renewableenergy/windturbine.html>. Accessed on: Oct. 15, 2026).
- [15] UWEA. Vitroenerhetychnyi sektor Ukrainy 2021. Ohliad rynku za rik do viiny (Wind energy sector of Ukraine 2021. Market overview a year before the war). UWEA.com.ua. [Online]. Available: https://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf. Accessed on: Oct. 18, 2026. (Ukr.)
- [16] S. Kudria, N. Mkhitarian, B. Tuchynskyi, O. Riepin, I. Ivanchenko, and K. Petrenko, "Prychyny i rezultaty perehliadu otsinky potentsialu vitrovykh elektrostantsii Ukrainy" ["Potential of Ukraine's wind power plants reassessment. The reasons and the results"], *Vidnovliuvana enerhetyka*, no. 1, pp. 6–16, 2020. doi: 10.36296/1819-8058.2020.1(60).6-16. (Ukr.)
- [17] S. O. Kudria, and V. M. Holovko, *Osnovy konstruiuvannia enerhoustanovok z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii* [Fundamentals of designing power plants with renewable energy sources]. Kyiv, Ukraine: NTUU «KPI», 2005. (Ukr.).
- Стаття надійшла 13.12.2025
Стаття прийнята 10.01.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Якимець С. М., Чорна В. О., Шутько О. С. Автономні системи електроживлення об'єктів спеціального призначення на основі малих вітроенергетичних установок. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359857>.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ОСЬОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПНЕВМОСЕПАРАТОРА ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ НАСІННЯ

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 ;
Ляшенко В.В.	канд. с.-г. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0177-6209 , e-mail: viktor.liashenko@pdau.edu.ua ;
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

У роботі розглянуто питання підвищення енергоефективності та стабільності технологічного процесу калібрування насіння шляхом удосконалення електропривода осьового вентилятора пневмосепаратора. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до якості насіннєвого матеріалу та необхідністю зниження питомих енерговитрат у післязбиральній обробці зернових культур. Метою роботи є наукове обґрунтування та експериментальна оцінка енергоефективних режимів роботи асинхронного електропривода при застосуванні частотного регулювання. Об'єктом дослідження є електропривод осьового вентилятора пневмосепаратора з трифазним асинхронним двигуном потужністю 1,5 кВт, керованим перетворювачем частоти за законом $U/f = \text{const}$. Дослідження виконували в діапазоні частот 30–50 Гц із вимірюванням активної потужності, струму, коефіцієнта потужності, швидкості повітряного потоку та питомих енерговитрат. Встановлено, що навантаження має вентиляторний характер із квадратичною залежністю моменту та кубічною залежністю потужності від частоти обертання. Показано, що частотне регулювання забезпечує зниження активної потужності та питомих енерговитрат на 15–35 % порівняно з режимами прямого пуску та дроселювання, а також підвищує стабільність швидкості повітряного потоку до ± 5 –8 %. Найбільш раціональними є режими роботи в діапазоні 35–45 Гц, які забезпечують оптимальне поєднання енергоефективності та якості пневмосепарації. Отримані результати можуть бути використані для розроблення автоматизованих систем керування насіннеочисними машинами та підвищення ефективності електромеханічних систем агропромислового комплексу.

Ключові слова: електропривод; пневмосепаратор; осьовий вентилятор; частотне регулювання; асинхронний двигун; енергоефективність; калібрування насіння; питомі енерговитрати.

Постановка проблеми

Сучасні технології післязбиральної обробки зернових культур висувають підвищені вимоги до якості калібрування насіння, стабільності технологічних режимів і зниження питомих енерговитрат. У структурі насіннеочисних ліній важливе місце займають пневмосепаратори з осьовими вентиляторами, ефективність роботи яких значною мірою визначається параметрами повітряного потоку. Нерівномірність швидкості повітря, її коливання у часі та по перерізу робочого каналу призводять до порушення траєкторій руху частинок, зниження селективності розділення та втрат повноцінного насіннєвого матеріалу.

У більшості серійних установок електропривод осьового вентилятора реалізований на базі нерегульованих асинхронних електродвигунів із прямим пуском, а регулювання продуктивності здійснюється механічними методами (дроселюванням або зміною геометрії каналу). Такий підхід не забезпечує адаптації швидкості обертання вентилятора до реальних потреб технологічного процесу та супроводжується значними непродуктивними втратами електроенергії. При цьому електропривод фактично виконує не лише функцію джерела механічної енергії, а й виступає ключовим

елементом керування процесом формування повітряного поля в робочій зоні пневмосепаратора.

Попри наявність досліджень, присвячених аеродинамічним аспектам пневмосепарації, питання узгодження електромеханічних режимів роботи електропривода з оптимальними параметрами повітряного потоку залишаються недостатньо опрацьованими. Відсутність науково обґрунтованих рекомендацій щодо застосування частотно-регульованих електроприводів у пневмосепараторах зумовлює суперечність між потребою підвищення енергоефективності та стабільності процесу і традиційними підходами до керування вентиляторними.

Отже, актуальним є вирішення науково-практичної задачі розроблення та обґрунтування енергоефективних режимів керування електроприводом осьового вентилятора пневмосепаратора, які забезпечували б зниження питомих енерговитрат і підвищення стабільності технологічного процесу калібрування насіння.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні технології післязбиральної обробки зернових і насіннєвих культур характеризуються підвищеними вимогами до якості калібрування, стабільності технологічних режимів та зниження питомих

енерговитрат [1–3]. Пневмосепаратори з осьовими вентиляторамі широко застосовуються у складі насінно-очисних ліній завдяки простоті конструкції, універсальності та можливості безконтактної обробки матеріалу. Разом із тим, численні дослідження свідчать, що ефективність пневматичного розділення істотно залежить від стабільності та рівномірності повітряного потоку у робочому каналі, а не лише від його середнього значення [3, 4].

У більшості серійних пневмосепараторів електропривод осьового вентилятора реалізований на базі нерегульованих асинхронних електродвигунів із прямим пуском від мережі. Регулювання інтенсивності повітряного потоку при цьому здійснюється переважно механічними методами (дроселюванням, шиберами або зміною геометрії каналу), що не змінює електричний режим роботи двигуна і супроводжується значними непродуктивними втратами енергії [5, 6]. За таких умов електродвигун працює на номінальній частоті обертання незалежно від реальних потреб технологічного процесу, що знижує загальну енергоефективність установки.

Актуальні експериментальні та модельні дослідження процесів аеродинамічної сепарації зернових матеріалів показують, що навіть відхилення швидкості повітряного потоку на 10–20% по перерізу каналу або у часі призводить до порушення траєкторій руху частинок [3, 4, 5], зменшення селективності розділення та зростання втрат повноцінного зерна. Таким чином, електропривод вентилятора фактично виступає не лише джерелом енергоспоживання, а й ключовим керуючим елементом технологічного процесу, від якого залежить стабільність повітряного поля в робочій зоні.

У той же час більшість наукових публікацій, присвячених пневмосепараторам, зосереджені переважно на механічних і аеродинамічних аспектах процесу – формі каналів, товщині шару матеріалу, характеристиках повітряного потоку [3, 4]. Питання вибору типу електропривода, режимів його роботи та впливу електричних параметрів на енергетичну ефективність пневмосепараторів розглядаються фрагментарно або залишаються поза межами аналізу.

Водночас у суміжних галузях – вентиляційних, насосних та повітродувних системах – доведено, що застосування частотно-регульованих асинхронних електродвигунів дозволяє істотно знизити споживання електроенергії за рахунок реалізації законів подібності вентиляторних навантажень, відповідно до яких споживана потужність пропорційна кубу частоти обертання [6–8]. За даними експериментальних досліджень, перехід від дросельного регулювання до частотного дозволяє зменшити енергоспоживання вентилятора на 15–40 % залежно від режиму роботи.

Незважаючи на те, що частотно-регульовані електроприводи широко застосовуються у вентиляційних, насосних і повітродувних установках, де використання перетворювачів частоти дозволяє знизити енергоспоживання на 20–40 %, їх застосування у системах

пневмосепарації зернових матеріалів досліджено значно менше. На відміну від класичних вентиляційних систем, у пневмосепараторах швидкість повітряного потоку безпосередньо впливає не лише на енергетичні показники установки, але й на траєкторію руху частинок зернової суміші та ефективність їх аеродинамічного розділення. Незважаючи на доведену ефективність частотного регулювання у промислових вентиляційних системах, потенціал цих технологій у пневмосепараторах насіння використовується недостатньо. Це зумовлено відсутністю науково обґрунтованих рекомендацій щодо узгодження електромеханічних режимів роботи електропривода [9, 10] з оптимальними аеродинамічними параметрами процесу сепарації [11], а також браком комплексних досліджень, у яких електропривод розглядався б як елемент системи керування технологічним процесом [9]. Тому вплив частотного керування електроприводом вентилятора на динаміку формування повітряного потоку та якість сепарації потребує окремого дослідження.

Важливою перевагою застосування перетворювачів частоти є також можливість реалізації плавного пуску електродвигуна. При прямому пуску асинхронного двигуна пускові струми можуть перевищувати номінальні у 5–7 разів, що супроводжується значними електродинамічними навантаженнями та механічними ударами у системі «двигун – вал – вентилятор». Використання частотного керування дозволяє здійснювати поступовий розгін електропривода з обмеженням пускового струму та зменшенням динамічних навантажень на механічні елементи установки.

Поряд із частотним регулюванням у практиці експлуатації вентиляторних установок застосовуються також механічні способи керування повітряним потоком, зокрема використання дросельних заслінок, шибєрів або зміни геометрії повітряного каналу. У таких системах електродвигун працює на номінальній частоті обертання, а регулювання продуктивності здійснюється шляхом штучного збільшення аеродинамічного опору [12]. Це призводить до значних енергетичних втрат, оскільки надлишкова енергія розсіюється у вигляді турбулентних потоків та втрат тиску [12]. При цьому частотне керування дозволяє безпосередньо змінювати швидкість обертання вентилятора відповідно до потреб технологічного процесу, що забезпечує раціональне використання електроенергії.

З огляду на зазначене, дослідження електропривода вентилятора пневмосепаратора слід розглядати як елемент керування технологічним процесом формування повітряного потоку. Оптимізація режимів роботи електропривода дозволяє не лише зменшити енергоспоживання, але й підвищити стабільність аеродинамічного поля в робочому каналі, що безпосередньо впливає на ефективність розділення зернових сумішей.

Таким чином, наявна суперечність між зростаючими вимогами до енергоефективності та стабільності процесу калібрування насіння і традиційними підходами до побудови електроприводів

пневмосепараторів. Вирішення цієї проблеми потребує переходу до частотно-керованих електроприводів осьових вентиляторів, здатних забезпечити адаптивне формування повітряного потоку відповідно до технологічних вимог процесу та зниження питомих витрат електроенергії [10].

У ході досліджень порівнювалися режими прямого пуску електродвигуна, механічного дроселювання повітряного потоку та частотного регулювання електропривода [13].

Основні технічні параметри електропривода наведено в табл. 1.

Мета статті

Мета роботи є наукове обґрунтування та експериментальна оцінка енергоефективних режимів роботи електропривода осьового вентилятора пневмосепаратора шляхом застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є електропривод осьового вентилятора пневмосепаратора, що використовується у технологічному процесі калібрування насіння зернових культур. Електропривод розглядався як складова частина електромеханічної системи формування повітряного потоку, від параметрів якої залежить стабільність аеродинамічного поля в робочому каналі пневмосепаратора та енергетична ефективність установки в цілому.

Як приводний електродвигун застосовувався трифазний асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором номінальною потужністю 1,5 кВт, призначений для роботи у тривалому режимі. Керування електродвигуном здійснювалося за допомогою перетворювача частоти зі скалярним законом керування $U/f = \text{const}$.

Регулювання режимів роботи електропривода здійснювалося шляхом зміни частоти живлення електродвигуна в діапазоні 30–50 Гц, що відповідало зміні частоти обертання осьового вентилятора та швидкості повітряного потоку в робочому каналі пневмосепаратора.

Вибір діапазону частот 30–50 Гц зумовлений технологічними особливостями процесу пневмосепарації. При частотах нижче 30 Гц швидкість повітряного потоку зменшується до значень, недостатніх для стабільного піднімання частинок зернового матеріалу у висхідному потоці, що призводить до погіршення умов аеродинамічного розділення. Робота вентилятора на частотах, що перевищують номінальну 50 Гц, супроводжується зростанням механічних навантажень на робоче колесо та елементи привода, а також може призводити до порушення оптимальних умов сепарації через надмірне збільшення швидкості повітряного потоку.

Для оцінювання електричних та енергетичних показників електропривода проводилися вимірювання активної потужності, струму споживання та коефіцієнта потужності після стабілізації режимів роботи. Питомі енерговитрати процесу пневмосепарації визначалися як відношення спожитої електричної енергії до маси обробленого насіннєвого матеріалу.

Таблиця 1

Основні технічні параметри електропривода осьового вентилятора пневмосепаратора

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	Тип електродвигуна	—	Асинхронний, трифазний, з короткозамкненим ротором	—
2	Номінальна потужність	P_n	1,5	кВт
3	Номінальна напруга живлення	U_n	380	В
4	Номінальна частота живлення	f_n	50	Гц
5	Номінальний струм	I_n	3,2–3,6	А
6	Номінальна частота обертання	n_n	1450	об/хв
7	Кількість пар полюсів	p	2	—
8	ККД при номінальному режимі	η_n	0,80–0,83	—
9	Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi_n$	0,78–0,82	—
10	Тип навантаження	—	Вентиляторне (момент $M \sim n^2$)	—
11	Спосіб керування	—	Частотне, закон $U/f = \text{const}$	—
12	Діапазон регулювання частоти	f	30–50	Гц
13	Діапазон частоти обертання	n	850–1450	об/хв
14	Клас ізоляції	—	F	—
15	Режим роботи	—	Тривалий (S1)	—

Виклад основного матеріалу

Електропривод осьового вентилятора пневмосепаратора належить до класу електроприводів з вентиляторним (аеродинамічним) навантаженням, для яких характерна квадратична залежність моменту опору від частоти обертання та кубічна залежність споживаної потужності від швидкості обертання робочого органа. Такі закономірності є визначальними при аналізі енергетичної ефективності та виборі способу керування електроприводом [Помилка! Закладку не визначено.–5].

Для осьових вентиляторів момент опору на валу описується залежністю:

$$M_B = k_M n^2,$$

де M_B – момент опору вентилятора, Н·м; n – частота обертання, об/хв; k_M – коефіцієнт, що враховує геометрію вентилятора та властивості повітряного потоку.

Відповідна механічна потужність визначається як:

$$P_M = M_B \cdot \omega \sim n^3,$$

де ω – кутова швидкість обертання.

Зазначені залежності є класичними для вентиляторних установок і підтверджені як теоретично, так і експериментально в численних дослідженнях.

Саме кубічна залежність потужності від швидкості обертання пояснює низьку енергоефективність механічних методів регулювання продуктивності (дроселювання), за яких електродвигун продовжує працювати на номінальній частоті, а надлишкова енергія розсіюється у вигляді аеродинамічних втрат.

Альтернативними способами регулювання продуктивності вентиляторних установок є механічні методи, зокрема використання дросельних заслінок, шибєрів або зміна геометрії повітряного каналу. У таких системах електродвигун продовжує працювати на номінальній частоті обертання, а регулювання витрати повітря здійснюється шляхом штучного збільшення аеродинамічного опору системи. Це призводить до додаткових втрат енергії у вигляді турбулентних потоків та втрат тиску. На відміну від механічних методів, частотне регулювання забезпечує зміну швидкості обертання вентилятора відповідно до технологічної потреби, що дозволяє реалізувати закони подібності вентиляторних машин і досягти істотного підвищення енергоефективності електропривода.

У системах пневмосепарації найпоширенішим приводом осьових вентиляторів є трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, що обумовлено його конструктивною простотою, надійністю та низькими експлуатаційними витратами [7, 8, 13].

Застосування перетворювача частоти зі скалярним законом керування $U/f = \text{const}$ дозволяє підтримувати приблизно сталий магнітний потік у повітряному зазорі двигуна в робочому діапазоні частот, що забезпечує стабільну механічну характеристику та допустимі значення пускового моменту [7].

Додатковою перевагою використання перетворювачів частоти є можливість реалізації плавного пуску електродвигуна. У разі прямого пуску асинхронного двигуна пускові струми можуть перевищувати номінальні у 5–7 разів, що супроводжується значними електродинамічними навантаженнями та механічними ударами в системі «двигун – вал – вентилятор». Застосування частотного перетворювача дозволяє здійснювати поступовий розгін електропривода з обмеженням пускового струму до 1,2–1,5 номінального значення, що зменшує механічні навантаження на вал, підшипники та робоче колесо вентилятора і сприяє підвищенню довговічності обладнання.

Електромагнітний момент асинхронного двигуна в установлених режимах може бути представлений у спрощеному вигляді:

$$M_e \sim \frac{U^2}{f} \cdot s,$$

де U – напруга живлення; f – частота живлення; s – ковзання.

За умови виконання закону $U/f = \text{const}$ зі зменшенням частоти живлення зменшується і напруга, що дозволяє зберегти працездатність двигуна при знижених швидкостях, що є достатнім для вентиляторних навантажень, у яких момент опору істотно зменшується зі зниженням швидкості [7].

Для вентиляторних систем виконуються закони подібності, які пов'язують основні аеродинамічні та енергетичні параметри з частотою обертання:

$$Q \sim n, \quad H \sim n^2, \quad P \sim n^3,$$

де Q – продуктивність вентилятора; H – напір; P – споживана потужність.

Частота обертання вентилятора визначається частотою живлення асинхронного електродвигуна і може бути описана співвідношенням:

$$n = \frac{60f}{p},$$

де f – частота живлення електродвигуна, Гц; p – кількість пар полюсів.

Швидкість повітряного потоку у робочому каналі пневмосепаратора пропорційна частоті обертання вентилятора і може бути представлена у вигляді:

$$v = k_v n,$$

де v – швидкість повітряного потоку; k_v – коефіцієнт, що враховує геометричні параметри вентилятора та каналу.

Таким чином, зміна частоти живлення електродвигуна дозволяє безпосередньо керувати швидкістю повітряного потоку, що визначає аеродинамічні умови процесу сепарації зернових матеріалів.

З наведених співвідношень випливає, що частотне регулювання є найбільш енергоефективним способом керування вентиляторними установками, оскільки дозволяє зменшувати продуктивність без додаткових гідравлічних або аеродинамічних втрат [6, 7]. За узагальненими даними, впровадження частотно-регульованих електроприводів у вентиляційних і повітрорудних системах забезпечує зниження енергоспоживання на

15–40% залежно від характеру навантаження та режимів роботи [6].

У пневмосепараторах стабільність швидкості повітряного потоку є критично важливою умовою ефективного калібрування насіння. Як показано в дослідженнях процесів аеродинамічного розділення зернових матеріалів, коливання швидкості повітряного потоку призводять до зміни траєкторій руху частинок і зниження селективності сепарації [2–4].

Нерегульовані електроприводи або режими дроселювання не забезпечують достатньої стабільності швидкості обертання вентилятора, що ускладнює підтримання оптимальних технологічних режимів. Натомість частотно-регульований електропривод дозволяє підтримувати задану частоту обертання з високою точністю, зменшуючи вплив зовнішніх збурень та зміни навантаження [6].

Електропривод осьового вентилятора у пневмосепараторі слід розглядати не лише як джерело механічної енергії, а як активний елемент керування технологічним процесом, який визначає як енергетичні, так і якісні показники калібрування насіння.

У результаті експериментальних досліджень отримано кількісні характеристики роботи електропривода осьового вентилятора пневмосепаратора при різних способах керування та в широкому діапазоні частот живлення асинхронного електродвигуна. Аналіз результатів спрямований на оцінювання впливу режимів керування електроприводом на електричні, енергетичні та аеродинамічні показники процесу пневмосепарації.

У табл. 2 наведено експериментальні дані щодо зміни частоти обертання вентилятора, активної потужності, струму споживання, коефіцієнта потужності та швидкості повітряного потоку в робочому каналі пневмосепаратора при частотному регулюванні електропривода в діапазоні 30–50 Гц.

Таблиця 2

Електричні, енергетичні та аеродинамічні показники електропривода осьового вентилятора при частотному регулюванні

f, Гц	n, об/хв	P, кВт	I, А	cosφ	V _{пов} , м/с	Питома енерговитрата, кВт·год/т
50	1450	1,48	3,4	0,81	9,6	5,8
47	1360	1,28	3,0	0,80	9,0	5,1
45	1300	1,15	2,8	0,80	8,5	4,7
42	1210	0,98	2,4	0,79	7,9	4,1
40	1150	0,86	2,1	0,79	7,4	3,6
37	1060	0,72	1,8	0,78	6,8	3,2
35	1000	0,63	1,6	0,78	6,2	2,9
32	920	0,52	1,3	0,77	5,6	2,6
30	850	0,44	1,1	0,76	5,1	2,4

Аналіз даних табл. 2 свідчить, що зі зменшенням частоти живлення асинхронного електродвигуна

спостерігається істотне зниження активної потужності електропривода та струму споживання. Характер зміни потужності є нелінійним і відповідає кубічній залежності від частоти обертання вентилятора, що підтверджує вентиляторний характер навантаження.

Водночас коефіцієнт потужності cosφ у всьому діапазоні регулювання залишається в допустимих межах і не зазнає різких коливань, що свідчить про стабільний електричний режим роботи електродвигуна при застосуванні частотного керування.

Для оцінювання впливу способу керування електроприводом на стабільність технологічного процесу було проаналізовано коливання швидкості повітряного потоку в робочому каналі пневмосепаратора. Узагальнені результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Стабільність швидкості повітряного потоку при різних способах керування електроприводом

Спосіб керування	Середня швидкість повітря, м/с	Коливання швидкості, %
Прямий пуск	9,5	±15–18
Дроселювання	7,5	±12–15
Частотне регулювання	7,5	±5–8

Отримані результати показують, що при прямому пуску та механічному дроселюванні спостерігаються значні коливання швидкості повітряного потоку, зумовлені змінами аеродинамічного опору та нестабільністю навантаження електродвигуна. Натомість частотно-регульований електропривод забезпечує істотно вищу стабільність швидкості повітряного потоку, що є критично важливим для ефективного калібрування насіння.

Порівняльну оцінку питомих енерговитрат пневмосепаратора для різних способів керування електроприводом наведено в табл. 4.

Як видно з табл. 4, механічне дроселювання забезпечує лише обмежене зниження електроспоживання, оскільки електродвигун продовжує працювати на номінальній частоті обертання. Найбільший енергетичний ефект досягається при застосуванні частотного регулювання, за якого питома енерговитрата зменшується в середньому на 15–35 % залежно від режиму роботи та необхідної інтенсивності повітряного потоку.

Отримані експериментальні результати підтверджують, що частотно-регульований асинхронний електропривод осьового вентилятора забезпечує істотне зниження активної потужності та питомих енерговитрат пневмосепаратора при одночасному підвищенні стабільності швидкості повітряного потоку. Найбільш раціональними з точки зору поєднання енергоефективності та якості пневмосепарації є режими роботи електропривода в діапазоні частот 35–45 Гц, які можуть бути рекомендовані для практичного впровадження в насінносортирних машинах.

Таблиця 4

Порівняльні енергетичні показники пневмосепаратора при різних способах керування електроприводом

Спосіб керування	Частота обертання вентилятора	Активна потужність, кВт	Питома енерговитрата, кВт·год/т	Економія електроенергії, %
Прямий пуск	1450 об/хв	1,48	5,8	–
Дроселювання	1450 об/хв	1,32	5,2	10
Частотне регулювання	1000–1200 об/хв	0,75–0,95	3,6–4,2	15–35

Висновки

У роботі експериментально підтверджено, що електропривод осьового вентилятора пневмосепаратора належить до класу вентиляторних навантажень із квадратичною залежністю моменту опору та кубічною залежністю споживаної потужності від частоти обертання, що визначає доцільність застосування частотного регулювання для підвищення енергоефективності.

Встановлено, що при частотному регулюванні асинхронного електродвигуна в діапазоні 30–50 Гц спостерігається істотне зниження активної потужності та струму споживання електропривода при збереженні стабільного коефіцієнта потужності, що свідчить про надійний електричний режим роботи двигуна.

Показано, що швидкість повітряного потоку в робочому каналі пневмосепаратора при частотному керуванні змінюється прогнозовано та характеризується підвищеною стабільністю, при цьому коливання швидкості не перевищують $\pm 5\text{--}8\%$, що є суттєво меншим порівняно з режимами прямого пуску та механічного дроселювання.

Порівняльний аналіз енергетичних показників показав, що механічне дроселювання повітряного потоку забезпечує лише обмежене зниження електроспоживання, тоді як застосування частотно-регульованого електропривода дозволяє зменшити питомі енерговитрати пневмосепаратора на 15–35% залежно від режиму роботи.

Визначено, що найбільш раціональними з точки зору поєднання енергоефективності та стабільності технологічного процесу пневмосепарації є режими роботи електропривода осьового вентилятора в діапазоні частот 35–45 Гц, які забезпечують оптимальні аеродинамічні умови калібрування насіння.

Отримані результати підтверджують доцільність використання частотно-регульованого асинхронного електропривода як ефективного засобу керування процесом пневмосепарації та створюють передумови для впровадження автоматизованих систем керування насінноочисними машинами з адаптацією режимів роботи до властивостей насінневого матеріалу.

Перелік використаних джерел

- [1] 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>.
- [2] 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>.
- [3] 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>.
- [4] Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel / S. Stepanenko et al. *Journal of Central European Agriculture*. 2022. Vol. 24, no. 1. Pp. 225–235. DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>.
- [5] 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>.
- [6] 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.2011.10.010>.
- [7] Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream / Kroulik 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>.
- [8] 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>.
- [9] 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>.
- [10] 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>.
- [11] 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>.
- [12] Research on characteristics of airway pressure loss in seeding-wheel-type pneumatic seeder / X. Zhang et al.

Agriculture. 2022. Vol. 12, no. 12. Article 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122021>.

- [13] Обґрунтування раціональних параметрів електроприводів насосних агрегатів для систем агропромислового комплексу / Семенов А. О., Скрипник

В. О., Харак Р. М., Супрович О. С. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2024. № 3(496). С. 80–86. DOI: [https://doi.org/10.15589/znп2024.3\(496\).12](https://doi.org/10.15589/znп2024.3(496).12).

ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF THE AXIAL ELECTRIC DRIVE OF A PNEUMATIC SEPARATOR FOR SEED CALIBRATION

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 ;
Liashenko V.V.	PhD (Agricultural Sciences), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0177-6209 , e-mail: viktor.liashenko@pdau.edu.ua ;
Semenov A.O.	PhD (Physics and Mathematical Sciences), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3184-6925 , e-mail: asemen2015@gmail.com

The paper addresses the issue of improving the energy efficiency and stability of the technological process of seed calibration by upgrading the electric drive of the axial fan in a pneumatic separator. The relevance of the study is determined by the growing requirements for seed quality and the need to reduce specific energy consumption in post-harvest processing of grain crops. The aim of the research is to provide scientific substantiation and experimental evaluation of energy-efficient operating modes of an asynchronous electric drive when applying frequency control. The object of the study is the electric drive of the axial fan of a pneumatic separator equipped with a three-phase induction motor rated at 1.5 kW and controlled by a frequency converter according to the $U/f = \text{const}$ law. The experiments were carried out within the frequency range of 30–50 Hz with measurements of active power, current, power factor, air velocity, and specific energy consumption. It was established that the load has a fan-type character with a quadratic dependence of torque and a cubic dependence of power on rotational speed. It is shown that frequency control ensures a reduction in active power and specific energy consumption by 15–35% compared with direct-on-line starting and throttling modes, and also increases the stability of air velocity to ± 5 –8%. The most rational operating modes are within the frequency range of 35–45 Hz, providing an optimal combination of energy efficiency and pneumatic separation quality. The obtained results can be used for the development of automated control systems for seed-cleaning machines and for improving the efficiency of electromechanical systems in the agro-industrial complex.

Keywords: electric drive; pneumatic separator; axial fan; frequency control; induction motor; energy efficiency; seed calibration; specific energy consumption.

References

- [1] V. O. Vovk, "Doslizhennia vplyvu parametriv povitrianoho potoku na efektyvnist kalibruvannia nasinnia u pnevmoseparatori" ["Investigation of the influence of airflow parameters on the efficiency of seed calibration in a pneumatic separator"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 51, pp. 72–78, 2025. doi: [10.31498/2225-6733.51.2025.344653](https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344653). (Ukr.)
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] S. Stepanenko, B. Kotov, A. Kuzmych, R. Kalinichenko, and V. Hryshchenko, "Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel," *Journal of Central European Agriculture*, vol. 24, no. 1, pp. 225–235, 2022. doi: [10.5513/JCEA01/24.1.3732](https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732).
- [5] Y. Mykhailov et al., "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).
- [6] 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.2011.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.010).

- [7] 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**.
- [8] 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**.
- [9] I. Badretdinov, S. Mudarisov, M. Tuktarov, E. Dick, and 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**.
- [10] 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**.
- [11] 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**.
- [12] X. Zhang, Z. Wen, Q. Wang, H. Li, Z. Zhang, and J. Liu, "Research on characteristics of airway pressure loss in seeding-wheel-type pneumatic seeder," *Agriculture*, vol. 12, no. 12, 2022. doi: **10.3390/agriculture12122021**.
- [13] A. O. Semenov, V. O. Skrypnyk, R. M. Kharak, and O. S. Suprovych, "Obgruntuvannia ratsionalnykh parametriv elektropryvodiv nasosnykh ahrehativ dlia system ahropromyslovoho kompleksu" ["Justification of rational parameters of electric drives of pumping units for agro-industrial complex systems"], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admiral Makarova – Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, no. 3 (496), pp. 80–86, 2024. doi: **10.15589/znp2024.3(496).12**.
- Стаття надійшла 02.02.2026
Стаття прийнята 28.02.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Вовк В. О., Ляшенко В. В., Семенов А. О. Енергоефективне керування осьовим електроприводом пневмосепаратора для калібрування насіння. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359859>.

**ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МОБІЛЬНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З КОМБІНОВАНИМ
ПУСКОВИМ ДЖЕРЕЛОМ**

Кулагін Д.О.	д-р техн. наук, професор, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3610-4250 , e-mail: kulagindo@gmail.com ;
Маслов І.З.	канд. техн. наук, доцент, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1759-6077 , e-mail: maslovigor@i.ua ;
Дєвочкін В.Ф.	аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2381-5245 , e-mail: vdev@zp.edu.ua

У роботі розглянуто науково-практичні аспекти побудови систем електропостачання мобільних енергоустановок із комбінованими пусковими джерелами в умовах змінних навантажень та несприятливих температурних факторів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності стартерного пуску дизель-генераторних установок, зниження енергетичних витрат та покращення експлуатаційних характеристик транспортної техніки. Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка методології проектування енергоефективних систем електростартерного пуску на основі комбінованих джерел електроживлення. Для досягнення поставленої мети вирішено комплекс завдань, пов'язаних із аналізом існуючих технічних рішень, розробкою математичних моделей енергетичних процесів, дослідженням перехідних режимів та обґрунтуванням вибору накопичувачів енергії. У процесі дослідження застосовано методи системного аналізу, математичного моделювання, техніко-економічної оцінки та структурної декомпозиції енергетичних систем. Особливу увагу приділено аналізу взаємодії акумуляторних батарей і ємнісних накопичувачів енергії, оптимізації розподілу потоків потужності та мінімізації витрат у процесах генерації, передачі та споживання електроенергії. Розглянуто особливості побудови комбінованих систем пуску, включаючи топологію електричних мереж, алгоритми керування та нормативно-технічні вимоги до їх функціонування. Узагальнені результати дослідження свідчать, що використання комбінованих джерел живлення забезпечує підвищення ефективності пускових процесів, скорочення тривалості запуску та зменшення питомих витрат палива до 8,5%. Запропоновано підходи до оптимізації структури енергосистеми, що дозволяють підвищити її надійність та енергоефективність за рахунок раціонального керування енергетичними потоками та компенсації реактивної потужності. У висновках обґрунтовано наукову новизну, яка полягає у формуванні комплексної методології проектування комбінованих систем електростартерного пуску з урахуванням динамічних режимів роботи та нормативних обмежень. Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження отриманих результатів при проектуванні та модернізації мобільних енергоустановок. Визначено перспективні напрями подальших досліджень, пов'язані з удосконаленням алгоритмів управління, розширенням функціональних можливостей накопичувачів енергії та підвищенням загальної ефективності транспортних енергетичних систем.

Ключові слова: електропостачання; енергоустановка; суперконденсатори; енергоефективність; енергетичні витрати; математичне моделювання; дизель-генератор; електричні машини та апарати.

Постановка проблеми

Проблема забезпечення гарантованого стартерного пуску дизельних енергетичних установок в умовах від'ємних температур навколишнього середовища залишається одним із найбільш критичних аспектів експлуатації транспортних засобів та спеціалізованої техніки різного цільового призначення [1]. Аналіз світового досвіду та результатів широкої експлуатаційної практики підтверджує наявність суттєвих технологічних труднощів, що призводять до значного ускладнення або повної неможливості запуску двигунів при термічних навантаженнях [1-3]. Дана проблема охоплює переважну частину сучасного парку техніки, оснащеної класичними електричними стартерними системами, що обумовлює необхідність пошуку нових

технічних рішень для підвищення надійності енергозабезпечення пускових режимів.

У зимовий період експлуатації ефективність функціонування системи пуску двигуна внутрішнього згоряння нівелюється внаслідок синергетичного впливу двох домінуючих факторів. З одного боку, спостерігається інтенсивне зростання динамічної в'язкості моторних оли, що провокує кратне збільшення моменту опору прокручуванню колінчастого вала та вимагає від стартера значно вищих значень крутного моменту. З іншого боку, низькотемпературний вплив деструктивно позначається на кінетиці електрохімічних процесів у традиційних свинцево-кислотних акумуляторних батареях. Це призводить до різкого скорочення їхньої ефективної ємності та критичного падіння максимальної сили розрядного струму, що в сукупності створює

дефіцит потужності в найбільш енергоємний момент пуску [3, 4].

Перспективним напрямом розв'язання окресленої проблеми та інтенсифікації процесу стартерного пуску є інтеграція в бортову мережу комбінованих систем енергоживлення, де основна акумуляторна батарея функціонує спільно з додатковими високопотужними накопичувачами електричної енергії. Ключова перевага сучасних компонентів накопичення енергії, зокрема суперконденсаторів або іоністорів, полягає у їхній винятковій питомій потужності, яка на порядки перевищує відповідний показник хімічних джерел струму [1, 5]. Така фізична властивість дозволяє системі миттєво генерувати високі пікові струми, що є критично важливим для подолання інерції та початкового опору механізмів двигуна у фазі зрушення.

Поряд із високими динамічними характеристиками, напівпровідникові накопичувачі енергії характеризуються певними обмеженнями, зокрема нижчими показниками питомої енергоємності порівняно з акумуляторами. Крім того, низька номінальна напруга одиничного елемента накопичувача обумовлює необхідність проектування складних схем послідовно-паралельного з'єднання окремих осередків для формування модулів із заданими робочими параметрами. Реалізація таких комбінованих систем вимагає ретельного узгодження характеристик усіх компонентів енерговузла для досягнення оптимального балансу між потужністю, енергоємністю та габаритними параметрами пускового пристрою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Рационалізація використання комбінованих систем енергоживлення, що поєднують у собі традиційні акумуляторні батареї та сучасні накопичувачі електричної енергії, відкриває широкі можливості для оптимізації пускових режимів [2, 6]. За такої архітектури побудови системи на початковій, найбільш енергоємній фазі запуску, основне навантаження на стартер забезпечується саме за рахунок накопичувачів. Це дозволяє ефективно розвантажити акумуляторну батарею від руйнівних пікових струмів, які є головним чинником прискореної деградації активної маси пластин та виходу джерела струму з ладу. Таким чином, впровадження буферних накопичувачів не лише гарантує впевнений запуск, а й суттєво пролонгує загальний експлуатаційний ресурс акумуляторів, мінімізуючи їх внутрішній знос [4, 7].

В умовах інтенсивної щоденної експлуатації транспортних засобів, яка характеризується циклічністю та багатократними пусками двигуна протягом короткого часу, виникає додаткова проблема – дефіцит заряду акумуляторних батарей [8]. Штатні генераторні установки, як правило, обмежені у своїй здатності забезпечувати швидке та повне відновлення енергії в коротких інтервалах між робочими циклами, особливо за низьких температур, коли здатність акумулятора

приймати заряд різко знижується [3, 9]. З огляду на це, актуальним науково-прикладним завданням є дослідження та розробка спеціалізованих типів накопичувачів, спроможних не лише до екстремально швидкої віддачі енергії, а й до оперативного відновлення своїх робочих параметрів від бортової мережі в паузах між запусками [10, 11].

Окреслений комплекс проблем диктує необхідність розробки інноваційних топологій підключення та інтелектуальних алгоритмів управління комбінованими системами «акумуляторна батарея – накопичувач енергії» [12, 13]. Створення таких адаптивних систем є критичною умовою для підвищення експлуатаційної надійності та економічної ефективності дизельної техніки, що працює в суворих кліматичних регіонах [14, 15]. Незважаючи на наявність окремих досліджень у цій галузі, питання комплексного узгодження параметрів накопичувачів із динамічними характеристиками бортової мережі та специфікою пускових процесів залишається недостатньо вивченим, що підтверджує актуальність та своєчасність обраного напрямку дослідження.

Мета статті

Головною метою представленого дослідження є наукове обґрунтування та розробка цілісної методології проектування енергоефективної системи електростартерного пуску дизель-генераторних енергетичних установок, що базується на використанні комбінованих джерел електропостачання. Реалізація цієї мети спрямована на подолання технологічних бар'єрів, пов'язаних із нестабільністю пускових характеристик автономних систем генерації в умовах змінного навантаження та несприятливих зовнішніх чинників.

Досягнення визначеної мети передбачає послідовне вирішення низки взаємопов'язаних наукових та практичних завдань. Першочерговим завданням є теоретичне формування комплексної методології побудови енергоефективних систем пуску, що враховує динамічну взаємодію між джерелами накопичення енергії різної фізичної природи та стартерним вузлом дизель-генератора. Це передбачає розробку математичних моделей та алгоритмів, які б дозволили оптимізувати розподіл потоків потужності в межах комбінованого джерела для мінімізації втрат енергії та забезпечення стабільної частоти обертання вала двигуна на етапі запуску.

Важливим етапом дослідження є критичний аналіз існуючих та перспективних варіантів схемної реалізації комбінованих джерел живлення. Розгляд архітектурних рішень дозволяє визначити найбільш раціональні способи інтеграції накопичувачів у структуру електростартерного пуску, враховуючи специфіку роботи дизель-генераторних установок. Такий підхід забезпечує формування універсальних рекомендацій щодо комплектування систем пуску дизельної техніки, що

сприяє підвищенню її експлуатаційної готовності та загальної енергетичної ефективності.

Матеріали та методи

Проблема комплексної оптимізації енергетичних потоків у спеціалізованих транспортних системах, орієнтована на мінімізацію енерговитрат та собівартості генерованої потужності, становить науково-практичну основу проектування високоефективних комплексів електростартерного пуску. Реалізація подібних систем, що функціонують у межах комбінованої силової установки на базі дизель-генератора та блоку акумуляторних батарей, вимагає формування багаторівневих алгоритмів управління. Методологічний базис такого управління передбачає послідовну розробку математичного апарату для опису статистики й динаміки як системи в цілому, так і її ключових вузлів, створення аналітичної моделі для оцінки техніко-економічної ефективності процесів генерації та споживання, а також безпосередню програмну реалізацію керуючих впливів. Раніше розроблені математичні моделі перехідних процесів у вузлах комбінованого джерела живлення дозволяють перейти до комплексного аналізу енергетичних режимів.

Оцінка вартісних показників та ефективності розподілу енергії у транспортних мережах дає можливість визначити ступінь досконалості функціонування системи за умови безумовного забезпечення пускових характеристик привідного агрегату та дотримання нормативних вимог до якості електроенергії. Подібний синергетичний підхід, що об'єднує фундаментальні закони електродинаміки та принципи економічної теорії, є критично важливим для інтегрованих електроенергетичних систем, які забезпечують живлення специфічних споживачів транспортного засобу. Сучасні вимоги до таких комплексів включають не лише традиційну надійність, безпеку та експлуатаційну технологічність, а й підвищену енергоефективність, що обумовлено необхідністю мінімізації втрат у процесах багаторазового перетворення та передачі енергії від дизель-генераторної установки й накопичувачів до стартерного вузла.

Структурна організація транспортної енергетичної системи традиційно базується на ієрархічному принципі, що охоплює рівні від первинних джерел і головних розподільних пристроїв до локальних споживачів та кінцевих шин. Кожен із цих рівнів характеризується специфічними методами розрахунку електричних параметрів та проектними допусками. Застосування диференційованого підходу до аналізу втрат активної потужності на кожному ієрархічному етапі дозволяє отримати адекватну оцінку енергетичного балансу системи. З точки зору дослідження електростартерного пуску доцільно сегментувати загальну енергосистему на фрагменти, що включають джерела живлення (дизель-генератор та АКБ), внутрішні магістралі та мережі безпосередніх споживачів. Така класифікація

дозволяє ідентифікувати найбільш енергоємні ділянки та локалізувати зони максимальних втрат у процесі передачі потужності.

Архітектура системи електропостачання транспортного засобу детермінована номінальною напругою, конфігурацією допоміжних агрегатів та необхідним ступенем безперебійності процесу пуску. Передавальна інфраструктура, представлена кабельними лініями та шинопроводами, може бути реалізована за радіальною або магістральною схемою. Радіальні ланцюги забезпечують найвищу надійність для критично важливих вузлів системи пуску, тоді як магістральні та змішані схеми дозволяють оптимізувати масогабаритні та вартісні характеристики бортової мережі. У контексті комбінованого живлення використання гібридних топологій мереж дозволяє найбільш гнучко управляти розподілом енергії між генераторною установкою та акумуляторами.

Системний аналіз транспортної електроенергетики має виходити за межі стандартного енергоаудиту, який часто розглядає елементи ізольовано. Ефективна стратегія енергозбереження в системах електростартерного пуску вимагає врахування нерозривного взаємозв'язку процесів перетворення та споживання енергії. Інтегрований підхід передбачає, що декомпозиція системи на функціональні фрагменти має суворо відповідати її фізичній структурі та специфіці технологічних режимів роботи дизельного двигуна й електричних накопичувачів. Це дозволяє врахувати унікальні динамічні характеристики кожної транспортної підсистеми та сформулювати адаптивні алгоритми управління, що забезпечують максимальний ККД пускового циклу. Запропонована концепція структуризації та моделювання створює необхідні умови для синтезу систем управління, здатних у реальному часі оптимізувати режими роботи комбінованого джерела живлення, мінімізуючи деградацію акумуляторів та витрату палива дизель-генератором при збереженні необхідної динаміки пуску.

Процес передачі енергії в електричних магістралях транспортного засобу неминуче поєднаний із втратами активної потужності, обумовленими фундаментальними електромагнітними та тепловими явищами у провідних елементах і силовому обладнанні. Стосовно системи електростартерного пуску з комбінованим живленням, існуюча класифікація енерговтрат базується на етіології їх виникнення. Первинна група втрат включає базові складові, детерміновані номінальними режимами роботи компонентів гібридної установки при розрахункових експлуатаційних параметрах, а також додаткові втрати, що виникають внаслідок стохастичних відхилень поточних режимів пуску від заданих специфікацій.

Друга група деструктивних факторів, що впливають на енергетичний баланс системи «дизель-генератор – акумулятор – стартер», класифікується за такими напрямками: структурна недосконалість архітектури силового ланцюга, циркуляція реактивної потужності

в елементах системи, нераціональність алгоритмів управління технологічними циклами у вузлах транспортного засобу, деградація показників якості електроенергії та системні дефекти в організації енергорозподілу. Під структурною недосконалістю в контексті вискоєфективного пуску розуміється відсутність комплексних науково-обґрунтованих підходів до вибору номінальної потужності агрегатів, визначення топологічних координат точок підключення джерел живлення (АКБ та генератора) та оптимізації перерізів струмоведучих ліній, що в сукупності зумовлює інтегральний рівень енергозбереження системи.

Виклад основного матеріалу

Транспортування реактивної потужності крізь елементи мережі, що мають активний опір, провокує не лише прямі енергетичні втрати, а й викликає низку деструктивних ефектів, критичних для пускових режимів. До них належать зниження пропускну здатності розподільних пристроїв та дестабілізація рівнів напруги, що безпосередньо позначається на крутому моменті стартера. Мінімізація таких перетоків досягається впровадженням систем компенсації реактивної потужності, що в межах транспортного засобу трансформується у комплекс інженерних завдань: від зниження власного реактивного споживання виконавчих механізмів до визначення оптимальних локацій і режимів роботи компенсуювальних пристроїв.

Практична реалізація стратегії енергозбереження в транспортних мережах охоплює широкий спектр конструктивних заходів. Ключовими серед них є оптимізація коефіцієнта завантаження силових агрегатів, впровадження обмежувачів холостого ходу для допоміжних приводів та застосування сучасних напівпровідникових перетворювачів із раціональними алгоритмами керування. Особлива увага приділяється якості сервісного обслуговування електричних машин та доцільності використання синхронних двигунів. Індивідуальна компенсація реактивної потужності безпосередньо біля потужних споживачів пускового комплексу дозволяє суттєво розвантажити бортову мережу та підвищити загальну енергоефективність циклу при живленні від комбінованого джерела.

Стратегічною метою модернізації систем електростартерного пуску є радикальне зниження рівня енергетичних втрат. Формування переліку заходів має здійснюватися ітераційно, охоплюючи етапи генерації технічних рішень, селекції їх комбінацій та визначення цільової функції за суворого дотримання граничних умов роботи дизель-генератора й акумуляторів. Сукупність схемотехнічних рішень, що мінімізують втрати при передачі потужності, утворює фундамент для створення динамічно трансформованої енергетичної інфраструктури. Такий підхід дозволяє адаптувати параметри системи до варіативних умов експлуатації, забезпечуючи гнучке управління потоками енергії.

Важливим фактором є взаємна кореляція змін у структурі енергосистеми. Повна заміна обладнання часто виявляється економічно невиправданою через високу вартість компонентів, що зумовлює необхідність пошуку компромісних рішень. Незважаючи на типізацію проектів для певних класів транспорту, кожен конкретний агрегат потребує індивідуального підходу до ранжування заходів за критерієм питомої економії. Для кількісної оцінки інновацій доцільно використовувати апарат техніко-економічного аналізу, де пріоритет надається сценаріям із максимальним чистим дисконтованим доходом, що дозволяє оцінити довгострокову вигоду з урахуванням вартості капіталу та ризиків.

Методологія реалізації програми енергозбереження включає формування множини технічних заходів, порівняльний аналіз їх параметрів та ранжування за мірою зменшення вартості заощадженого ресурсу. При цьому поточні експлуатаційні витрати зіставляються з капітальними вкладеннями, а термін окупності проекту стає вирішальним критерієм при виборі топології мережі або типу накопичувачів. Особлива увага приділяється потенціалу енергозбереження, який визначається як різниця між фактичними втратами у поточній конфігурації та прогнозованими показниками в оптимізованій моделі. Це дозволяє ідентифікувати технічний резерв системи та розрахувати конкретні значення економії палива і ресурсу акумуляторів.

Математичний опис процесів у системах із комбінованим живленням вимагає створення адекватного аналітичного аналога, що враховує специфіку режимів дизель-генератора та батарей. Для системного управління рівнем втрат пропонується прогностична модель, де ключовим параметром є сумарні ефективні втрати енергії на етапах генерації, розподілу та споживання. Структурний синтез моделі та функціональні залежності визначаються допустимою похибкою апроксимації, що корелює з класом точності вимірювальних комплексів. Важливою задачею є прогнозування динаміки втрат при варіації топології силової частини у довгостроковій перспективі.

Вибір методу розрахунку енерговтрат базується на стабільних даних про активні опори елементів заміщення. Залежно від повноти інформації можуть застосовуватися детерміновані, ймовірнісні або статистичні підходи. В умовах визначеності параметрів пріоритетним є детермінований метод, де інтегральні втрати активної енергії розраховуються як добуток втрат потужності в режимі максимального струму на тривалість пікових навантажень. Принципи декомпозиції дозволяють розділити систему на рівні: шини генератора, розподільні пристрої, магістралі та стартерні двигуни. Сумарні втрати визначаються як сума енергії, втраченої на кожному ієрархічному етапі.

Для детального аналізу енергоефективності конкретних вузлів втрати розраховуються шляхом додавання показників на всіх елементарних ділянках мережі. Струмові навантаження безпосередньо залежить від співвідношення повної потужності та напруги, а

питомий опір – від фізичних властивостей матеріалу та перерізу провідників. Геометричні параметри розраховуються на основі координат вузлів із застосуванням принципу найкоротшої відстані, проте з урахуванням технічних обмежень щодо потужності агрегатів та просторових лімітів транспортного засобу.

Особлива увага приділяється топологічній оптимізації, що враховує зони, заборонені для монтажу обладнання. Для опису таких ділянок використовується метод розділення площини, де обмеження задаються логічними функціями. Якщо розрахункові координати елемента потрапляють у таку зону, система інтерпретує це як порушення компоновальних вимог. Такий підхід дозволяє автоматизувати проектування, мінімізуючи втрати за рахунок вибору оптимальних шляхів передачі потужності при суворому дотриманні конструктивних обмежень. Цей етап формування теоретичного базису дозволяє перейти до безпосередньої алгоритмізації процесів управління в гібридних системах пуску. Підключення накопичувального пристрою до загальної шини постійного струму приймається на основі схеми, наведеної на рис. 1.

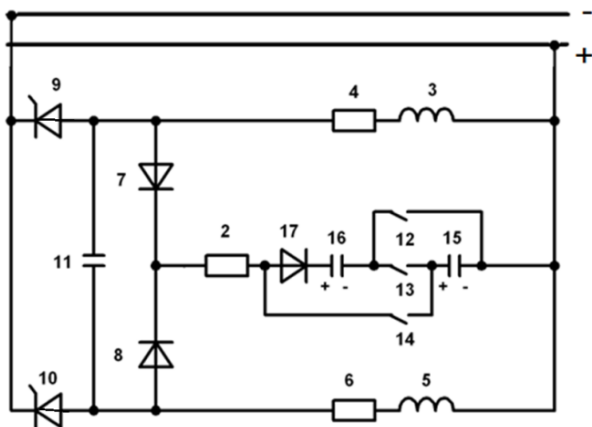


Рис. 1 – Схема підключення накопичувального пристрою до загальної шини постійного струму дизель-генераторної енергетичної установки

Функціонування представленої схеми базується на принципах імпульсного перетворення енергії для оптимізації процесу накопичення заряду. З метою підвищення загального коефіцієнта корисної дії системи живлення використовується спеціалізований зарядний пристрій, робота якого ґрунтується на властивостях електромагнітного дроселя. У такому режимі енергія, що надходить із загальної шини постійного струму (1), по чергово акумулюється в індуктивних елементах – дроселях (3) та (5), після чого через напівпровідникові діоди (7) та (8) спрямовується до накопичувальних ємностей (15) та (16). Накопичення енергії в дроселі триває до моменту досягнення встановленого граничного значення максимального струму, після чого за допомогою тиристорних ключів (9) або (10) відбувається

розрив кола, що змушує струм примусово протікати безпосередньо через конденсаторний блок.

Керування періодичністю відкриття та закриття тиристорів здійснюється автоматизованим блоком управління, який адаптує параметри комутації до поточного стану системи. Для забезпечення гнучкого регулювання рівня напруги в процесі енергообміну накопичувальна ємність розділена на дві ідентичні частини. Тривалість розряду індуктивності у замкненому контурі L - C безпосередньо детермінується величиною ємності C та миттєвим значенням напруги на ній. Характерною особливістю такого процесу є те, що зростання напруги при одночасному зменшенні ємнісного показника сприяє прискоренню розряду дроселя, що дозволяє оперативно керувати динамікою пускових режимів.

Для детального вивчення електромагнітних процесів доцільно розглянути розрахункову схему заміщення стартерної мережі (рис. 2), де джерело живлення представлено електрорушійною силою акумулятора E .

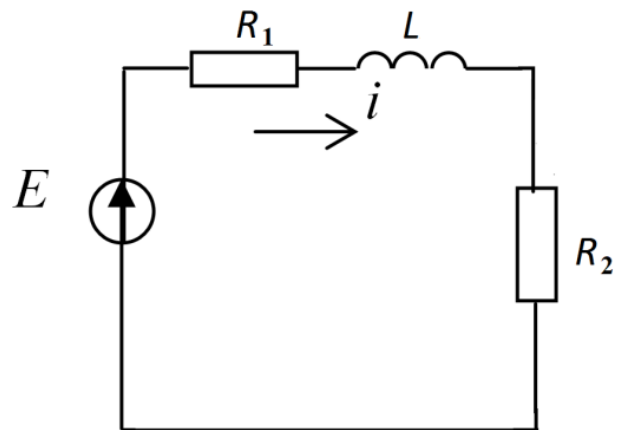


Рис. 2 – Схема заміщення стартерної мережі

У межах даної моделі стартерний вузол умовно апроксимується через еквівалентні значення індуктивності та активного опору обмоток його якоря, що в поєднанні з комплексним опором стартерної мережі формує повну структуру ланцюга. Така схематизація дозволяє аналізувати статичні та динамічні характеристики системи при стандартному варіанті живлення.

Подальший розвиток розрахункової моделі передбачає інтеграцію конденсаторного накопичувача у структуру базової схеми заміщення (рис. 3).

Це дає можливість перейти до комплексного дослідження режимів комбінованого стартерного пуску, аналізуючи розподіл енергетичних потоків між акумуляторною батареєю та додатковим джерелом енергії. Додавання ємнісного елемента суттєво змінює характер перехідних процесів, оскільки дозволяє компенсувати падіння напруги в моменти пікових навантажень, що є вирішальним фактором для забезпечення

надійного запуску дизель-генераторної установки в ускладнених експлуатаційних умовах.

$$i_2 = \frac{u_C(t)}{R_2}. \quad (10)$$

Струм першої гілки

$$i_1 = i_2 + i_3. \quad (11)$$

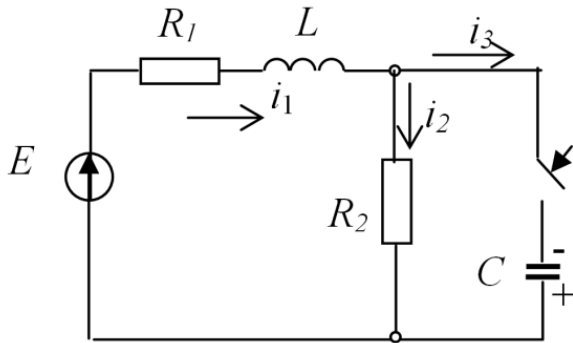


Рис. 3 – Схема заміщення стартерної мережі із накопичувальною ємністю

Оскільки напруга на конденсаторі є сумою усталеної та вільної складових напруги, то

$$u_C = u_{Cy} + u_{C6}. \quad (1)$$

Після комутації $i_3 = 0$, $i_1 = i_2$.

$$u_{Cy} = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_2. \quad (2)$$

$$u_{C6}(t) = A_1 e^{pt} + A_2 t e^{pt}. \quad (3)$$

Тоді:

$$\begin{cases} u_C = u_{Cy} + A_1 e^{pt} + A_2 t e^{pt}; \\ \frac{du_C}{dt} = pA_1 e^{pt} + pA_2 t e^{pt} + A_2 e^{pt}. \end{cases} \quad (4)$$

Для $t = 0$

$$\begin{cases} u_C(0) = u_y + A_1; \\ \frac{du_C}{dt} \big|_{t=0} = pA_1 + A_2, \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{du_C}{dt} \big|_{t=0} = \frac{i_3(0)}{C}. \quad (6)$$

Величина $i_1(0)$

$$i_1(0) = i_1(0^-) = \frac{E}{R_1 + R_2}. \quad (7)$$

Для $t = 0$ $i_2(0) = \frac{u_C(0)}{R_2}$. Тоді $i_3(0) = i_1(0) - i_2(0)$.

Отже

$$i_3 = C \frac{du_C}{dt} = C(pA_1 e^{pt} + pA_2 t e^{pt} + A_2 e^{pt}). \quad (8)$$

Струм другої гілки

На основі отриманих аналітичних виразів та запропонованої методики оцінки впливу впроваджуваних заходів на паливну ефективність було проведено розрахунок показників для дизель-генераторної енергоустановки Caterpillar 3516. Практичне застосування розробленої системи стартерного пуску, що базується на поєднанні традиційних акумуляторних батарей та ємнісних накопичувачів, дозволяє суттєво інтенсифікувати процес запуску двигуна. Основний ефект досягається завдяки форсуванню пускових режимів від накопичувальної системи, що призводить до помітного скорочення тривалості перехідних процесів та виходу установки на стабільні оберти холостого ходу.

Під час проведення розрахунків за базовий показник було прийнято дані виробника, згідно з якими питома витрата палива в момент пуску становить 350 г/кВт·год. Отримані результати порівняльного аналізу витрат палива для стандартної та комбінованої систем енергозабезпечення систематизовано та наведено у табл. 1. В якості вихідних даних для моделювання обрано параметри дизель-генераторної енергоустановки Caterpillar 3516 відповідно до [16–19]. Моделювання проводилось засобами Matlab з використанням математичної моделі [2, 3]. При цьому під час моделювання було враховано технічне обмеження, згідно з яким підвищення пускової частоти обертання колінчастого вала на величину, що перевищує 20%, є неприпустимим через ризик виникнення надмірних механічних навантажень на деталі циліндро-поршневої групи та елементи приводу.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики запуску дизеля

Зміна частоти обертання валу стартера за рахунок енергії накопичувальної системи, %	Питома витрата палива на запуск, г/кВт·год	Показник щодо зміни питомої витрати палива на запуск, %
0	350	0
+10	336,35	-3.9
+15	330,05	-5.7
+20	320,25	-8.5

Нормативне забезпечення проектування та побудови систем електропостачання мобільних енергоустановок із комбінованим пусковим джерелом базується на сукупності галузевих стандартів, вимог до електромагнітної сумісності та специфікацій безпеки автономних енергетичних систем. Основним завданням нормативної бази є регламентація параметрів якості

електроенергії, надійності комутаційної апаратури та захисту інтегрованих накопичувачів енергії в умовах динамічних навантажень.

Процес побудови комбінованих систем пуску регулюється стандартами, що визначають ієрархічну структуру бортової мережі та правила інтеграції різних джерел живлення. Нормативні документи вимагають чіткого розмежування силових ланцюгів стартерного пуску та кіл оперативного живлення систем автоматики. При використанні комбінованого джерела, що поєднує акумуляторні батареї та суперконденсаторні модулі, особлива увага приділяється забезпеченню селективності захисту. Кожен рівень ієрархії, від головних розподільних пристроїв до локальних шин споживачів, повинен відповідати вимогам щодо термічної та електродинамічної стійкості до струмів короткого замикання, які у системах із суперконденсаторами можуть значно перевищувати показники традиційних мереж.

Нормативні особливості експлуатації накопичувачів енергії у складі мобільних установок диктують суворі правила щодо їх зарядних та розрядних циклів. Згідно з вимогами до енергоефективності, системи керування повинні забезпечувати такий розподіл потоків потужності, при якому пікові пускові струми нівелюються за рахунок високої питомої потужності накопичувача, що регламентується стандартами серії ISO та відповідними державними стандартами з експлуатації транспортної техніки. Важливим аспектом є нормативне обмеження на рівень напруги на шинах постійного струму: відхилення від номінальних значень у моменти комутації накопичувача не повинні перевищувати встановлених допусків для запобігання збоєм у роботі мікропроцесорних систем керування двигуном.

Використання напівпровідникових перетворювачів (DC/DC-конверторів) для узгодження параметрів АКБ та накопичувачів вводить систему в поле дії нормативів з електромагнітної сумісності. Імпульсні завади, що генеруються пристроями заряду дросельного типу, мають бути локалізовані та відфільтровані відповідно до міжнародних стандартів, таких як IEC 61000. Крім того, конструктивне виконання блоків накопичувачів повинно відповідати нормам вібростійкості та удароміцності, що є критичним для мобільних енергоустановок. Особлива увага в нормативній базі приділяється пожежній безпеці та запобіганню перегріву електрохімічних елементів, що вимагає впровадження обов'язкових систем термічного моніторингу та аварійного відключення джерел у разі виходу параметрів за межі безпечного експлуатаційного коридору.

Нормативний підхід до оцінки ефективності систем пуску передбачає порівняльний аналіз фактичних втрат активної енергії із прогнозованими показниками енергозбереження. Методологія вибору типу накопичувача та схеми його підключення базується на розрахункових коефіцієнтах готовності та надійності, що регламентуються для спеціалізованої техніки. У процесі проектування обов'язковим є дотримання обмежень

щодо компонування обладнання, зокрема виключення можливості розміщення силових агрегатів у обмежених зонах транспортного засобу, що визначається нормами пасивної безпеки та ергономіки. Такий комплексний нормативний контроль забезпечує не лише високий ККД пускового циклу, а й гарантує тривалий термін служби всіх компонентів комбінованої системи електропостачання.

Результати та їх обговорення

Результати дослідження підтверджують, що раціональне керування потоками енергії у комбінованому джерелі живлення забезпечує досягнення граничної економії палива на рівні до 8,5% на один цикл запуску. Таке зниження витрат ресурсів не лише покращує техніко-економічні показники експлуатації установки Caterpillar 3516, а й опосередковано сприяє зменшенню екологічного навантаження за рахунок скорочення викидів продуктів неповного згоряння палива у фазі нестационарної роботи двигуна.

Висновки

Сформульовано засадничі принципи проектування високоефективних транспортних систем електростартерного пуску з комбінованим живленням. Встановлено, що базисом побудови таких комплексів є мінімізація енергетичних витрат та собівартості генерованої потужності в бортових мережах. Реалізація цього завдання вимагає розробки багаторівневих алгоритмів управління, що ґрунтуються на послідовному моделюванні статичних і динамічних процесів як у системі в цілому, так і в її окремих вузлах, включаючи дизель-генераторну установку та блок акумуляторних батарей. У межах дослідження обґрунтовано доцільність декомпозиції енергосистеми на функціональні фрагменти, що дозволяє деталізувати структуру втрат у кожному відсіку транспортного засобу та розробити адресні енергозбережні заходи без порушення цілісності загального енергетичного балансу.

Ідентифіковано ключові фактори виникнення енергетичних втрат в інтегрованих транспортних мережах змінного струму. Процес передачі потужності до пускових пристроїв неминує супроводжується втратами активної енергії, обумовленими тепловими та електромагнітними явищами у провідниках і силовому обладнанні. Особливу увагу приділено деструктивному впливу реактивної потужності, циркуляція якої крізь активні опори мережі провокує падіння напруги та зниження пропускної здатності розподільних трактів. Доведено, що елімінація цих ефектів є досяжною через комплексну компенсацію реактивної енергії, яка включає оптимізацію режимів роботи бортових споживачів, вибір раціональних точок підключення компенсуювальних пристроїв та використання сучасних алгоритмів керування перетворювальною технікою.

Перелік використаних джерел

- [1] Kulagin D., Maslov I. Mathematical Model of Electromagnetic Transients of a Frequency-Controlled Propeller's Induction Motor. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, 07–11 October 2024. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10877991>.
- [2] Kulagin D., Maslov I. Construction of a mathematical model of an induction motor for a transport power plant incorporating magnetic saturation processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 6, no. 8(138). Pp. 24–35. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.345066>.
- [3] Kulagin D., Maslov I. Synthesis of Automatic Control System of Traction Asynchronous Motor of Transport Diesel-Generator Power Plant. *Problemele Energeticii Regionale*. 2025. Iss. 4. Pp. 18–31. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.4-68.02>.
- [4] Zhu Z. Q., Howe D. Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 95, no. 4. Pp. 746–765. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.892482>.
- [5] Chen Z., Wang H., Yan Y. A Doubly Salient Starter/Generator With Two-Section Twisted-Rotor Structure for Potential Future Aerospace Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59, no. 9. Pp. 3588–3595. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2159951>.
- [6] Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles / C. C. Chan et al. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996. Vol. 43, no. 2. Pp. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.491357>.
- [7] Cai W. Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications. Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference. 39th IAS Annual Meeting, Seattle, WA, USA, 03-07 October 2004. Article 393. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2004.1348437>.
- [8] Liu C., Chau K. T., Jiang J. Z. A Permanent-Magnet Hybrid Brushless Integrated Starter-Generator for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. Vol. 57, no. 12. Pp. 4055–4064. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2044128>.
- [9] Finch J. W., Giaouris D. Controlled AC Electrical Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55, no. 2. Pp. 481–491. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.911209>.
- [10] Chau K. T., Chan C. C. Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2007. Vol. 95, no. 4. Pp. 821–835. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.890114>.
- [11] Ehsani M., Rahman K. M., Toliyat H. A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1997. Vol. 44, no. 1. Pp. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.557495>.
- [12] Starter-alternator for hybrid electric vehicle: comparison of induction and variable reluctance machines and drives / J. M. Miller et al. *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*, St. Louis, MO, USA, 12-15 October 1998. Vol. 1. Pp. 513–523. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.1998.732360>.
- [13] Khan F. H., Tolbert L. M., Webb W. E. Hybrid Electric Vehicle Power Management Solutions Based on Isolated and Nonisolated Configurations of Multilevel Modular Capacitor-Clamped Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 56, no. 8. Pp. 3079–3095. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2022074>.
- [14] Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application / C. A. Ferreira et al. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1995. Vol. 31, no. 3. Pp. 553–561. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.382116>.
- [15] Chan C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2002. Vol. 90, no. 2. Pp. 247–275. DOI: <https://doi.org/10.1109/5.989873>.
- [16] Energy Storage Systems for Automotive Applications / S. M. Lukic et al. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55, no. 6. Pp. 2258–2267. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918390>.
- [17] Industrial Diesel Engines 3516. URL: https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html (accessed 29.06.2025).
- [18] Macari N. C., Richardson R. D. Operation of a Caterpillar 3516 Spark-Ignited Engine on Low-Btu Fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1987. Vol. 109, no. 4. Pp. 443–447. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3240061>.
- [19] Lam H., Richter M., Ashton G. A New Approach to Maximize the Potential of Reciprocating Engines Operating on Bio-Fuel Energy. *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, Washington, DC, USA, 7–10 August 2011. Paper No: ES2011-54496. 2012. Pp. 1149–1158. DOI: <https://doi.org/10.1115/ES2011-54496>.

RESEARCH OF REGULATORY AND TECHNICAL FEATURES OF THE CONSTRUCTION OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF MOBILE POWER PLANTS WITH COMBINED STARTING SOURCE

Kulagin D.O.	D.Sc. (Engineering), professor, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3610-4250 , e-mail: kulagindo@gmail.com ;
Maslov I.Z.	PhD (Engineering), associate professor, Danube Institute of the National University «Odesa Maritime Academy», Izmail, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1759-6077 , e-mail: maslovigor@i.ua ;
Dievochkin V.F.	postgraduate student, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2381-5245 , e-mail: vdev@zp.edu.ua

The paper considers the scientific and practical aspects of building power supply systems for mobile power plants with combined starting sources under variable loads and adverse temperature factors. The relevance of the study is due to the need to increase the reliability of starter start of diesel generator sets, reduce energy losses and improve the operational characteristics of transport equipment. The purpose of the paper is to scientifically substantiate and develop a methodology for designing energy-efficient electric starter start systems based on combined power sources. To achieve the set goal, a set of tasks related to the analysis of existing technical solutions, the development of mathematical models of energy processes, the study of transient regimes and the justification of the choice of energy storage devices was solved. The research process used methods of system analysis, mathematical modeling, technical and economic assessment and structural decomposition of energy systems. Particular attention is paid to the analysis of the interaction of batteries and capacitive energy storage devices, optimization of the distribution of power flows and minimization of losses in the processes of generation, transmission and consumption of electricity. The features of the construction of combined starting systems are considered, including the topology of electrical networks, control algorithms and regulatory and technical requirements for their operation. The generalized results of the study indicate that the use of combined power sources provides an increase in the efficiency of starting processes, a reduction in the duration of starting and a reduction in specific fuel consumption up to 8.5%. Approaches to optimizing the structure of the power system are proposed, which allow increasing its reliability and energy efficiency through rational management of energy flows and reactive power compensation. The conclusions substantiate the scientific novelty, which consists in the formation of a comprehensive methodology for designing combined electric starter starting systems taking into account dynamic operating modes and regulatory restrictions. The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the results obtained in the design and modernization of mobile power plants. Promising directions for further research have been identified, related to improving control algorithms, expanding the functionality of energy storage devices, and increasing the overall efficiency of transport energy systems.

Keywords: power supply; power plant; supercapacitors; energy efficiency; energy losses; mathematical modeling; diesel generator; electrical machines and devices.

References

- [1] D. Kulagin, and I. Maslov, "Mathematical Model of Electromagnetic Transients of a Frequency-Controlled Propeller's Induction Motor," in *Proc. of the 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, October 07–11, 2024, pp. 1–5. doi: **10.1109/KhPIWeek61434.2024.10877991**.
- [2] D. Kulagin, and I. Maslov, "Construction of a mathematical model of an induction motor for a transport power plant incorporating magnetic saturation processes," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 8(138), pp. 24–35, 2025. doi: **10.15587/1729-4061.2025.345066**.
- [3] D. Kulagin, and I. Maslov, "Synthesis of Automatic Control System of Traction Asynchronous Motor of Transport Diesel-Generator Power Plant," *Problemele Energeticii Regionale*, no. 4, pp. 18–31, 2025. doi: **10.52254/1857-0070.2025.4-68.02**.
- [4] Z. Q. Zhu, and D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, 2007. doi: **10.1109/JPROC.2006.892482**.
- [5] Z. Chen, H. Wang, and Y. Yan, "A Doubly Salient Starter/Generator With Two-Section Twisted-Rotor Structure for Potential Future Aerospace Application," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 9, pp. 3588–3595, 2012. doi: **10.1109/TIE.2011.2159951**.
- [6] C. C. Chan, K. T. Chau, J. Z. Jiang, W. Xia, M. Zhu, and R. Zhang, "Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 2, pp. 331–339, 1996. doi: **10.1109/41.491357**.

- [7] W. Cai, "Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications," in *Proc. of the 2004 IEEE Industry Applications Conference. 39th IAS Annual Meeting*, Seattle, WA, USA, October 03-07, 2004, article 393. doi: **10.1109/IAS.2004.1348437**.
- [8] C. Liu, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, "A Permanent-Magnet Hybrid Brushless Integrated Starter-Generator for Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 4055–4064, 2010. doi: **10.1109/TIE.2010.2044128**.
- [9] J. W. Finch, and D. Giaouris, "Controlled AC Electrical Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 481–491, 2008. doi: **10.1109/TIE.2007.911209**.
- [10] K. T. Chau, and C. C. Chan, "Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 821–835, 2007. doi: **10.1109/JPROC.2006.890114**.
- [11] M. Ehsani, K. M. Rahman, and H. A. Toliyat, "Propulsion system design of electric and hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 19–27, 1997. doi: **10.1109/41.557495**.
- [12] J. M. Miller, A. R. Gale, P. J. McCleer, F. Leonardi, and J. H. Lang, "Starter-alternator for hybrid electric vehicle: comparison of induction and variable reluctance machines and drives," in *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*, St. Louis, MO, USA, October 12-15, 1998, vol. 1, pp. 513–523. doi: **10.1109/IAS.1998.732360**.
- [13] F. H. Khan, L. M. Tolbert, and W. E. Webb, "Hybrid Electric Vehicle Power Management Solutions Based on Isolated and Nonisolated Configurations of Multilevel Modular Capacitor-Clamped Converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 3079–3095, 2009. doi: **10.1109/TIE.2009.2022074**.
- [14] C. A. Ferreira, S. R. Jones, W. S. Heglund, and W. D. Jones, "Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 3, pp. 553–561, 1995. doi: **10.1109/28.382116**.
- [15] C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, 2002. doi: **10.1109/5.989873**.
- [16] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy Storage Systems for Automotive Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, 2008. doi: **10.1109/TIE.2008.918390**.
- [17] Industrial Diesel Engines 3516. [Online]. Available at: https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html. Accessed on: June 29, 2025.
- [18] N. C. Macari, and R. D. Richardson, "Operation of a Caterpillar 3516 Spark-Ignited Engine on Low-Btu Fuel," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 109, no. 4, pp. 443–447, 1987. doi: **10.1115/1.3240061**.
- [19] H. Lam, M. Richter, and G. Ashton, "A New Approach to Maximize the Potential of Reciprocating Engines Operating on Bio-Fuel Energy," in *Proc. of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, Washington, DC, USA, August 7–10, 2011, paper no: es2011-54496, pp. 1149–1158. doi: **10.1115/ES2011-54496**.

Стаття надійшла 23.01.2026

Стаття прийнята 15.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Кулагін Д. О., Маслов І. З., Девочкін В. Ф. Дослідження нормативно-технічних особливостей побудови систем електропостачання мобільних енергоустановок з комбінованим пусковим джерелом. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 27–36. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359883>.

СИНТЕЗ РОБАСТНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИМ ОСВІТЛЕННЯМ В УМОВАХ ПАРАМЕТРИЧНОЇ
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Плешков П.Г.	канд. техн. наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2141-4811 , e-mail: kafedra.etsm@gmail.com ;
Зінзура В.В.	канд. техн. наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6357-064X , e-mail: vasiliy.zinzura@gmail.com ;
Петрова К.Г.	канд. техн. наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1928-6833 , e-mail: kateflash27@gmail.com ;
Гарасьова Н.Ю.	канд. техн. наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3609-4681 , e-mail: ngarasova@gmail.com ;
Солдатенко В.П.	канд. техн. наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7781-9343 , e-mail: kirovograd41@gmail.com

У статті розв'язується актуальна науково-практична задача забезпечення стабільності та енергоефективності автоматичних систем промислового освітлення. В умовах тривалої експлуатації відбувається параметрична деградація оптичного середовища та температурне старіння компонентів світлодіодів. Це призводить до значного зниження якості перехідних процесів при використанні класичних пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів, виникнення перерегулювання та шкідливого для зору працівників мерехтіння світла. Метою даного дослідження є розробка алгоритму робастного керування системою промислового світлодіодного освітлення на базі апарату H_∞ -синтезу для забезпечення стабільних нормативних показників зорового комфорту в умовах експлуатаційної деградації обладнання та дії неконтрольованих зовнішніх збурень. Для досягнення поставленої мети застосовано математичний апарат H_∞ синтезу в рамках розширеної задачі змішаної чутливості. Сформовано систему вагових фільтрів, які забезпечують системі астатизм, робастну стійкість до високочастотних шумів. Знаходження субоптимального контролера здійснювалося шляхом розв'язання системи алгебраїчних матричних рівнянь Ріккати у просторі станів. Результати комп'ютерного моделювання підтвердили суттєву перевагу запропонованого методу. Встановлено, що в умовах параметричної деградації класичний регулятор допускає значний рівень перерегулювання, тоді як синтезований робастний контролер усуває перерегулювання та стабільно утримує нормативний рівень освітленості. Наукова новизна дослідження полягає в обґрунтуванні та застосуванні методу робастного синтезу з прямим штрафуванням зусилля керування безпосередньо для систем світлодіодного освітлення, що унеможливує різкі сплески струму в драйверах. Практична значущість одержаних результатів полягає у можливості впровадження алгоритму в промислові мікроконтролери для забезпечення високого зорового комфорту, оптимізації енергоспоживання та подовження терміну служби обладнання. Подальші дослідження у даному напрямі доцільно зосередити на інтеграції розробленого алгоритму з методами нечіткої логіки для створення гібридних адаптивних систем керування розумним освітленням.

Ключові слова: робастне керування; енергоефективне освітлення; параметрична невизначеність; змішана чутливість; пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор; промислові світлодіодні системи.

Постановка проблеми

У сучасних умовах глобального переходу до енергозберігаючих технологій та концепції Industry 4.0 підвищення енергоефективності систем штучного освітлення є одним із пріоритетних напрямів розвитку промислової інфраструктури. Сучасні автоматизовані системи освітлення на базі світлодіодних технологій дозволяють суттєво знизити енергоспоживання. Проте в умовах реальних промислових цехів виникає практична задача: забезпечення стабільного нормативного

рівня освітленості (наприклад, для точних зорових робіт) в умовах інтенсивної дії неконтрольованих зовнішніх збурень, таких як раптова поява глибоких тіней від рухомих механізмів чи мостових кранів.

Наукова задача ускладнюється тим, що промислові системи освітлення піддаються невідворотній експлуатаційній деградації. Запилення вторинної оптики світильників, помутніння лінз, температурне старіння світловипромінюючих кристалів та зміна теплового опору радіаторів призводять до неперервної зміни динамічних параметрів об'єкта керування. Це

призводить до формування яскраво вираженої параметричної невизначеності систем освітлення.

Класичні системи автоматичного керування (САК), побудовані на базі лінійних пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, налаштовуються для номінальних умов роботи. Як показує інженерна практика, при значному експлуатаційному зношенні оптичного середовища такі регулятори втрачають запас стійкості. Спроби лінійної системи компенсувати зовнішні збурення в деградованому стані призводять до виникнення перерегулювання та низькочастотних коливань рівня освітленості. Це є негативним явищем, оскільки зростає втома персоналу прямо впливає на безпеку праці та продуктивність. Крім того, неконтрольовані різкі сплески керуючого сигналу створюють ударні струмові навантаження на електронні компоненти LED-драйверів, суттєво скорочуючи їхній термін служби.

Важливим питанням, на вирішення якого спрямоване дане дослідження, є розробка такого алгоритму керування, який би гарантував абсолютну відсутність коливання рівнів освітленості та перерегулювань на всьому діапазоні життєвого циклу світильника. Постає завдання не просто забезпечити стійкість системи керування до збурень, але й аналітично обмежити енергію керуючого впливу для фізичного захисту апаратної частини. Відповідно, дослідження методів структурного синтезу робастних контролерів, здатних одночасно задовольняти критерії візуального комфорту та апаратних обмежень, є надзвичайно актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В роботах [1–4] розроблено інформаційні системи та застосунки для моніторингу й керування освітленням на основі даних із сенсорів та природного світла. Проте суттєвим недоліком цих рішень є фокус виключно на програмному рівні керування або моніторингу: вони не містять строгих математичних алгоритмів стабілізації струмів LED-драйвера в умовах раптових збурень. У роботі [5] розглядається інтелектуальне керування освітленням тунелів з використанням сонячної енергії. Однак запропоновані алгоритми не враховують параметричної невизначеності об'єкта під час тривалої експлуатації.

В роботі [6] запропоновано застосування нечіткого контролера на базі алгоритму Мамдані для систем розумного дому, в тому числі і для систем керування штучним освітленням. В дослідженні [7] пропонується для оброблення даних низької якості від оптичних датчиків застосовувати математичний апарат нечіткої логіки та генетичні алгоритми. Загальним недоліком підходів [6, 7] є відсутність строгих математичних гарантій стійкості замкненої системи та неможливість аналітично задати обмеження на величину зусилля керування, що може призводити до некоректної роботи апаратної частини. В роботі [8] розроблено систему

керування на базі комунікації видимим світлом, недоліком якої є висока чутливість якості регулювання до оптичних перешкод.

У дослідженні [9] для стабілізації підвищувально-понижуючого DC-DC перетворювача застосовано метод ковзного режиму. Незважаючи на високу швидкість реакції, недоліком цього методу є виникнення високочастотних пульсацій керуючого сигналу, що призводить до передчасного зношення компонентів та появи високочастотного мерехтіння світла. У роботах [10–12] доведено високу ефективність алгоритмів модельно-прогнозуючого керування для інженерних систем будівель. Однак суттєвим обмеженням цього методу є потреба у значних обчислювальних ресурсах, що робить його непридатним для інтеграції у бюджетні мікроконтролери для керування швидкозмінними електричними процесами LED-драйверів.

Найбільш перспективним підходом для подолання параметричної невизначеності є робастне керування. В роботі [13] запропоновано введення елементів робастності в контур керування світлодіодами, а в [14] синтезовано робастний контролер низького порядку для знижувального перетворювача. Проте ці рішення є досить вузькоспрямованими і не враховують оптичних показників світильників. У дослідженнях [15, 16] успішно застосовано апарат H_∞ -синтезу для стабілізації мікромереж та перетворювачів. Головним недоліком цих робіт у контексті освітлення є те, що вони орієнтовані виключно на електричні параметри електромереж і не адаптовані до специфіки систем освітлення.

Таким чином, незважаючи на значну кількість публікацій, питання застосування H_∞ -синтезу, а саме у вигляді постановки розширеної задачі змішаної чутливості $S/KS/T$ безпосередньо для систем промислового освітлення залишається невирішеним. Відсутність робастних алгоритмів, які б одночасно гарантували відсутність перерегулювання в умовах деградації оптики та мали жорстке обмеження на рівень керуючого сигналу, підтверджує актуальність розробки запропонованої в даній статті системи керування рівнем освітленості.

Мета статті

Метою даного дослідження є розробка алгоритму робастного керування системою промислового світлодіодного освітлення на базі апарату H_∞ -синтезу для забезпечення стабільних нормативних показників зорового комфорту в умовах експлуатаційної деградації обладнання та дії неконтрольованих зовнішніх збурень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести математичне моделювання системи промислового світлодіодного освітлення з урахуванням його номінального стану та умов експлуатаційної деградації, формалізованої у вигляді мультиплікативної параметричної невизначеності.

2. Сформулювати розширену задачу змішаної чутливості та аналітично розрахувати параметри вагових фільтрів, що гарантують системі астатизм, робастну стійкість до шумів та обмеження рівня сигналу керування.

3. Виконати синтез субоптимального H_∞ -контролера шляхом розв'язання системи алгебраїчних матричних рівнянь Ріккати у просторі станів та здійснити аналіз полюсів і нулів отриманої передавальної функції.

4. Здійснити порівняльне комп'ютерне моделювання динаміки САК із синтезованим H_∞ -контролером та класичним ПІД-регулятором для перевірки їхньої робастності в умовах дії раптових зовнішніх збурень та деградації оптичного середовища.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є система автоматичного керування промисловим освітленням робочої зони, що включає електротехнічну та оптичну складові. Предметом дослідження виступають алгоритми робастного керування, спрямовані на стабілізацію заданого рівня освітленості в умовах параметричної невизначеності об'єкта та дії зовнішніх неконтрольованих збурень.

Основним методом розв'язання задачі стабілізації обрано математичний апарат H_∞ -синтезу. Для врахування фізичних обмежень апаратної частини, зокрема, для запобігання струмовим перевантаженням LED-драйвера, та забезпечення необхідної якості перехідних процесів застосовано розширену задачу змішаної чутливості. Синтез субоптимального контролера здійснювався шляхом розв'язання системи алгебраїчних матричних рівнянь Ріккати у просторі станів.

Для верифікації синтезованого алгоритму та порівняльного аналізу застосовано метод комп'ютерного моделювання. Усі матричні обчислення, а також побудова логарифмічних амплітудно-частотних (ЛАЧХ) і перехідних характеристик виконувалися у програмному середовищі MATLAB із використанням спеціалізованого пакета Robust Control Toolbox.

Сценарій моделювання передбачав дослідження динаміки замкненої системи при відпрацюванні цільового рівня освітленості 500 лк та реакції на адитивне зовнішнє збурення (раптову появу тіні) амплітудою -150 лк. Для доведення робастності системи експеримент проводився за двох експлуатаційних станів:

- номінальні умови – чисте оптичне середовище та номінальна швидкодія драйвера;
- умови експлуатаційної деградації – зниження коефіцієнта передачі оптичного тракту на 40% та зростання інерційності системи в 3 рази.

Оцінка ефективності запропонованого H_∞ -контролера здійснювалася шляхом кількісного порівняння перегулювання та величини динамічного відхилення з аналогічними показниками класичного ПІД-регулятора.

Виклад основного матеріалу

Вирішення проблеми надійного керування промисловим освітленням вимагає переходу від класичних лінійних ПІД-регуляторів до сучасних робастних систем. Для забезпечення незмінного рівня зорового комфорту, оптимізації енергоспоживання та захисту апаратної частини LED-драйверів від струмових перевантажень у даній роботі запропоновано застосувати апарат H_∞ -керування. Базовим етапом для реалізації цієї процедури є формування математичної моделі системи, яка враховує як номінальну динаміку об'єкта, так і його невідворотну експлуатаційну деградацію.

Структурна схема та математична модель системи

Узагальнена структурна схема замкненої САК рівнем освітленості наведена на рис. 1.

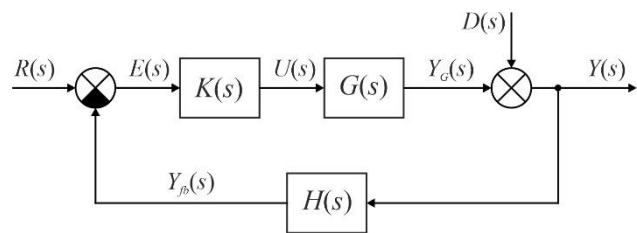


Рис. 1 – Структурна схема САК рівнем освітлення

У схемі на рис. 1: $K(s)$ – передавальна функція контролера; $G(s)$ – передавальна функція об'єкта керування (сукупність драйвера, LED-матриці та оптичного середовища цеху); $H(s)$ – передавальна функція датчика освітленості; $R(s)$ – завдання керування (бажаний рівень освітленості); $Y_p(s)$ – сигнал з виходу датчика освітленості; $E(s) = R(s) - Y_p(s)$ – сигнал помилки керування; $U(s)$ – керуючий вплив; $Y(s)$ – фактична освітленість на робочій поверхні; $D(s)$ – зовнішнє адитивне збурення на виході об'єкта (раптове затінення від рухомих механізмів, мостових кранів тощо).

Номінальна передавальна функція об'єкта $G_{nom}(s)$ апроксимується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$G_{nom}(s) = \frac{k_{nom}}{T_{nom}s+1} = \frac{100}{0,1s+1} \quad (1)$$

В умовах промислової експлуатації система знає деградації – запилення лінз, старіння кристалів, задимленість, що можна описати як мультиплікативну невизначеність параметрів. Деградовану модель $G_{deg}(s)$ зі зниженням на 40% коефіцієнтом передачі та збільшеною втричі інерційністю можна записати у вигляді:

$$G_{deg}(s) = \frac{60}{0,3s+1} \quad (2)$$

Аналіз функцій чутливості

У класичній постановці задачі H_∞ -синтезу якість роботи замкненої системи визначається компромісом між трьома базовими передавальними функціями:

1. Функція чутливості $S(s) = (I + G(s)K(s))^{-1}$ – описує передачу збурення $D(s)$ на вихід $Y(s)$ та

визначає статичну похибку. Для високої точності необхідно мінімізувати $|S(j\omega)|$ на низьких частотах.

2. Передавальна функція за керуванням $KS(s) = K(s)(I + G(s) \cdot K(s))^{-1}$ відображає вплив збурень та задаючого сигналу на керуючу напругу $U(s)$. Обмеження цієї функції є важливим для запобігання струмового перевантаження апаратної частини LED-драйвера.

3. Комплементарна функція чутливості $T(s) = G(s) K(s) (I + G(s) \cdot K(s))^{-1}$ визначає стійкість системи до високочастотних паразитних параметрів LED-драйвера (зокрема, комутаційних пульсацій ШІМ) та шумів оптичних сенсорів. Потребує мінімізації на високих частотах.

Враховуючи алгебраїчну тотожність $S(s) + T(s) = I$, одночасна мінімізація обох функцій у всьому спектрі частот є принципово неможливою. Це обмеження вимагає знаходження оптимального компромісу між показниками швидкодії та запасами робастної стійкості.

Вибір вагових функцій

Для знаходження цього компромісу використано задачу змішаної чутливості. Суть H_∞ -синтезу полягає у знаходженні такої передавальної функції контролера $K(s)$, що стабілізує замкнену систему та утримує H_∞ -норму матриці передавальних функцій (від зовнішніх збурень до вектора зважених сигналів) на рівні, меншому за задане субоптимальне значення γ . Тобто регулятор має мінімізувати H_∞ -норму розширеної матриці:

$$\left\| \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty < \gamma. \quad (3)$$

На рис. 2 наведено структурну схему розширеного об'єкта керування з ваговими фільтрами $W_1(s)$, $W_2(s)$ та $W_3(s)$.

Відповідно до структурної схеми (рис. 2), для постановки розширеної задачі змішаної чутливості введено вектор зважених контрольованих виходів $Z_1(s)$, $Z_2(s)$ та $Z_3(s)$. Ці сигнали формують математичну модель розширеного об'єкта і застосовуються виключно на етапі аналітичного синтезу.

Вони виконують роль критеріальних функцій при розв'язанні системи рівнянь Ріккати для знаходження оптимального контролера:

- $Z_1(s) = W_1(s)E(s)$ – зважений сигнал похибки керування. Мінімізація норми цього сигналу гарантує досягнення необхідних показників якості перехідного процесу: високої статичної точності та заданої швидкодії при виході на номінальний рівень освітленості (еквівалентно мінімізації функції чутливості $S(s)$).

- $Z_2(s) = W_2(s)U(s)$ – зважений сигнал керуючого впливу. Введення цього критерію дозволяє аналітично обмежити максимальну амплітуду та швидкість наростання генерованої ШІМ напруги. Це є необхідною умовою для запобігання надмірним зростанням керуючого

впливу та захисту силових електронних компонентів LED-драйвера від струмових перевантажень.

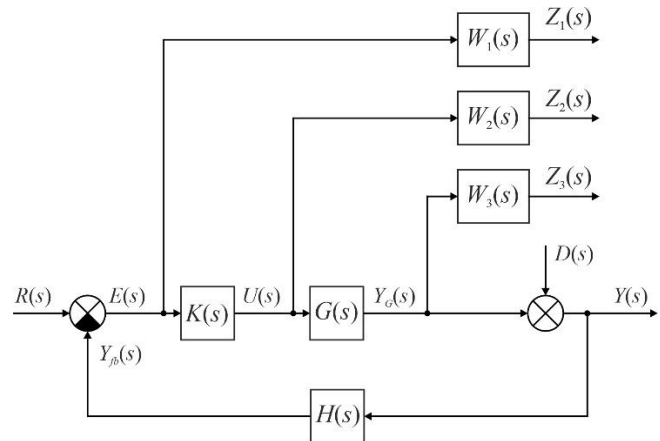


Рис. 2 – Структурна схема узагальненого об'єкта для H_∞ -синтезу

- $Z_3(s) = W_3(s)U(s)$ – зважений вихідний сигнал об'єкта. Обмеження цього параметра у високочастотному спектрі забезпечує робастну стійкість САК. Це дозволяє ефективно знижувати реакцію системи на вимірювальні шуми оптичного сенсора та високочастотні пульсації силового перетворювача (еквівалентно мінімізації комплементарної функції чутливості $T(s)$).

Синтез передавальних функцій вагових фільтрів здійснювався аналітично за методом асимптотичного формування ЛАЧХ.

Ваговий фільтр швидкодії $W_1(s)$ отримується на основі стандартної передавальної функції фільтра низьких частот:

$$W_1(s) = \frac{s/M_1 + \omega_{B1}}{s + \omega_{B1}A_1}, \quad (4)$$

де M_1 – максимально допустиме значення (пік) функції чутливості, що обмежує перегулювання системи (обрано $M_1 = 2$); ω_{B1} – бажана смуга пропускання, яка визначає швидкість виходу на заданий рівень освітленості (обрано $\omega_{B1} = 2$ рад/с); A_1 – максимально допустима статична похибка в сталому режимі (обрано $A_1 = 0.0005$, що гарантує похибку менше 0,05% для точного утримання 500 лк).

Підставивши обрані значення у формулу (4) отримаємо кінцевий вираз для фільтра $W_1(s)$:

$$W_1(s) = \frac{s/2 + 2}{s + 2 \cdot 0.0005} = \frac{0.5s + 2}{s + 0.001}. \quad (5)$$

Ваговий фільтр зусилля керування W_2 задано у вигляді вагового коефіцієнта, що обмежує максимальну амплітуду керуючого ШІМ-сигналу. Введення цього параметра дозволяє уникнути надмірної інтенсивності керуючого впливу, узгоджуючи динаміку перехідного процесу з фізичними можливостями апаратної частини та захищаючи силові компоненти LED-драйвера від струмових перевантажень під час компенсації рапто-вих зовнішніх збурень.

Ваговий фільтр робастної стійкості $W_3(s)$, який обмежує комплементарну функцію чутливості $T(s)$, синтезовано у вигляді класичного фільтра верхніх частот:

$$W_3(s) = \frac{s/\omega_{B3} + A_3}{s/(\omega_{B3}M_3) + 1}, \quad (6)$$

де M_3 – максимальний коефіцієнт підсилення у високо-частотній області, що визначає рівень придушення вимірювальних шумів сенсора (обрано $M_3 = 10$); ω_{B3} – частота зрізу, яка обмежує смугу пропускання замкненої системи та визначає межу початку інтенсивного пригнічення високо-частотних завад (обрано $\omega_{B3} = 10$ рад/с); A_3 – мінімальний коефіцієнт підсилення фільтра в робочій (низько-частотній) області, що мінімізує його вплив на основну динаміку системи (обрано $A_3 = 0.05$). Після підстановки обраних параметрів передавальна функція набуває вигляду:

$$W_3(s) = \frac{\frac{s}{10} + 0.05}{\frac{s}{10 \cdot 10} + 1} = \frac{0.1s + 0.05}{0.01s + 1}. \quad (7)$$

Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики вагових фільтрів $W_1(s)$, $W_2(s)$ і $W_3(s)$, наведені на рис. 3.

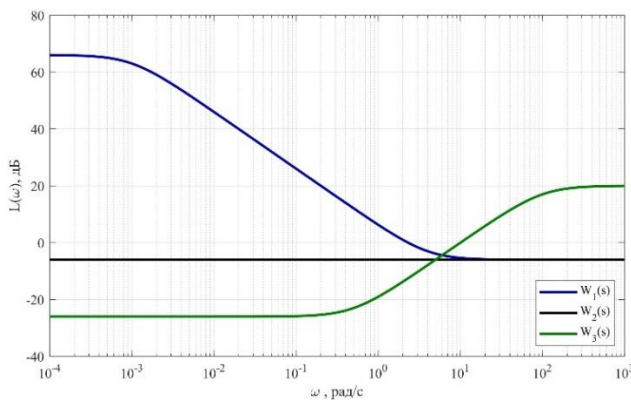


Рис. 3 – Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики вагових фільтрів $W_1(s)$, $W_2(s)$ і $W_3(s)$

Аналіз наведених характеристик свідчить, що ваговий фільтр $W_1(s)$ має значний коефіцієнт підсилення (понад 60 дБ) у низько-частотній області ($\omega < 10^{-2}$ рад/с). Це накладає обмеження на функцію чутливості $S(s)$, забезпечуючи її асимптотичну мінімізацію на низьких частотах, що гарантує системі властивості астатизму та швидку компенсацію сталих збурень. У свою чергу, коефіцієнт передачі фільтра $W_3(s)$ інтенсивно зростає в області високих частот ($\omega > 10$ рад/с), де зосереджені вимірювальні шуми та комутаційні пульсації силового перетворювача. Обмежуючи комплементарну функцію чутливості $T(s)$ у цій зоні, фільтр забезпечує необхідний запас робастної стійкості САК.

Синтез робастного контролера

Для переходу до процедури синтезу узагальнений об'єкт керування перетворюється з частотної області у простір станів і описується системою матричних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ z(t) = C_1x(t) + D_{12}u(t) \\ y(t) = C_2x(t) + D_{21}w(t) \end{cases} \quad (8)$$

де $x(t)$ – вектор стану розширеної системи; $w(t)$ – вектор зовнішніх збурень; $u(t)$ – вектор керування; $z(t)$ – вектор керованих виходів (штрафних сигналів z_1, z_2, z_3); $y(t)$ – вектор вимірювань; $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{12}, D_{21}$ – відповідні матриці простору станів.

Згідно з процедурою знаходження субоптимального контролера $K(s)$, який мінімізує H_∞ -норму розширеної матриці та забезпечує виконання умови $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$, зводиться до розв'язання двох алгебраїчних матричних рівнянь Ріккати:

- рівняння Ріккати для задачі керування:

$$A^T X + XA + X(\gamma^{-2}B_1B_1^T - B_2B_2^T)X + C_1^T C_1 = 0; \quad (9)$$

- рівняння Ріккати для задачі оцінювання:

$$AY + YA^T + Y(\gamma^{-2}C_1^T C_1 - C_2^T C_2)Y + B_1B_1^T = 0. \quad (10)$$

Необхідною і достатньою умовою існування стабілізуючого H_∞ – контролера є наявність симетричних додатно визначених розв'язків $X \geq 0$ та $Y \geq 0$, а також виконання спектральної умови для їх добутку $\rho(XY) < \gamma^2$.

Матричні обчислення здійснювалися у програмному середовищі MATLAB (пакет Robust Control Toolbox). У результаті розв'язання системи рівнянь Ріккати для розширеної задачі змішаної чутливості $S / KS/T$ отримано оптимальне значення критерію $\gamma = 0.5906 < 1$, що свідчить про успішне досягнення заданих обмежень. Еквівалентна передавальна функція синтезованого робастного контролера має вигляд:

$$K_{Hinf}(s) = \frac{220.78(s+100)(s+10)}{(s+20130)(s+322.8)(s+0.001)}. \quad (11)$$

Аналіз структури синтезованого контролера підтверджує її повну відповідність заданим критеріям якості. Наявність полюса, розташованого поблизу початку координат, надає системі властивості астатизму, що є необхідною умовою для забезпечення нульової статичної похибки. Динамічна компенсація інерційності деградованого об'єкта досягається за рахунок нулів чисельника ($s = -100$ та $s = -10$). Водночас високо-частотні полюси знаменника ($s = -20130$ та $s = -322.8$) обмежують смугу пропускання контролера, забезпечуючи крутий спад коефіцієнта передачі на високих частотах. Таке частотне профілювання є прямим наслідком дії вагового фільтра $W_2(s)$, що гарантує генерацію фізично допустимих керуючих ШІМ-сигналів та надійно захищає силові компоненти LED-драйвера від струмових перевантажень.

Результати та їх обговорення

Для верифікації ефективності синтезованого робастного H_∞ -контролера та підтвердження його переваг над існуючими системами керування було здійснено порівняльне комп'ютерне моделювання. З метою оцінки робастних властивостей алгоритмів, моделювання проводилося для двох крайніх експлуатаційних станів об'єкта: номінального (чиста оптика,

номінальна швидкодія) та деградованого (зниження коефіцієнта передачі на 40% та зростання інерційності втричі).

Програма моделювання передбачала відпрацювання системою нормативного рівня освітленості (500 лк) із подальшим внесенням ступінчастого зовнішнього збурення амплітудою -150 лк на 10-й секунді, що імітує раптову появу глибокої тіні в робочій зоні. В якості базової системи керування для порівняння було використано ПІД-регулятор, налаштований на оптимальну швидкодію для номінальних умов роботи.

На рис. 4 наведено сімейство перехідних характеристик системи при відпрацюванні одиничного стрибка для 5 різних станів експлуатаційної деградації (від номінального $T = 0,1$ с, $k = 100$ до граничного $T = 0,3$ с, $k = 60$).

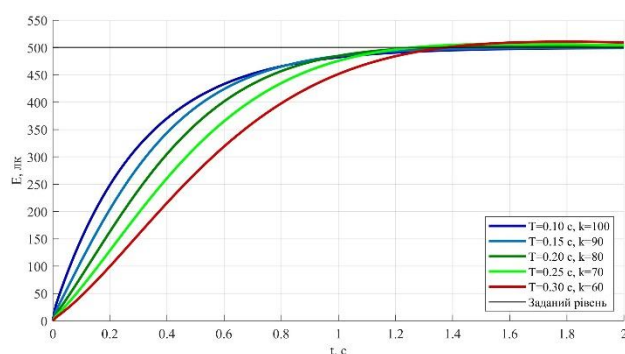


Рис. 4 – Сімейство перехідних характеристик робастної системи

Аналіз графіків на рис. 4 доводить, що система зберігає аперіодичний характер перехідного процесу на всьому розрахунковому діапазоні параметричної невизначеності. Синтезований H_∞ -контролер стабільно виводить систему на заданий рівень 500 лк без перерегулювань.

Графіки перехідних процесів базової та розробленої САК для номінальних умов експлуатації наведені на рис. 5, а для умов деградації об'єкта керування – на рис. 6.

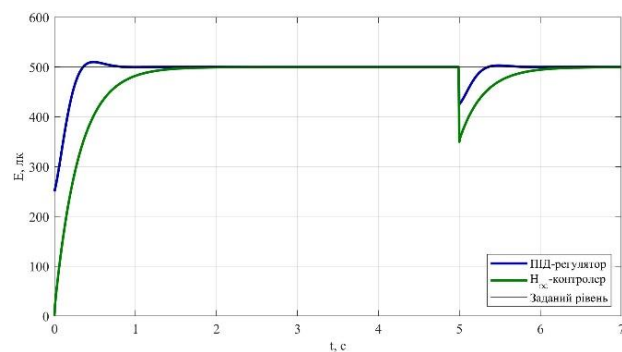


Рис. 5 – Графіки перехідних процесів в системі автоматичного керування освітленням за номінальних умов експлуатації

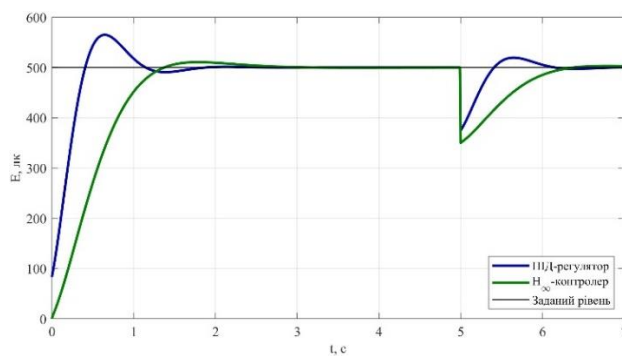


Рис. 6 – Перехідні процеси в системі автоматичного керування освітленням в умовах деградації об'єкта

Кількісні показники якості перехідних процесів для порівнюваних систем зведено у табл. 1.

Таблиця 1
Порівняльні показники якості систем керування освітленням

Показник якості перехідного процесу	ПІД-регулятор (номінальні умови)	H_∞ -контролер (номінальні умови)	ПІД-регулятор (умови деградації)	H_∞ -контролер (умови деградації)
Перерегулювання при старті, лк	10,0	0	65,0	10,6
Глибина відхилення при збуренні, лк	73,0	142,0	122,5	148,5

Аналіз отриманих перехідних характеристик дозволяє зробити висновки щодо якості обох систем керування. У номінальному режимі обидва контролери демонструють задовільні показники, швидко виводячи систему на заданий рівень освітленості без значної статичної похибки. Однак в умовах експлуатаційної деградації об'єкта їхня поведінка кардинально відрізняється, що повністю підтверджує висунуту на початку дослідження гіпотезу щодо обмеженості лінійних регуляторів.

Як видно з отриманих даних, при зміні параметрів оптичного середовища ПІД-регулятор допускає перерегулювання (понад 13%) та появи коливальних процесів, що є неприпустимим за санітарними нормами зорового комфорту. Крім того, неконтрольована інтенсивність керуючого впливу ПІД-регулятора в моменти дії збурень провокує небезпечні струмові піки в LED-драйвері.

Натомість запропонований H_∞ -контролер, завдяки структурному введенню штрафних фільтрів $W_1(s)$ та W_2 , зберігає аперіодичність перехідних

процесів на всьому діапазоні параметричної невизначеності. Він повністю усуває перерегулювання на старті та демонструє допустиме значення динамічного відхилення при реакції на тінь. Плавне, алгоритмічно обмежене наростання керуючого сигналу унеможливорює стрімкі зростання струму, що позитивно впливає на подовження ресурсу апаратної частини системи.

Таким чином, результати моделювання кількісно підтверджують, що алгоритмічне обмеження інтенсивності керування на етапі H_∞ -синтезу є ефективним інженерним рішенням, яке гарантує якісне відпрацювання збурень навіть за умов критичної деградації об'єкта.

Висновки

В результаті проведених досліджень розв'язано актуальну науково-практичну задачу стабілізації та підвищення енергоефективності систем автоматичного керування промисловим освітленням. За підсумками виконаної роботи сформульовано такі основні висновки:

1. Встановлено, що формалізація експлуатаційної деградації оптичного середовища (запилення лінз, старіння світлодіодів) та зростання інерційності апаратури у вигляді мультиплікативної параметричної невизначеності дозволяє з високою точністю математично охопити найгірші сценарії роботи об'єкта. Це створює надійну базу для проєктування робастних систем, нечутливих до зношення обладнання.

2. Доведено високу ефективність застосування розширеної задачі змішаної чутливості ($S/KS/T$) безпосередньо для систем світлодіодного освітлення. З'ясовано, що цілеспрямоване введення частотно-залежного штрафного фільтра на зусилля керування є інженерно необхідним: воно обмежує швидкість наростання керуючого сигналу та гарантує захист силових компонентів LED-драйвера від небезпечних струмових сплесків.

3. В результаті розв'язання системи матричних рівнянь Ріккати отримано субоптимальний робастний H_∞ -контролер. Аналіз його передавальної функції підтвердив, що оптимізоване розташування полюсів та нулів забезпечує системі одночасно властивості астазису (відпрацювання заданого рівня без статичної похибки) та робастну стійкість до високочастотних вимірювальних шумів сенсора.

4. За результатами порівняльного комп'ютерного моделювання виявлено, що класичний ПД-регулятор за умов параметричної деградації втрачає запас стійкості, генеруючи значне перерегулювання та провокуючи шкідливий для зору флікер-ефект. Натомість підтверджено, що застосування синтезованого H_∞ -контролера дозволяє повністю усунути перерегулювання на всьому діапазоні параметричної невизначеності та плавно нівелювати вплив раптових зовнішніх збурень (тіней), стабільно забезпечуючи нормативний зоровий комфорт та високу загальну енергоефективність системи.

Перелік використаних джерел

- [1] Advancing smart lighting: a developmental approach to energy efficiency through brightness adjustment strategies / Widartha V. P., Ra I., Lee S. Y., Kim C. S. *Journal of Low Power Electronics and Applications*. 2024. Vol. 14. Article 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/jlpea14010006>.
- [2] Information system of street lighting control in a smart city / Vaskiv R. I., Hrybovskiy O. M., Kunanets N. E., Duda O. M. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. No. 3. Article 212. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-3-18>.
- [3] Internet of Things-Based LED Driver Switch Mode Power Supply (SMPS) Monitoring System / W. Widjonarko et al. *Proceedings of the International Conference on Recent Innovations in Sustainable Engineering Solutions 2025 (ICONRISSES 2025)*, Jember, Indonesia, 12–13 September 2025. Pp. 227–242. DOI: https://doi.org/10.2991/978-94-6463-920-9_23.
- [4] Sorokin A., Chaikin M. Microcontroller-based intelligent lighting control system with adaptation to environmental conditions. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2025. Vol. 4, no. 82. Pp. 134–137. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.134>.
- [5] Weijiang Z. Design of tunnel illumination control system with solar energy. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 173. Article 02003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817302003>.
- [6] Real-Time Lighting Control System for Smart Home Applications / Budianto D., Nurmaini S., Tutuko B., Raflesia S. P. *Computer Engineering and Applications Journal*. 2018. Vol. 7, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.18495/comengapp.v7i3>.
- [7] Villar J. R., de la Cal E., Sedano J., García M. Evaluating the low quality measurements in lighting control systems. *Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, 5th International Workshop (SOCO 2010)*, Guimarães, Portugal, 16 June 2010. Pp. 119–126. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-13161-5_16.
- [8] Visible light communications for sensing and lighting control / Warmerdam K., Pandharipande A., Caicedo D., Zuniga M. *IEEE Sensors Journal*. 2016. Vol. 16, no. 17. Pp. 6718–6726. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2585199>.
- [9] Robust Control using Sliding Mode Controller for SEPIC DC/DC Converter / Nurwati T., Hasanah R. N., Djuriatno W., Ardhenta L. *Engineering Letters*. 2025. Vol. 33, no. 12. Pp. 5308–5314.
- [10] Pasupuleti M. K. Model Predictive Control for Smart HVAC Systems in Green Buildings. *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations (IJAIRI)*. 2025. Vol. 5. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.62311/nesx/rphcfrcs1>.
- [11] Tarragona J., Gangoles M., Casals M. Model predictive control for managing indoor air quality levels in

- buildings. *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. Pp. 787-797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.06.053>.
- [12] Model predictive control lowers barriers to adoption of heat-pump water heaters: A field study / L. D. R. Premer et al. *Energy Conversion and Management*. 2026. Vol. 348. Article 120723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120723>.
- [13] Baklanov A., Grigoryeva S., Györök G. Control of led lighting equipment with robustness elements. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2016. Vol. 13, no. 5. Pp. 105-119. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.13.5.2016.5.6>.
- [14] Sedehi A., Alfi A., Mirjafari M. Low-order Robust Controller for DC-DC Quadratic Buck Converter: Design and Implementation. *Journal of AI and Data Mining*. 2024. Vol. 12, no. 1. Pp. 15-25. DOI: <https://doi.org/10.22044/jadm.2024.13584.2475>.
- [15] Smart search implemented h-infinity control design for dab converter in dc microgrid / Liu Z., Ebrahimi J., Narm H. G., Eren S. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2024. Vol. 12, no. 2. Pp. 1906-1920. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2024.3351130>.
- [16] Robust decentralized voltage control for uncertain DC microgrids / Shafiee-Rad M., Sadabadi M. S., Shafiee Q., Jahed-Motlagh M. R. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 125. Article 106468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106468>.

SYNTHESIS OF A ROBUST SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF ENERGY-EFFICIENT LIGHTING UNDER CONDITIONS OF PARAMETRIC UNCERTAINTY

Plieshkov P.H.	PhD (Engineering), professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2141-4811 , e-mail: kafedra.etsem@gmail.com ;
Zinzura V.V.	PhD (Engineering), associate professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6357-064X , e-mail: vasiliy-zinzura@gmail.com ;
Petrova K.H.	PhD (Engineering), associate professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1928-6833 , e-mail: kateflash27@gmail.com ;
Harasova N.Yu.	PhD (Engineering), associate professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3609-4681 , e-mail: ngarasova@gmail.com ;
Soldatenko V.P.	PhD (Engineering), associate professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7781-9343 , e-mail: kirovograd41@gmail.com

The article solves the current scientific and practical problem of ensuring the stability and energy efficiency of automatic industrial lighting systems. Under conditions of long-term operation, parametric degradation of the optical medium and temperature aging of LED components occur. This leads to a significant decrease in the quality of transient processes when using classical proportional-integral-differential regulators, the occurrence of overregulation and flickering of light harmful to the eyesight of workers. The purpose of this study is to develop an algorithm for robust control of the industrial LED lighting system based on the synthesis apparatus to ensure stable regulatory indicators of visual comfort under conditions of operational degradation of equipment and the action of uncontrolled external disturbances. To achieve the set goal, a mathematical synthesis apparatus was applied within the framework of an extended mixed sensitivity problem. A system of weighting filters was formed that provide the system with astaticity and robust resistance to high-frequency noise. Finding the suboptimal controller was carried out by solving a system of algebraic matrix Riccati equations in the state space. The results of computer simulation confirmed the significant advantage of the proposed method. It was established that under conditions of parametric degradation, the classical controller allows a significant level of overshoot, while the synthesized robust controller eliminates overshoot and stably maintains the regulatory level of illumination. The scientific novelty of the study lies in the justification and application of the robust synthesis method with direct penalty of the control effort directly for LED lighting systems, which makes sharp current surges in the drivers impossible. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of implementing the algorithm in industrial microcontrollers to ensure high visual comfort, optimize energy consumption and extend the service life of the equipment. Further research in this direction should be focused on integrating the developed algorithm with fuzzy logic methods to create hybrid adaptive smart lighting control systems.

Keywords: robust control; energy-efficient lighting; parametric uncertainty; mixed sensitivity; proportional-integral-differential controller; industrial LED systems.

References

- [1] V. P. Widartha, I. Ra, S. Y. Lee, and C. S. Kim, "Advancing smart lighting: a developmental approach to energy efficiency through brightness adjustment strategies," *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 14, article 6, 2024. doi: 10.3390/jlpea14010006.
- [2] R. I. Vaskiv, O. M. Hrybovskiy, N. E. Kunanets, and O. M. Duda, "Information system of street lighting control in a smart city," *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 3, article 212, 2024. doi: 10.15588/1607-3274-2024-3-18.
- [3] W. Widjonarko et al, "Internet of Things-Based LED Driver Switch Mode Power Supply (SMPS) Monitoring System," in *Proc. of the Int. Conf. on Recent Innovations in Sustainable Engineering Solutions 2025 (ICONRISES 2025)*, Jember, Indonesia, September 12–13, 2025, pp. 227-242. doi: 10.2991/978-94-6463-920-9_23.
- [4] A. Sorokin, and M. Chaikin, "Microcontroller-based intelligent lighting control system with adaptation to environmental conditions," *Control, Navigation and Communication Systems*, vol. 4, no. 82, pp. 134-137, 2025. doi: 10.26906/SUNZ.2025.4.134.
- [5] Z. Weijiang, "Design of tunnel illumination control system with solar energy," *MATEC Web of Conferences*, vol. 173, article 02003, 2018. doi: 10.1051/mateconf/201817302003.
- [6] D. Budianto, S. Nurmaini, B. Tutuko, and S. P. Rafflesia, "Real-Time Lighting Control System for Smart Home Applications," *Computer Engineering and Applications Journal*, vol. 7, no. 3, 2018. doi: 10.18495/comengapp.v7i3.
- [7] J. R. Villar, E. de la Cal, J. Sedano, and M. García, «Evaluating the low quality measurements in lighting control systems», in *Proc. of the Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, 5th International Workshop (SOCO 2010)*, Guimarães, Portugal, June 16, 2010, pp. 119-126, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-13161-5_16.
- [8] K. Warmerdam, A. Pandharipande, D. Caicedo, and M. Zuniga, «Visible light communications for sensing and lighting control», *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 17, pp. 6718-6726, 2016. doi: 10.1109/JSEN.2016.2585199.
- [9] T. Nurwati, R. N. Hasanah, W. Djurianto, and L. Ardhenta, "Robust Control using Sliding Mode Controller for SEPIC DC/DC Converter," *Engineering Letters*, vol. 33, no. 12, pp. 5308-5314, 2025.
- [10] M. K. Pasupuleti, "Model Predictive Control for Smart HVAC Systems in Green Buildings," *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations (IJAIRI)*, vol. 5, pp. 1-11, 2025. doi: 10.62311/nesx/rphcrefcs1.
- [11] J. Tarragona, M. Gangoellis, and M. Casals, "Model predictive control for managing indoor air quality levels in buildings," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 787–797, 2024. doi: 10.1016/j.egyr.2024.06.053.
- [12] L. D. R. Premer, E. N. Pergantis, L. Semmelmann, D. Ziviani, and K. J. Kircher, "Model predictive control lowers barriers to adoption of heat-pump water heaters: A field study," *Energy Conversion and Management*, vol. 348, article 120723, 2026. doi: 10.1016/j.enconman.2025.120723.
- [13] A. Baklanov, S. Grigoryeva, and G. Györök, "Control of led lighting equipment with robustness elements," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 13, no. 5, pp. 105-119, 2016. doi: 10.12700/APH.13.5.2016.5.6.
- [14] A. Sedehi, A. Alfi, and M. Mirjafari, "Low-order Robust Controller for DC-DC Quadratic Buck Converter: Design and Implementation," *Journal of AI and Data Mining*, vol. 12, no. 1, pp. 15-25, 2024. doi: 10.22044/jadm.2024.13584.2475.
- [15] Z. Liu, J. Ebrahimi, H. G. Narm, and S. Eren, "Smart search implemented h-infinity control design for dab converter in dc microgrid," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 1906-1920, 2024. doi: 10.1109/JESTPE.2024.3351130.
- [16] M. Shafiee-Rad, M. S. Sadabadi, Q. Shafiee, and M. R. Jahed-Motlagh, "Robust decentralized voltage control for uncertain DC microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, article 106468, 2021. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106468.

Стаття надійшла 15.02.2026

Стаття прийнята 13.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Синтез робастної системи автоматичного керування енергоефективним освітленням в умовах параметричної невизначеності / П. Г. Плешков та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2026. Вип. 53, том 2. С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359895>.

МОДУЛЬНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ПРОТИБУКСУВАЛЬНИМ КЕРУВАННЯМ

- Нестеренко О.Г.** аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0226-1153>, e-mail: Oleksandr.Nesterenko@iee.khpi.edu.ua;
- Кунченко Т.Ю.** канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2462-1509>, e-mail: Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua

Дослідження алгоритмів керування індивідуальним електроприводом електромобіля потребує використання цілісної імітаційної моделі, у якій узгоджено відтворюються динаміка коліс, рух кузова, перерозподіл реакцій і робота протибуксувального контуру. Метою статті є розроблення та опис модульної імітаційної моделі електромобіля з двоконтурним індивідуальним електроприводом і протибуксувальним керуванням. Для досягнення поставленої мети використано декомпозицію складної динамічної системи на взаємопов'язані підсистеми ведучих і ведених коліс, кузова, шасі та регулятора тягового моменту. Базою для побудови моделі стали рівняння позовжньої динаміки колеса, емпірична залежність між коефіцієнтом зчеплення та буксуванням, рівняння плоского руху кузова автомобіля та правила формування обмежувальної моментної дії в контурі протибуксувального руху. У результаті сформовано дворовісну модульну структуру моделі, що включає підсистеми динаміки передніх ведучих і задніх ведених коліс, підсистему плоского руху кузова, підсистему динамічного перерозподілу нормальних і бокових реакцій та підсистему регулювання крутних моментів передніх коліс. Визначено склад вхідних і вихідних сигналів модулів, описано їх інформаційні зв'язки та забезпечено можливість моделювання руху зі змінною швидкістю, в дорожньому циклі, на ухилі, за різних типів дорожнього покриття та в режимах ковзання і буксування. Наукова новизна роботи полягає у формалізації програмно інтегрованої модульної структури імітаційної моделі електромобіля, у якій підсистеми динаміки коліс, кузова, шасі та протибуксувального керування узгоджені через визначені сигнальні зв'язки. Практична цінність полягає у можливості використання розробленої моделі як базової платформи для налагодження, верифікації та порівняння алгоритмів керування індивідуальним електроприводом до переходу до віртуально-фізичних і стендових випробувань.

Ключові слова: електромобіль; протибуксувальне керування; коефіцієнт буксування; імітаційна модель; позовжня динаміка; керування тяговим моментом; індивідуальний привід коліс.

Постановка проблеми

Для дослідження алгоритмів керування індивідуальним електроприводом електромобіля необхідна цілісна імітаційна модель, у якій узгоджено відтворюються динаміка ведучих і ведених коліс, плоский рух кузова, динамічний перерозподіл нормальних і бокових реакцій, а також робота протибуксувального контуру керування. У практичних задачах недостатньо ізольовано розглядати лише рівняння окремого колеса, кузова або регулятора, оскільки реальна поведінка транспортного засобу визначається їхньою взаємодією в єдиному обчислювальному середовищі. Особливої актуальності це набуває під час аналізу руху за змінних дорожніх умов, у режимах розгону, руху по ухилу, в дорожніх циклах, а також у випадках ковзання і буксування ведучих коліс. За таких умов науково-практичну проблему становить побудова модульної імітаційної моделі електромобіля, придатної для відтворення типових і граничних режимів руху та для подальшого налагодження, верифікації й порівняння алгоритмів керування індивідуальним електроприводом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Фундаментальні засади моделювання динаміки автомобіля, властивостей шин і взаємодії колеса з

опорною поверхнею викладено у класичних працях, присвячених динаміці транспортних засобів і процесам кочення еластичного колеса [1-4]. Ці джерела формують теоретичну основу для опису позовжньої динаміки коліс, реакцій у плямі контакту, впливу вертикального навантаження та параметрів руху автомобіля на реалізацію тягових і гальмівних режимів.

Подальший розвиток досліджень пов'язаний із моделями електромобілів з індивідуальним або розподіленим приводом коліс, для яких важливими є не лише властивості шини, а й координація моментів окремих електроприводів, перерозподіл реакцій між колесами та інтеграція контурів керування рухом у єдину систему [5]. У таких роботах показано, що ефективність і стійкість електромобіля значною мірою залежать від якості узгодження між підсистемами динаміки коліс, кузова та алгоритмами керування тяговим моментом.

Окремий напрям становлять праці, присвячені протибуксувальному керуванню та регулюванню крутного моменту в електромобілях. У них розглядаються підходи до traction control, адаптивного обмеження моменту, ковзного режиму, модельно-прогнозного керування та інтегрованого керування стійкістю електромобіля [6-10]. Ці дослідження підтверджують, що обмеження буксування ведучих коліс є однією з

ключових умов підвищення ефективності реалізації тягових властивостей електромобіля, особливо за змінних дорожніх умов.

Суттєва увага в сучасних роботах приділяється також задачам оцінювання коефіцієнта буксування та коефіцієнта зчеплення шини з дорогою. Для цього застосовуються оцінювачі на основі моменту та кутової швидкості колеса, UKF-підходи, моделі оцінювання дорожнього коефіцієнта зчеплення та адаптивні алгоритми, орієнтовані на електромобілі з розподіленим приводом [11-15]. Саме ці дослідження є особливо важливими для побудови достовірних імітаційних моделей, у яких необхідно не лише відтворити динамічні процеси, а й забезпечити коректну взаємодію між математичним описом об'єкта та логікою системи керування.

Разом із тим аналіз наявних публікацій показує, що в більшості з них основну увагу зосереджено або на окремих математичних моделях динаміки колеса і кузова, або на синтезі алгоритмів протибуксувального керування. Питання ж програмної інтеграції цих підходів у єдину модульну дворівневу імітаційну структуру, придатну для відтворення дорожніх сценаріїв, кочання, буксування, руху на ухилі та в циклічних режимах, висвітлено недостатньо. Саме ця обставина визначає доцільність розроблення модульної імітаційної моделі електромобіля з протибуксувальним керуванням як основи для подальшого дослідження алгоритмів індивідуального електроприводу.

Мета статті

Метою статті є розроблення та опис модульної імітаційної моделі електромобіля з двоконтурним індивідуальним електроприводом і протибуксувальним керуванням, придатної для відтворення типових і граничних режимів руху за змінних умов зчеплення.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є процеси функціонування електромобіля з двоконтурним індивідуальним електроприводом у тяговому режимі за змінних умов зчеплення коліс із дорожнім покриттям. Предметом дослідження є модульна імітаційна модель електромобіля та сигнальні зв'язки між її підсистемами, що забезпечують відтворення динаміки руху та роботи протибуксувального контуру керування.

Реалізацію моделі виконано в середовищі MATLAB/Simulink із використанням дворівневого принципу побудови. Методологічною основою дослідження є декомпозиція складної динамічної системи на взаємопов'язані функціональні підсистеми, кожна з яких відповідає окремому фізичному елементу або процесу в структурі електромобіля [1-5]. До складу моделі входять підсистеми динаміки лівого і правого ведучих коліс передньої осі, підсистеми динаміки лівого і правого ведених коліс задньої осі, підсистема плоского руху кузова, підсистема динамічного

перерозподілу нормальних і бокових реакцій та підсистема протибуксувального регулювання крутних моментів передніх коліс.

При побудові моделі використано рівняння позовжньої динаміки колеса, співвідношення для визначення коефіцієнта буксування, емпіричну залежність між коефіцієнтом зчеплення та буксуванням, а також рівняння плоского руху кузова автомобіля [1-4], [13-15]. Для організації взаємодії між модулями визначено склад вхідних і вихідних сигналів кожної підсистеми та реалізовано їх обмін у межах єдиного обчислювального середовища. Окремо передбачено контур формування моментних команд для передніх ведучих коліс на основі аналізу кутових швидкостей коліс.

Запропонована модель придатна для дослідження руху зі змінною швидкістю, у дорожньому циклі, по ухилу, на покриттях із різними зчепними властивостями, а також у режимах кочання і буксування. Така побудова забезпечує можливість подальшої верифікації окремих підсистем і порівняння алгоритмів керування без перебудови загальної структури моделі.

Виклад основного матеріалу

Реалізацію імітаційної моделі електромобіля виконано за дворівневим принципом, що забезпечує розділення загальної структури системи та внутрішньої логіки окремих функціональних модулів. Такий підхід дозволяє зберегти наочність моделі на верхньому рівні, спростити налагодження окремих підсистем і забезпечити можливість подальшої модифікації алгоритмів керування без зміни всієї обчислювальної схеми. Для дослідження процесів руху електромобіля в моделі узгоджено відтворюються динаміка ведучих і ведених коліс, плоский рух кузова, перерозподіл нормальних і бокових реакцій та формування крутних моментів у контурі протибуксувального керування [1-5], [13-15].

На верхньому рівні моделі розміщено основні функціональні підсистеми, що відповідають окремим фізичним компонентам електромобіля та елементам системи керування. До складу моделі входять підсистеми динаміки лівого і правого ведучих коліс передньої осі Rx11 і Rx12, підсистеми динаміки лівого і правого ведених коліс задньої осі Rx21 і Rx22, підсистема плоского руху кузова BODY, підсистема динамічного перерозподілу нормальних і бокових реакцій CHASSIS та підсистема протибуксувального регулювання крутних моментів передніх коліс «ASR system front wheels». Така структура відображає прийнятну декомпозицію моделі та забезпечує організацію обміну сигналами між колесами, кузовом, шасі та контуром керування.

Функціональна взаємодія підсистем верхнього рівня побудована таким чином, щоб у кожному такті моделювання враховувалися поточні значення швидкостей коліс, позовжнього та поперечного прискорень кузова, нормальних і бокових реакцій, а також моментних команд, що формуються в контурі

протибуксувального керування. Підсистеми коліс передають до кузова й шасі інформацію про реакції в зоні контакту, а підсистеми BODY та CHASSIS формують сигнали, необхідні для уточнення поточного навантаження на кожне колесо. Підсистема «ASR system front wheels» використовує сигнали кутових швидкостей коліс для формування керувальних впливів на передні

ведучі колеса. Завдяки цьому на верхньому рівні моделі забезпечується замкнений контур взаємодії між механічною частиною електромобіля та алгоритмом керування.

Загальний вигляд верхнього рівня модульної імітаційної моделі електромобіля в середовищі MATLAB/Simulink наведено на рис. 1.

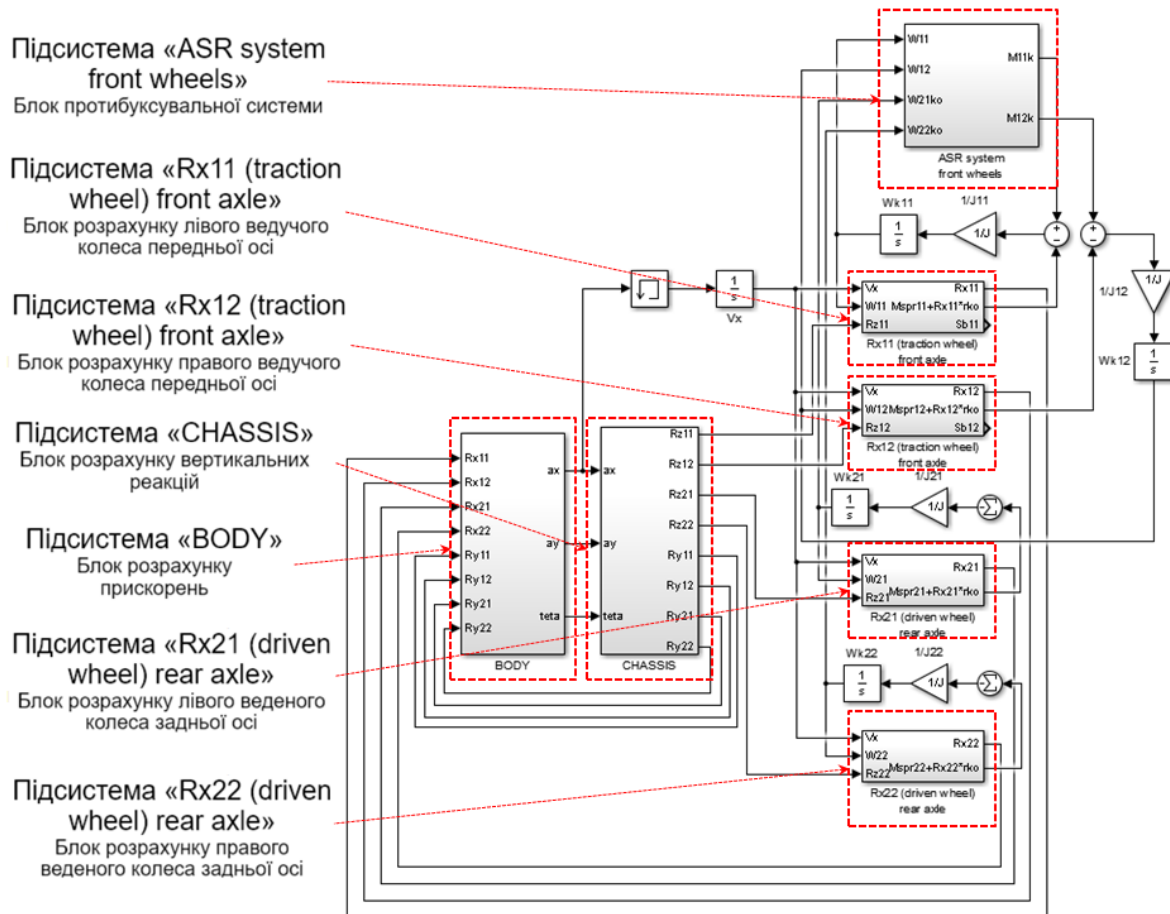


Рис. 1 – Верхній рівень модульної імітаційної моделі електромобіля в середовищі MATLAB/Simulink

Підсистеми Rx11 і Rx12 призначені для відтворення динаміки лівого та правого ведучих коліс передньої осі електромобіля. Кожна з них реалізує розрахунок дотичної реакції в зоні контакту колеса з дорогою, моменту опору коченню, сумарного моментного навантаження на колесо та коефіцієнта буксування. Така побудова дає змогу безпосередньо пов'язати кутову швидкість ведучого колеса, лінійну швидкість автомобіля, поточне вертикальне навантаження та формований крутний момент із процесами реалізації тягового зусилля [1–4], [14], [15].

На входи підсистем Rx11 і Rx12 подаються лінійна швидкість автомобіля V , кутова швидкість відповідного ведучого колеса ω_{11} або ω_{12} , а також нормальна реакція R_{z11} або R_{z12} , що припадає на колесо. На виходах формуються дотична реакція R_{x11} або R_{x12} , сума моменту опору та добутку дотичної реакції на

динамічний радіус кочення, а також коефіцієнт буксування відповідного колеса. Отримані сигнали використовуються для подальшого узгодження з підсистемами кузова, шасі та протибуксувального керування.

Коефіцієнт буксування ведучого колеса визначається співвідношенням

$$s_i = \frac{r_d \omega_i - V}{r_d \omega_i}, \quad (1)$$

де r_d – динамічний радіус колеса; ω_i – кутова швидкість колеса; V – лінійна швидкість автомобіля.

Для опису взаємодії колеса з дорожнім покриттям використовується залежність дотичної реакції від нормального навантаження та коефіцієнта зчеплення

$$R_{xi} = \varphi_i R_{zi}, \quad (2)$$

де φ_i – коефіцієнт зчеплення; R_{zi} – нормальна реакція на i -му колесі.

Коефіцієнт зчеплення в моделі задається як функція коефіцієнта буксування

$$\varphi_i = f(s_i), \quad (3)$$

Момент опору коченню визначається виразом

$$M_{fi} = f_r R_{zi} r_d, \quad (4)$$

де f_r – коефіцієнт опору коченню; r_d – динамічний радіус колеса; R_{zi} – нормальна реакція на i -му колесі.

Рівняння обертального руху ведучого колеса має вигляд

$$J_w \dot{\omega}_i = M_i - R_{xi} r_d - M_{fi}, \quad (5)$$

де J_w – момент інерції колеса; $\dot{\omega}_i$ – кутове прискорення; M_i – крутний момент, підведений до i -го ведучого колеса.

Наведені співвідношення реалізовано в підсистемах нижнього рівня для кожного з передніх ведучих коліс. Завдяки цьому забезпечується відтворення зміни дотичної реакції, навантаження на колесо та коефіцієнта буксування в процесі розгону, руху за змінного коефіцієнта зчеплення та роботи протибуксувального контуру.

Загальний вигляд підсистем динаміки ведучих коліс у середовищі MATLAB/Simulink наведено на рис. 2.

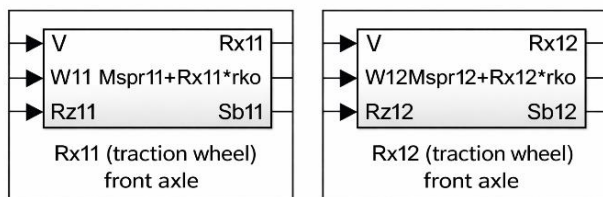


Рис. 2 – Підсистеми динаміки ведучих коліс Rx11 і Rx12 у середовищі MATLAB/Simulink

Підсистеми Rx21 і Rx22 призначені для відтворення динаміки лівого та правого ведених коліс задньої осі електромобіля. На відміну від ведучих коліс, ці підсистеми не формують тягового моменту, а використовуються для визначення реакцій у зоні контакту, моменту опору коченню та опорних параметрів руху, необхідних для узгодження роботи всієї моделі. Саме сигнали від ведених коліс можуть бути використані як опорні при оцінюванні поздовжнього ковзання ведучих коліс у контурі протибуксувального керування [1–4, 11, 15].

На входи підсистем Rx21 і Rx22 подаються лінійна швидкість автомобіля V , кутова швидкість відповідного веденого колеса ω_{21} або ω_{22} , а також нормальна реакція R_{z21} або R_{z22} , що припадає на колесо. На виходах формуються дотична реакція R_{x21} або R_{x22} та сума моменту опору і добутку дотичної реакції на динамічний радіус кочення. Отримані сигнали передаються до інших підсистем моделі та використовуються для узгодження плоского руху кузова, перерозподілу реакцій і формування керувальних впливів у контурі ASR.

Для веденого колеса дотична реакція в зоні контакту також визначається залежністю (2), а момент опору коченню – виразом (4).

Рівняння обертального руху веденого колеса може бути подане у вигляді

$$J_w \dot{\omega}_i = R_{xi} r_d - M_{fi}, \quad (6)$$

де J_w – момент інерції колеса; $\dot{\omega}_i$ – кутове прискорення веденого колеса.

Наведені співвідношення реалізовано в підсистемах нижнього рівня для задніх коліс, що дає змогу відтворювати зміну реакцій у плямі контакту та кутових швидкостей ведених коліс залежно від швидкості руху автомобіля, поточного навантаження і дорожніх умов. Завдяки цьому підсистеми Rx21 і Rx22 виконують не лише функцію динамічного опису задніх коліс, а й роль джерела опорної інформації для інших функціональних блоків моделі.

Загальний вигляд підсистем динаміки ведених коліс у середовищі MATLAB/Simulink наведено на рис. 3.

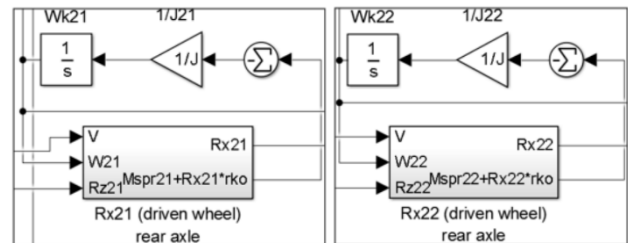


Рис. 3 – Підсистеми динаміки ведених коліс Rx21 і Rx22 у середовищі MATLAB/Simulink

Підсистема BODY призначена для відтворення плоского руху корпусу електромобіля та формування узагальнених кінематичних параметрів, необхідних для узгодження роботи всіх інших модулів моделі. Саме в цій підсистемі на основі реакцій, що надходять від коліс, визначаються поздовжнє і поперечне прискорення кузова, а також координата кута повороту рухомої системи координат, жорстко пов'язаної з автомобілем. Така побудова дає змогу пов'язати процеси, що відбуваються в зоні контакту окремих коліс з дорогою, із загальною динамікою транспортного засобу [1–4].

На входи підсистеми BODY подаються нормальні реакції R_{z11} , R_{z12} , R_{z21} , R_{z22} , а також бокові реакції R_{y11} , R_{y12} , R_{y21} , R_{y22} , що діють на відповідні колеса. На виході формуються поздовжнє прискорення автомобіля a_x , поперечне прискорення a_y та координата кута повороту θ . У межах загальної структури моделі ці сигнали використовуються підсистемою CHASSIS для динамічного перерозподілу навантажень і частково визначають поточні умови реалізації тягового моменту на ведучих колесах.

У спрощеному вигляді поздовжня динаміка кузова описується рівнянням

$$m a_x = \sum R_{xi} - F_{ax} - G_x, \quad (7)$$

де m – маса автомобіля; $\sum R_{xi}$ – сума поздовжніх реакцій коліс; F_{ax} – складова аеродинамічного опору в поздовжньому напрямку; G_x – складова сили ваги, зумовлена поздовжнім нахилом дороги.

Поперечна динаміка кузова може бути подана виразом

$$ma_y = \sum R_{yi} - F_{ay} - G_y, \quad (8)$$

де $\sum R_{yi}$ – сума бокових реакцій коліс; F_{ay} – складова аеродинамічного опору в поперечному напрямку; G_y – складова сили ваги, зумовлена поперечним нахилом дороги.

Для опису кутового руху кузова відносно вертикальної осі використовується рівняння моментів

$$J_z \ddot{\theta} = \sum M_z, \quad (9)$$

де J_z – момент інерції автомобіля відносно вертикальної осі; $\ddot{\theta}$ – кутове прискорення; $\sum M_z$ – сумарний момент сил, прикладених до кузова у площині руху.

Наведені співвідношення в підсистемі BODY реалізуються у вигляді сукупності сигнальних і обчислювальних блоків, що забезпечують узгоджений розрахунок прискорень кузова на кожному кроці моделювання. Це дозволяє враховувати вплив зміни реакцій у плямі контакту коліс, умов руху та дорожнього профілю на динамічний стан автомобіля в цілому. Таким чином, підсистема BODY виконує роль центрального динамічного модуля, який пов'язує локальні процеси взаємодії окремих коліс із загальною кінематикою та динамікою руху електромобіля.

Загальний вигляд підсистеми BODY у середовищі верхнього та нижнього рівнів наведено на рис. 4.

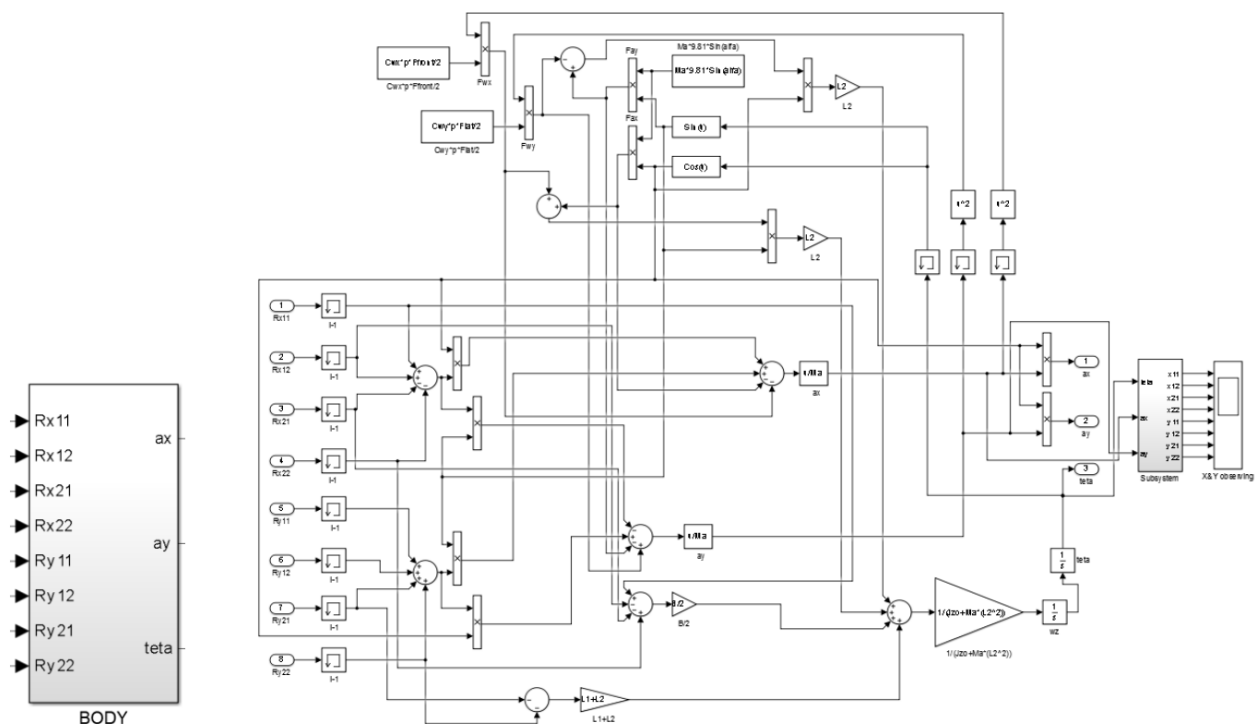


Рис. 4 – Підсистема BODY у середовищі верхнього та нижнього рівнів

Підсистема CHASSIS призначена для динамічного перерозподілу нормальних і бокових реакцій між колесами електромобіля залежно від поточного динамічного стану кузова. Її функціональне призначення полягає в узгодженні поздовжнього та поперечного перенесення навантаження з реакціями в зоні контакту коліс із дорожнім покриттям. Саме через цю підсистему у моделі враховується вплив прискорень кузова та зміни просторового положення автомобіля на величини реакцій, що припадають на кожне колесо [1–5].

На входи підсистеми CHASSIS подаються поздовжнє прискорення автомобіля a_x , поперечне прискорення a_y та координата кута повороту θ , сформовані в

підсистемі BODY. На виходах підсистеми формуються нормальні реакції R_{z11} , R_{z12} , R_{z21} , R_{z22} , а також бокові реакції R_{y11} , R_{y12} , R_{y21} , R_{y22} , які надалі використовуються у підсистемах коліс і кузова. Таким чином, CHASSIS забезпечує сигнальний зв'язок між динамікою кузова та локальними умовами реалізації сил у контакті кожного колеса з дорогою.

У загальному випадку нормальні реакції на колесах визначаються з урахуванням статичного розподілу маси та динамічного перенесення навантаження. У спрощеному вигляді для передньої та задньої осей це може бути подано як

$$R_{zf} = R_{zf0} + \Delta R_x + \Delta R_y, \quad (10)$$

$$R_{zr} = R_{zr0} - \Delta R_x + \Delta R_y, \quad (11)$$

де R_{zr0} і R_{zr0} – статичні нормальні реакції на передній та задній осях; ΔR_x – зміна нормального навантаження, обумовлена поздовжнім прискоренням; ΔR_y – зміна навантаження, обумовлена поперечним прискоренням.

Поздовжнє перенесення навантаження визначається співвідношенням

$$\Delta R_x = \frac{m a_x h_c}{L}, \quad (12)$$

де m – маса автомобіля; h_c – висота центра мас; L – колісна база.

Поперечне перенесення навантаження може бути подане виразом

$$\Delta R_y = \frac{m a_y h_c}{B}, \quad (13)$$

де B – колія автомобіля.

Наведені співвідношення в межах підсистеми CHASSIS використовуються для формування сигналів

поточних реакцій, що припадають на окремі колеса. Завдяки цьому модель враховує, що під час розгону, уповільнення або зміни напрямку руху умови контакту різних коліс із дорогою не залишаються сталими. Це має принципове значення для оцінювання можливості реалізації тягового моменту на ведучих колесах, оскільки саме нормальна реакція визначає допустимий рівень дотичної сили в контакті.

Отже, підсистема CHASSIS виконує роль проміжного динамічного модуля, який перетворює інтегральні параметри руху кузова на локальні навантаження окремих коліс. Її наявність у структурі моделі забезпечує більш адекватне відтворення процесів взаємодії електромобіля з дорожнім покриттям у режимах зі змінним поздовжнім і поперечним навантаженням.

Загальний вигляд підсистеми CHASSIS у середовищі верхнього та нижнього рівнів наведено на рис. 5.

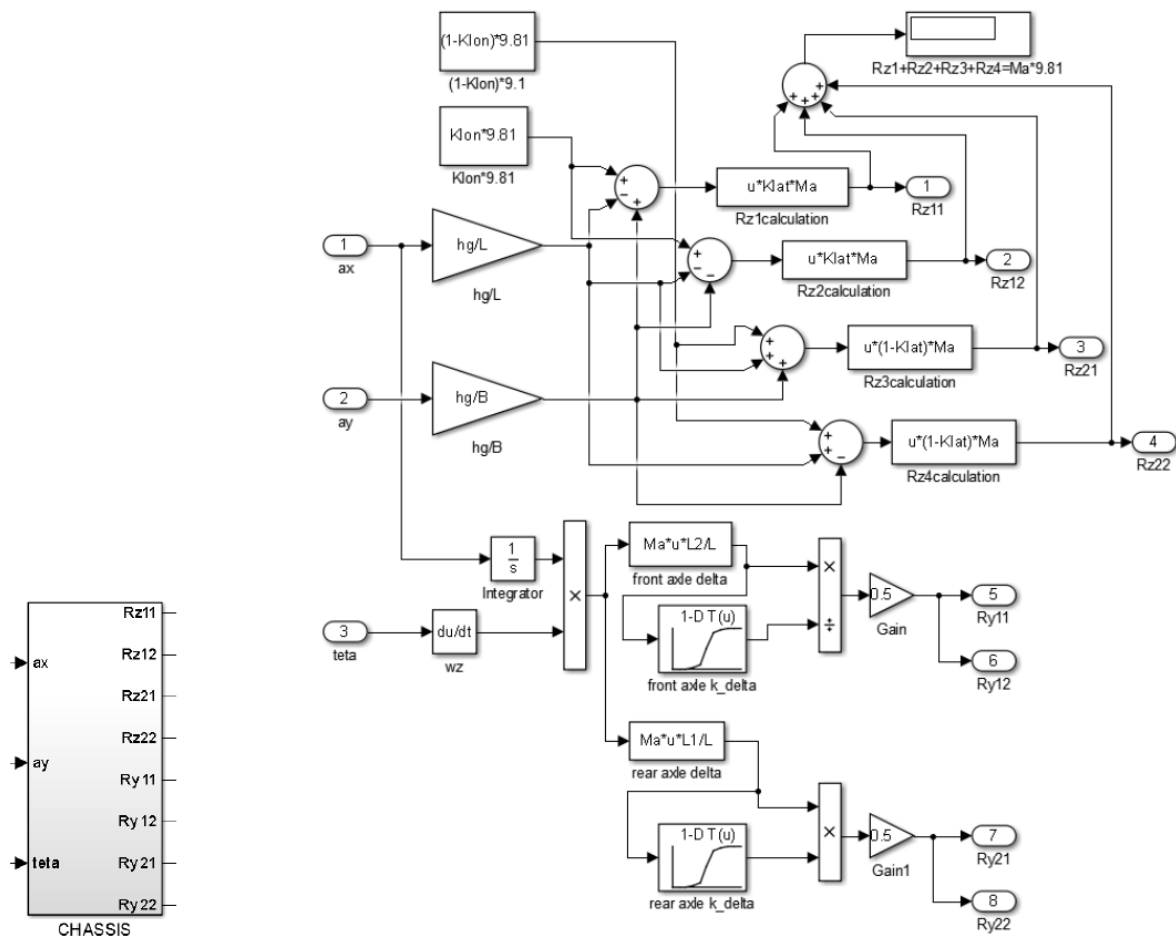


Рис. 5 – Підсистема CHASSIS для динамічного перерозподілу нормальних і бокових реакцій

Підсистема «ASR system front wheels» призначена для формування керувальних моментних впливів на передні ведучі колеса з метою обмеження позитивного поздовжнього ковзання та стабілізації тягового

режиму електромобіля. На відміну від підсистем BODY і CHASSIS, що описують динамічний стан об'єкта, цей модуль реалізує алгоритмічну частину моделі, тобто безпосередньо формує сигнали керування

електроприводами передніх коліс. Наявність окремої підсистеми протибуксувального регулювання дає змогу змінювати або вдосконалювати закон керування без перебудови всієї структури моделі, що є важливою перевагою модульного підходу [6–10], [14], [15].

На входи підсистеми «ASR system front wheels» подаються кутові швидкості передніх ведучих коліс ω_{11} , ω_{12} і задніх ведених коліс ω_{21} , ω_{22} . На її виходах формуються моментні команди M_{11k} і M_{12k} , які надалі подаються на відповідні підсистеми ведучих коліс Rx11 і Rx12. Структурно підсистема містить два однотипні модулі нижнього рівня – ASR11 і ASR12, кожен з яких реалізує формування керувального впливу для відповідного переднього колеса.

У межах прийнятої структури моделі швидкості ведених коліс використовуються як опорні сигнали для оцінювання поздовжнього ковзання ведучих коліс. Середня опорна кутова швидкість може бути визначена як

$$\omega_{ref} = \frac{\omega_{21} + \omega_{22}}{2}, \quad (14)$$

де ω_{21} та ω_{22} – кутові швидкості задніх ведених коліс.

На цій основі сигнал ковзання для кожного переднього ведучого колеса подається у вигляді

$$\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_{ref}, \quad (15)$$

де ω_i – кутова швидкість відповідного ведучого колеса; $\Delta\omega_i$ – відхилення від опорного значення.

У більш загальному вигляді коефіцієнт буксування, який використовується для формування коригувальної дії, може бути визначений співвідношенням

$$s_i = \frac{r_d \omega_i - r_d \omega_{ref}}{r_d \omega_i}, \quad (16)$$

де r_d – динамічний радіус колеса.

Формування моментної команди в підсистемах ASR11 і ASR12 здійснюється відповідно до закону обмеження або корекції тягового моменту залежно від поточного рівня ковзання. У загальному вигляді це можна подати як

$$M_{ik} = f(s_i, \omega_i, \omega_{ref}). \quad (17)$$

Конкретна реалізація цієї залежності визначається внутрішньою логікою підсистем нижнього рівня та може бути змінена без порушення загальної архітектури моделі.

Такий підхід забезпечує симетричне регулювання лівого і правого передніх коліс, дозволяє використовувати інформацію про швидкості задніх коліс як опорну базу для оцінювання буксування та створює умови для подальшого порівняння різних алгоритмів формування моментних команд. Завдяки цьому підсистема «ASR system front wheels» виконує ключову функцію в моделі, замикаючи контур взаємодії між динамікою об'єкта та алгоритмом керування.

Загальний вигляд підсистеми «ASR system front wheels» у середовищі верхнього та нижнього рівнів наведено на рис. 6, а структура підсистеми нижнього рівня ASR11 (ASR12) – на рис. 7.

Запропонована модульна структура імітаційної моделі не обмежується відтворенням окремого режиму прямолінійного розгону. Завдяки зміні початкових умов, параметрів дорожнього покриття та конфігурації функціональних блоків модель придатна для дослідження руху зі змінною швидкістю, в типовому дорожньому циклі, по ухилу, а також за різних зчепних властивостей опорної поверхні. Окремо може бути реалізоване моделювання режимів позитивного поздовжнього ковзання і буксування ведучих коліс, що є принципово важливим для налагодження та оцінювання ефективності підсистеми «ASR system front wheels» [5], [14], [15].

Суттєвою перевагою побудованої моделі є можливість варіювання умов контакту для окремих коліс, що дозволяє відтворювати не лише симетричні, а й асиметричні дорожні сценарії. У таких умовах стає можливим аналіз впливу нерівномірного коефіцієнта зчеплення на перерозподіл реакцій, величину коефіцієнта буксування та характер формування крутних моментів на лівому і правому ведучих колесах. Це розширює дослідницькі можливості моделі та робить її придатною для порівняння різних стратегій керування індивідуальним електроприводом [6–11].

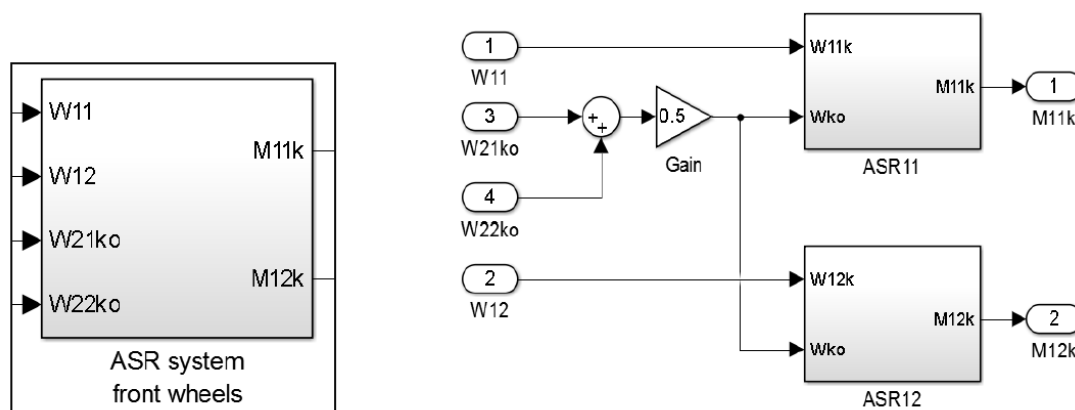


Рис. 6 – Підсистема «ASR system front wheels» у середовищі верхнього та нижнього рівнів

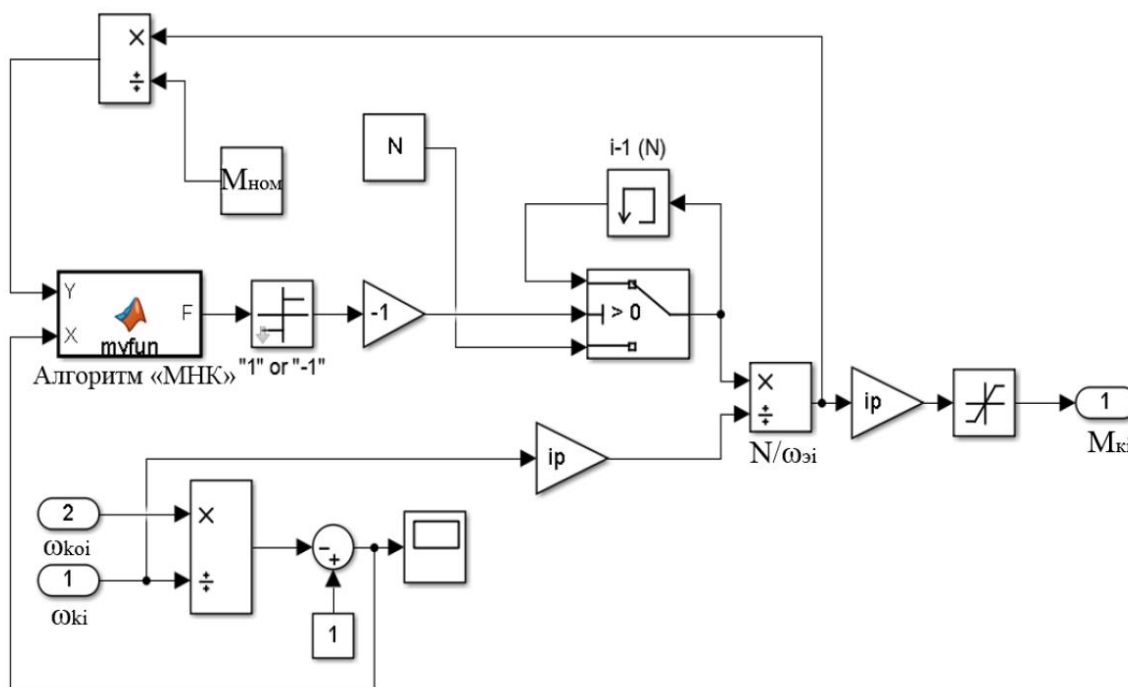


Рис. 7 – Підсистема нижнього рівня ASR11 (ASR12) для стабілізації позитивних поздовжніх ковзань

Модульна організація моделі є зручною також з позицій подальшої верифікації. Кожна підсистема може бути протестована окремо, а в подальшому, за потреби, спрощені математичні описи можуть бути замінені деталізованими моделями шини, електромашини або силової електроніки без порушення загальної архітектури обчислювальної схеми. Таким чином, розроблена структура може розглядатися як базова програмна платформа для дослідження, налагодження та порівняльної оцінки алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом електромобіля.

Результати та їх обговорення

У результаті проведеної роботи сформовано дворівневу модульну імітаційну модель електромобіля, у якій узгоджено підсистеми динаміки ведучих і ведених коліс, плоского руху кузова, динамічного перерозподілу реакцій і протибуксувального регулювання крутних моментів. На відміну від підходів, у яких окремо розглядаються лише математична модель колеса, модель кузова або алгоритм тягового керування, запропонована структура забезпечує їх спільне функціонування в єдиному обчислювальному середовищі та дозволяє досліджувати взаємний вплив цих підсистем у процесі руху електромобіля [5, 10, 13-15].

Отримана модель забезпечує можливість відтворення типових і граничних режимів руху за змінних дорожніх умов, що підтверджує її придатність для подальшого використання як інструмента налагодження та перевірки алгоритмів керування. Практичне значення такого підходу полягає в тому, що він дозволяє

перейти від ізольованого аналізу окремих динамічних процесів до комплексного дослідження взаємодії між об'єктом керування та контуром ASR. Це створює передумови для подальшого порівняння різних законів формування моментних команд, а також для інтеграції моделі у віртуально-фізичні та стендові випробування.

Для перевірки працездатності розробленої модульної імітаційної моделі було проведено віртуальні випробування в середовищі MATLAB/Simulink з порівнянням п'яти алгоритмів керування індивідуальним електроприводом. Як оціночний критерій використано сумарний середній ККД колеса в тяговому режимі за цикл. Порівняння алгоритмів виконувалося у віртуальних випробуваннях у типовому міському дорожньому циклі в комбінації з імовірнісним розподілом типів дорожніх покриттів.

За результатами моделювання найвищу ефективність показав адаптивний алгоритм регулювання крутних моментів, для якого середнє значення $\eta_{\Sigma k}$ становило 0,96, тоді як для алгоритму за принципом вільного симетричного диференціала, алгоритмів за принципом диференціала підвищеного тертя з постійним і змінним тертям та алгоритму індивідуального регулювання за зчіпними властивостями отримано відповідно 0,79, 0,90, 0,90 і 0,85.

Висновки

У статті розроблено та описано модульну імітаційну модель електромобіля з двоконтурним індивідуальним електроприводом і протибуксувальним керуванням, реалізовану за дворівневим принципом у середовищі MATLAB/Simulink.

Визначено склад, функціональне призначення та сигнальні зв'язки підсистем верхнього і нижнього рівнів, зокрема модулів динаміки ведучих і ведених коліс, плоского руху кузова, динамічного перерозподілу нормальних і бокових реакцій та формування моментних команд у контурі ASR, що забезпечує узгоджену взаємодію між динамікою коліс, кузова, шасі та алгоритмом протибуксувального керування в межах єдиного обчислювального середовища.

Практичну цінність одержаних результатів підтверджено результатами віртуального моделювання, які показали придатність розробленої моделі до порівняльної оцінки алгоритмів керування індивідуальним електроприводом, причому найвищу ефективність продемонстрував адаптивний алгоритм регулювання крутних моментів, для якого середнє значення $\eta_{\Sigma k}$ становило 0,96.

Перелік використаних джерел

- [1] Pacejka H. B. *Tire and Vehicle Dynamics*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. 632 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-68548-8>.
- [2] Gillespie T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Revised ed. Warrendale, PA: SAE International, 2021. 512 p. DOI: <https://doi.org/10.4271/R-506>.
- [3] Rajamani R. *Vehicle Dynamics and Control*. 2nd ed. New York: Springer, 2012. 498 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>.
- [4] Wong J. Y. *Theory of Ground Vehicles*. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2022. 560 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119719984>.
- [5] Zhang X. *Modeling and Dynamics Control for Distributed Drive Electric Vehicles*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. 208 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32213-7>.
- [6] Fujimoto H., Amada J., Maeda K. Review of traction and braking control for electric vehicle. 2012 *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seoul, Korea, 09-12 October 2012. Pp. 1292–1299. DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2012.6422491>.
- [7] Hu J.-S., Yin D., Hori Y. Fault-tolerant traction control of electric vehicles. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19, no. 2. Pp. 204–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.11.012>.
- [8] Electric vehicle traction control: A new MTTE methodology / Hu J.-S., Yin D., Hori Y., Hu F.-R. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2012. Vol. 18, no. 2. Pp. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIAS.2011.2175519>.
- [9] de Castro R., Araújo R. E., Freitas D. Wheel slip control of EVs based on sliding mode technique with conditional integrators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 60, no. 8. Pp. 3256–3271. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2202357>.
- [10] Integrated stability and traction control for electric vehicles using model predictive control / Jalali M., Khajepour A., Chen S.-K., Litkouhi B. *Control Engineering Practice*. 2016. Vol. 54. Pp. 256–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.06.005>.
- [11] Boisvert M., Micheau P. Estimators of wheel slip for electric vehicles using torque and encoder measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 76–77. Pp. 665–676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.02.017>.
- [12] Heidfeld H., Schünemann M., Kasper R. UKF-based state and tire slip estimation for a 4WD electric vehicle. *Vehicle System Dynamics*. 2020. Vol. 58, no. 10. Pp. 1479–1496. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1648836>.
- [13] Tire Road Friction Coefficient Estimation: Review and Research Perspectives / Y. Wang et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 35. Article 6. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00675-z>.
- [14] Slip Ratio Adaptive Control Based on Wheel Angular Velocity for Distributed Drive Electric Vehicles / Kang S., Chen J., Qiu G., Tong H. *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14, no. 5. Article 119. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj14050119>.
- [15] Acceleration-based wheel slip control realized with decentralised electric drivetrain systems / Jiang B., Sharma N., Liu Y., Li C. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2022. Vol. 12, no. 2. Pp. 143–152. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12044>.

MODULAR SIMULATION MODEL OF AN ELECTRIC VEHICLE WITH TRACTION CONTROL

- | | |
|------------------------|---|
| Nesterenko O.H. | postgraduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0226-1153 , e-mail: Oleksandr.Nesterenko@ieee.khpi.edu.ua ; |
| Kunchenko T.Yu. | PhD (Engineering), associate professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2462-1509 , e-mail: Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua |

The study of control algorithms for an individual electric drive of an electric vehicle requires the use of an integrated simulation model in which wheel dynamics, body motion, reaction redistribution, and traction-control operation are

reproduced in a coordinated manner. The purpose of the paper is to develop and describe a modular simulation model of an electric vehicle with a two-channel individual electric drive and traction control. To achieve this purpose, decomposition of a complex dynamic system into interconnected subsystems of driving and driven wheels, vehicle body, chassis, and traction-torque controller has been used. The model is based on longitudinal wheel dynamics equations, an empirical relationship between the adhesion coefficient and slip ratio, planar body-motion equations, and a torque-limiting control rule in the traction-control loop. As a result, a two-level modular structure of the model has been formed, including subsystems of the front driving wheels and rear driven wheels, a subsystem of planar body motion, a subsystem of dynamic redistribution of normal and lateral reactions, and a subsystem of front-wheel torque control. The composition of input and output signals of the modules has been defined, their information links have been described, and the possibility of simulating variable-speed motion, drive-cycle operation, slope driving, different road-surface conditions, as well as slip and spin modes has been ensured. The scientific novelty of the work lies in the formalization of a software-integrated modular structure of an electric-vehicle simulation model in which wheel, body, chassis, and traction-control subsystems are coordinated through explicitly defined signal links. The practical value lies in the possibility of using the developed model as a basic platform for tuning, verification, and comparative assessment of individual electric-drive control algorithms before virtual-physical and bench testing.

Keywords: electric vehicle; traction control; slip ratio; simulation model; longitudinal dynamics; traction torque control; independent wheel drive.

References

- [1] H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2012. doi: **10.1016/C2010-0-68548-8**.
- [2] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Revised ed. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2021. doi: **10.4271/R-506**.
- [3] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2012. doi: **10.1007/978-1-4614-1433-9**.
- [4] J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2022. doi: **10.1002/9781119719984**.
- [5] X. Zhang, *Modeling and Dynamics Control for Distributed Drive Electric Vehicles*. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg, 2021. doi: **10.1007/978-3-658-32213-7**.
- [6] H. Fujimoto, J. Amada, and K. Maeda, "Review of traction and braking control for electric vehicle," in *Proc. of the 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seoul, South Korea, October 09-12, 2012, pp. 1292-1299. doi: **10.1109/VPPC.2012.6422491**.
- [7] J.-S. Hu, D. Yin, and Y. Hori, "Fault-tolerant traction control of electric vehicles," *Control Engineering Practice*, vol. 19, no. 2, pp. 204-213, 2011. doi: **10.1016/j.conengprac.2010.11.012**.
- [8] J.-S. Hu, D. Yin, Y. Hori, and F.-R. Hu, "Electric vehicle traction control: A new MTTE methodology," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 18, no. 2, pp. 23-31, 2012. doi: **10.1109/MIAS.2011.2175519**.
- [9] R. de Castro, R. E. Araújo, and D. Freitas, "Wheel slip control of EVs based on sliding mode technique with conditional integrators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 8, pp. 3256-3271, 2013. doi: **10.1109/TIE.2012.2202357**.
- [10] M. Jalali, A. Khajepour, S.-K. Chen, and B. Litkouhi, "Integrated stability and traction control for electric vehicles using model predictive control," *Control Engineering Practice*, vol. 54, pp. 256-266, 2016. doi: **10.1016/j.conengprac.2016.06.005**.
- [11] M. Boisvert, and P. Micheau, "Estimators of wheel slip for electric vehicles using torque and encoder measurements," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vols. 76-77, pp. 665-676, 2016. doi: **10.1016/j.ymssp.2016.02.017**.
- [12] H. Heidfeld, M. Schünemann, and R. Kasper, "UKF-based state and tire slip estimation for a 4WD electric vehicle," *Vehicle System Dynamics*, vol. 58, no. 10, pp. 1479-1496, 2020. doi: **10.1080/00423114.2019.1648836**.
- [13] Y. Wang et al, "Tire road friction coefficient estimation: Review and research perspectives," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, article 6, 2022. doi: **10.1186/s10033-021-00675-z**.
- [14] S. Kang, J. Chen, G. Qiu, and H. Tong, "Slip ratio adaptive control based on wheel angular velocity for distributed drive electric vehicles," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 14, no. 5, article 119, 2023. doi: **10.3390/wevj14050119**.
- [15] B. Jiang, N. Sharma, Y. Liu, and C. Li, "Acceleration-based wheel slip control realized with decentralised electric drivetrain systems," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 12, no. 2, pp. 143-152, 2022. doi: **10.1049/els2.12044**.

Стаття надійшла 25.12.2025

Стаття прийнята 28.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Нестеренко О. Г., Кунченко Т. Ю. Модульна імітаційна модель електромобіля з протибуксувальним керуванням. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359912>.

УДК 681.5.015:622.271.4

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359913

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОЧОГО ЦИКЛУ КАР'ЄРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ

Сергієнко С.А.

канд. техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3977-5239>, e-mail: serhiy.serhiyenko@gmail.com;

Онищенко А.О.

викладач вищої категорії, Відокремлений структурний підрозділ «Фаховий коледж Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3793-331X>, e-mail: onishchenko@kkrnu.ukr.edu

Виконано систематизований аналіз наукових публікацій 2016–2025 рр., присвячених оптимізації робочого циклу екскавації кар'єрних екскаваторів типу пряма лопата та драглайн. Методи оптимізації систематизовано у шість основних груп: оператор-орієнтовані методи керування; оптимальне керування і багатокритеріальна оптимізація траєкторії; онлайн-адаптивне траєкторне планування; перцептивно-автономні методи екскавації; робастне траєкторне керування з компенсацією збурень; енергооптимізація циклу екскавації. Окремо розглянуто напрями цифрових двійників, симуляційних методів та нейромережевого керування. Показано, що переважна більшість методів розроблена для гідравлічних маніпуляторних систем і потребує суттєвої адаптації для канатних електромеханічних екскаваторів типу пряма лопата та драглайн з урахуванням іншої кінематичної структури, значно більших рівнів потужності та специфічної динаміки канатної системи. Встановлено, що дослідження в напрямі вибору критерію оптимізації робочого циклу залишаються актуальними. Визначено три напрями подальших досліджень: розробка багатопараметричного критерію оптимізації, що враховує час, енергію, вплив на стан обладнання та операційну продуктивність; розробка спостерігача рівня завантаження ковша в режимі реального часу; верифікація запропонованих рішень на електромеханічній системі екскаваторів типу пряма лопата та драглайн.

Ключові слова: кар'єрний екскаватор; пряма лопата; драглайн; оптимізація робочого циклу; траєкторне планування; енергоефективність електроприводу; прогнозне регулювання; цифровий двійник.

Постановка проблеми

У сучасних умовах зростання вартості енергоносіїв, посилення вимог до ресурсозбереження та підвищення конкуренції в гірничодобувній галузі особливої ваги набуває задача скорочення тривалості робочого циклу екскавації при одночасному зменшенні енергоспоживання та втрат у електроприводах. Кар'єрні екскаватори типу пряма лопата та драглайн є базовими засобами виїмки й навантаження гірничої маси у відкритих гірничих роботах. Ефективність їх експлуатації безпосередньо визначає продуктивність кар'єру, собівартість видобутку та енергетичне навантаження на систему електропостачання підприємства.

Робочий цикл екскавації включає послідовність взаємопов'язаних операцій: відрив ковша з породою, підйом, поворот платформи до місця розвантаження, розвантаження в кузов самоскида або на відвал і повернення робочого органу в точку черпання. Для екскаватора за схемою прямої лопати (зокрема ЕКГ-8І, 10І тощо) вирішальне значення має узгоджена робота приводів підйому та повороту, які формують просторову траєкторію руху ковша. Для драглайна додатковою складністю є коливальна динаміка канатної системи, що обмежує допустимі прискорення та вимагає стабілізації ковша перед розвантаженням. В обох випадках якість траєкторії визначає не лише швидкість, а й енергетичну ефективність, рівень пікових навантажень, величину втрат у приводах, а також технологічну надійність: уникнення розсипу породи, ударних режимів,

небезпечних зближень з кузовом самоскида чи елементами конструкції.

Важливою особливістю реальної експлуатації є змінність навантаження: маса породи в ковші змінюється від циклу до циклу внаслідок неоднорідності забою, різної щільності матеріалу та особливостей копання. Це призводить до зміни інерційних характеристик системи та формує вимоги до моментів і потужностей електроприводів, режимів розгону та гальмування, а отже – до зростання варіативності часу циклу й енерговитрат. Традиційні підходи, що спираються на фіксовані типові траєкторії або операторський досвід, не гарантують оптимальних показників у широкому діапазоні завантаження ковша та умов роботи. Тому актуальним є розроблення науково обґрунтованої методики оптимізації просторової траєкторії руху ковша та узгодження законів керування приводами підйому й повороту з урахуванням обмежень електромеханічної системи, технологічних вимог і змінної маси вантажу.

Дослідження, спрямоване на синтез оптимальних (у сенсі швидкодії та/або енергоефективності) тривимірних траєкторій робочого циклу екскавації та формування критеріїв їх обґрунтування, є своєчасним і практично значущим.

Тому набуває необхідності проведення системного аналізу сучасних літературних джерел з проблеми оптимізації циклу екскавації. Останні роки характеризуються швидким розвитком методів багатокритеріальної оптимізації (час – енергія – ударні навантаження), онлайн-адаптації траєкторій до змінного

заповнення ковша та інтеграції сенсорного сприйняття (sensor perception) і робастного керування (robust control). Узагальнення цих результатів є передумовою коректної постановки задачі, вибору метрик валідації та обґрунтування практичної придатності запропонованих рішень.

У розрізі зазначених питань в роботі надається чітке формулювання наукової та практичної складових проблеми, що розглядається, та обґрунтування її актуальності в сучасних умовах. Визначається предмет дослідження та окреслюються його основні складові.

Мета статті

Метою роботи є проведення систематизованого аналізу сучасних наукових публікацій, присвячених оптимізації робочого циклу екскаваторів кар'єрних екскаваторів типу пряма лопата та драглайн.

Виклад основного матеріалу

Методи оптимізації робочого циклу екскаваторів за період 2016–2025 рр. систематизовано у шість основних груп.

«Оператор-орієнтовані методи керування».

У роботі [1] на основі даних роботи драглайна показано, що операторська техніка суттєво змінює компоненти операційного циклу екскаватора – копання, вивантаження, повернення (dig/swing/return) – а отже й загальну продуктивність. Запропонована схема: декомпозиція циклу, статистика по компонентах, виявлення «вузьких місць» і формування найкращих практик (best practice) як базової лінії порівняння. Показано, що оптимізація траєкторії без урахування «людського» критерію може виглядати переконливою в моделі, але програвати добре навченому оператору або бути нестійкою до змін забою.

Робота [2] будує аналітичну модель оцінювання енергоефективності циклу екскаватора типу пряма лопата на основі часових компонентів та виміряної потужності і показує, що енерговитрати нерівномірні по фазах циклу – вони зосереджуються в окремих операціях. Це відкриває шлях до оптимізації не лише траєкторії, а й узгодження фаз та зниження піків навантаження. Метрики порівняння (кВт·год/цикл, кВт·год/тонну) та потенціал економії у відсотках дозволяють порівнювати сценарії у нормованому вигляді. Робота [3] додає ще один пласт: вимірювання ефекту допоміжної й автономної стратегій на реальній продуктивності, що задає прийнятний формат порівняння для гірничої техніки на статистиці циклів за різних умов навантаження й забою.

«Оптимальне керування і багатокритеріальна оптимізація траєкторії (Pareto)».

Роботи [4–8] присвячені формулюванню задачі оптимального керування з жорсткими обмеженнями (кінематика, межі приводів, безпека, технологічні умови) і вибору цільових функцій. У [4] розглянуто екскаватор за схемою прямої лопати і показано, що

траєкторне планування може мінімізувати вхідну енергію процесу, зберігаючи потрібні технологічні показники – наповнення ковша та придатність для різних профілів забою. Акцент зроблено не на геометрії траєкторії, а на енергетичній функції цілі, що враховує реальні силові й потужнісні режими приводів.

Робота [5] є показовою для сучасного тренду: вводиться триєдина функція цілі час – енергія – ударні навантаження (time–energy–impact), де ударні навантаження є показником зносу та ризику. Пропонований метод генерує траєкторії, що одночасно скорочують час, енергію й операційний вплив на стан обладнання. Для реального екскаватора це принципово: оптимізація лише за швидкодією може вимагати надмірних ударів, коливання платформи й розсип породи. Таким чином, [5] формує правильний критерій оптимальності: не мінімум часу, а мінімум часу за умови контрольованої енергії і «м'якості» руху.

Роботи групи [6–8] направлені на розв'язання задачі оптимізації чисельно та отримання траєкторії, придатної для реального відстеження приводами без автоколивань. При цьому пропонується використовувати псевдоспектральні методи (pseudospectral methods), гладкі представлення траєкторій, оптимізацію ривка.

Для вибору критерію оптимальності у подібних задачах важливим теоретичним підґрунтям є робота [9], в якій запропоновано системно обґрунтований критерій оптимального керування.

«Онлайн-адаптивне траєкторне планування».

Роботи [10–13] розглядають ситуацію, коли умови кожного циклу екскаваторної діяльності змінюються: маса породи в ковші, геометрія забою, кут стоянки самоскида. Автоматизована система має адаптуватись до цих змін без повного перерахунку моделі, що вимагає не одноразової оптимізації, а адаптивного планування. Ідея прогнозного регулятора (Model Predictive Control, MPC), реалізована в [10] через базу попередньо обчислених рішень, дозволяє коригувати отримані раніше оптимальні режими відповідно до поточних обмежень.

Роботи [11] і [13] розвивають ідею використання стилю роботи оператора як джерела траєкторій і декомпозицію задачі на елементарні підзадачі (task units): замість однієї великої оптимізації послідовно оптимізуються підзадачі – вихід з забою, підйом із утриманням породи, поворот до місця розвантаження, розвантаження, повернення до точки черпання – з наступним зшиванням у гладку спільну траєкторію.

Робота [12] доповнює групу підходами до планування руху великих екскаваторів із урахуванням просторових перетворень, що особливо важливо для тривимірних задач і коректного повернення в фіксовану точку черпання.

«Перцептивно-автономні методи екскаваторної діяльності».

Роботи [14–19] вирішують питання стійкості оптимальної траєкторії до невизначеностей реального середовища (форма забою, поверхня матеріалу, краї

уступу, положення кузова самоскида), яке може бути не відоме заздалегідь і змінюється в процесі роботи.

Робота [14] дає систематичну рамку автономного екскаватора як ланцюга «сприйняття – розпізнавання – прийняття рішення/планування – дія» (sensing – perception – decision/planning – action). Робота [15] демонструє автономну систему завантаження матеріалу в реальних умовах (пил, нестабільність ґрунту, скочування каміння) і показує, що працездатність системи визначається не лише якістю траєкторії, а здатністю перепланувувати при зміні сцени й підтримувати безпеку при прийнятній продуктивності.

Робота [16] формулює ключові складнощі автоматизації землерийних машин: важко формалізована взаємодія ківш–матеріал, невизначеність вхідних умов, необхідність надійної сенсорики й оцінювання стану. Це пояснює, чому оптимізація траєкторії завжди має супроводжуватись інтеграцією сенсорного сприйняття і робастним керуванням. Робота [17] пропонує побудову траєкторії на основі хмари точок (point cloud), отриманої від лідара або 3D-сканера, тоді як [18] використовує сприйняття поверхні матеріалу для адаптації траєкторії копання у реальному часі. Шведські дослідники з Університету технологій Лулео [19] вирішували суміжне питання взаємодії ковша з породою у контексті моделювання зносу й показали, що урахування реальної геометрії матеріалу та контактної механіки є умовою адекватного моделювання динаміки ковша.

«Робастне траєкторне керування з компенсацією збурень».

Роботи [20–22] та частково [23] присвячені забезпеченню відтворюваності оптимальної траєкторії у виконавчому контурі. Роботи [20] і [21] демонструють семантичний підхід: спочатку забезпечується надійність контуру керування, потім – оптимальність траєкторії. При застосуванні нелінійних ПІ-регуляторів, крос-з'язаної компенсації або еволюційного підлаштування параметрів ПІД-регуляторів досягаються краща точність відстеження, зниження перерегулювання і коливань, стабільний час фази. Це прямо впливає на швидкість циклу: навіть ідеальний план мінімального часу програє, якщо виконавчий контур породжує затримки або перерегулювання. Тобто оптимізацію циклу слід розуміти як двошарову задачу: планування траєкторії і її виконання.

Робота [22] показує, що при коливальному характері зовнішніх збурень (вібрації, змінні навантаження, нерівномірність ґрунту) потрібен координований контроль, що узгоджує кілька приводів. Для екскаватора це відповідає синхронізації підйому й повороту, а також режиму повернення в точку черпання, де часто виникає гальмівний режим повороту з ризиком розгойдування. Робота [23] показує можливість застосування навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) як альтернативу класичним регуляторам: для складних нелінійних систем можливо навчити політику відстеження траєкторії без ручного налаштування під кожен режим, але це накладає вимоги до обсягу даних і до

валідації перенавчання.

«Енергооптимізація циклу екскавації».

У роботах [2, 4, 24] і частково [5] розглядається компромісний вибір критерію оптимізації: швидкодія чи енергоспоживання. Основна ідея полягає в тому, що енергія циклу формується не лише інтегралом механічної роботи, а й втратами у приводах, піками струмів і моментів, режимами гальмування та узгодженістю фаз рухів. Робота [2] показує, що реальні вимірювання часу й потужності по фазах дозволяють будувати аналітичну модель оптимізації енерговитрат і оцінювати потенціал економії при зміні режиму роботи.

Робота [4] реалізує енергооптимізацію через траєкторне планування для екскаватора за схемою прямої лопати. Енергія стає цільовою функцією, а траєкторія – інструментом перерозподілу навантажень у приводах. При цьому правильна траєкторія може залишатися близькою до оптимальної за швидкістю, усуваючи лише енергетично неефективні ділянки (надмірні розгони й гальмування, зайві вертикальні переміщення, невідале узгодження повороту й підйому тощо). Робота [24] дає системний погляд на енергооптимізацію із урахуванням траєкторії та загального енергоменеджменту силової установки, що для екскаваторів означає урахування обмежень мережі кар'єру, вимог до зниження піків і теплових обмежень двигунів.

Робота [25] пропонує критерій енергоефективності виробничого циклу ЕКГ-8І, що закладає основу для верифікації на вітчизняній техніці.

Окремо необхідно виділити напрямки, що виникли на перетині задач оптимізації траєкторії і потреби враховувати структурний стан машини в режимі реального часу.

«Цифрові двійники і симуляційні методи».

Ключова ідея такого підходу полягає в тому, що замість побудови спрощеної аналітичної моделі або використання експериментальних даних створюється цифровий двійник (*digital twin*) – інтегрована віртуальна модель екскаватора, що охоплює кінематику, динаміку, модель опору копанню, реконструкцію середовища і, що принципово, модель структурної поведінки несучих елементів у реальному часі.

Центральною для цієї групи є робота [26], де для безпілотного канатного екскаватора побудовано цифровий двійник типу «форма – несуча здатність» (*shape–performance digital twin*). Структурна відповідь машини на траєкторію визначається методом скінченних елементів, але не у вигляді важких розрахунків у реальному часі, а через заздалегідь навчені сурогатні моделі (*surrogate models*), що вбудовані в планувальник як додаткові обмеження. Тобто оптимізатор траєкторії «бачить» не лише кінематичні й енергетичні межі, а й умову збереження конструктивної цілісності ковша, рукояті й стріли. Результатом є оптимальна за продуктивністю й енергією траєкторія, що водночас безпечна з погляду механічного навантаження. Це особливо актуально для кар'єрних екскаваторів, де несподівана відмова металоконструкції призводить до

багатодинного простою й значних економічних втрат.

Додаткове застосування цифрового двійника полягає у можливості ідентифікації параметрів реальної динамічної моделі без зупинки машини. В [27] запропоновано метод ідентифікації параметрів динамічної моделі переднього механізму канатного екскаватора на основі оптимально спроектованих збуджувальних траєкторій (*excitation trajectories*) з гібридною фільтрацією сигналів. Отримана модель надалі використовується як основа для планувальника і системи керування. Цей підхід вирішує одну з головних практичних проблем: точна динамічна модель великого екскаватора в реальних умовах недоступна – її доводиться ідентифікувати «на ходу», не порушуючи технологічного процесу.

Проте варто зазначити, що обидві роботи [26, 27] виконано на прототипах зменшеного масштабу, і питання масштабування результатів на реальні машини залишається відкритим.

Цифровий двійник переводить оптимізацію траєкторії з рівня «геометрія – енергія» на рівень «геометрія – енергія – стан конструкції – ідентифікована модель». Для промислового впровадження це критично: саме такий рівень інтеграції дозволяє говорити про реальну автономізацію, а не про симуляційний результат.

«Методи машинного навчання і нейромережеве керування».

Ця група охоплює підходи, де нейронні мережі й алгоритми навчання використовуються не як допоміжний інструмент усередині класичного оптимізатора, а як основний механізм або планування траєкторії, або побудови контролера відстеження. Від робастного керування вона відрізняється тим, що регулятор не синтезується аналітично, а навчається на даних або у взаємодії із середовищем.

Робота [28] пропонує фреймворк планування траєкторії на основі фізично-інформованих нейронних мереж (*Physics-Informed Neural Networks, PINN*). Великий масив оптимальних траєкторій, розрахованих офлайн класичними методами, використовується для навчання мережі, яка потім здатна генерувати оптимальну траєкторію онлайн за поточними умовами (стан машини, форма матеріальної поверхні) без ітераційного розв'язання задачі оптимізації. При цьому фізичні закони (динамічні обмеження, обмеження по потужності, цільова функція) вбудовані безпосередньо у функцію втрат мережі. Це гарантує, що згенерована траєкторія залишається у фізично допустимій області навіть для умов, яких не було в навчальній вибірці. Для задачі онлайн-адаптації траєкторії екскаватора – де цикл короткий і часу на перерахунок немає – такий підхід виглядає перспективним.

Робота [29] вирішує задачу відстеження траєкторії через адаптивне керування на основі нейронної мережі з радіальними базисними функціями (*Radial Basis Function Neural Network, RBFNN*). Мережа навчається в реальному часі апроксимувати невідому нелінійну

збуджувальну функцію системи (зміни маси ковша, нелінійності привода, зовнішні збурення) і передавати цю оцінку до контролера для компенсації. Така система не потребує точної апріорної динамічної моделі, що для великих екскаваторів із змінним завантаженням є суттєвою практичною перевагою.

Варто відзначити підхід навчання на даних оператора (*imitation learning*) для планування траєкторій, що представлений у роботі [30]. Система навчається відтворювати характеристики траєкторій досвідченого оператора за набором ключових точок циклу. Цей підхід співвідноситься з першою групою огляду. Операторський досвід стає навчальними даними для нейромережевого планувальника – таким чином дві групи методологічно замикаються в єдиний цикл.

Порівняння підходів за типом екскаватора.

Більшість методів оптимізації траєкторій у сучасній літературі розроблено для гідравлічних екскаваторів із маніпуляторним типом рухів (незалежне керування стрілою, рукояттю, ковшем). Перенесення цих методів на канатний екскаватор типу прямої лопати (ЕКГ-8І) або драглайн потребує суттєвої адаптації. По-перше, у канатних екскаваторів відсутній гідравлічний маніпулятор: рух ковша визначається узгодженою роботою електроприводів підйому й тяги, що формує суттєво відмінну кінематичну структуру. По-друге, для драглайна вирішальним обмежувальним чинником є коливальна динаміка канатної системи, яка практично не зустрічається у гідравлічних машинах і вимагає специфічних методів демпфування. По-третє, типові потужності кар'єрних електромеханічних систем (1000–4000 кВт) на порядок перевищують потужності досліджуваних у більшості публікацій гідравлічних маніпуляторів, що змінює масштаб задачі керування й вимоги до обмежень по струму і нагріву. Таким чином, при практичному використанні результатів огляду для екскаватора ЕКГ-8І необхідна критична оцінка застосовності кожного методу з урахуванням зазначених відмінностей.

Однією з ключових проблем теорії автоматичного керування (ТАК) визнається проблема постановки мети керування [9, 25, 31]. Ця проблема виходить за рамки власне ТАК, будучи водночас першим етапом вирішення проблеми керування будь-яким процесом. Незважаючи на значну кількість наукових праць і широту охоплення, необхідно констатувати, що дискусія щодо вибору критерію оптимізації робочого циклу кар'єрних екскаваторів залишається відкритою і не має загальноприйнятого вирішення. Важливою є ідея багатокритеріального підходу, запропонованого в [5]: урахування витраченого часу, витраченої електроенергії та операційного впливу на стан обладнання. Проте цей підхід не враховує операційну продуктивність роботи екскаватора – кількість перевантаженої гірської маси, що є суттєвим недоліком з погляду оцінювання реальної ефективності технологічного процесу.

Висновки

Розширений огляд наукових матеріалів показує, що оптимізація циклу екскавації у сучасних дослідженнях розглядається як багаторівнева задача, де оптимальна траєкторія є лише одним із елементів системи.

Роботи з польової аналітики й порівняльного оцінювання доводять необхідність декомпозиції циклу на фази та формування ключових показників ефективності (KPI), а саме час циклу й фаз, продуктивність, пікова потужність, втрати в приводах, простої. Це створює сталонну базу для коректного порівняння методів.

Траєкторна оптимізація формулюється як задача оптимального керування з обмеженнями кінематики й приводів; ключовий тренд – перехід до багатокритеріального підходу (час – енергія – ударні навантаження) та побудови множини Парето (Pareto front) компромісних рішень.

Через змінність умов акцент зміщується на схеми попередній розрахунок – онлайн-адаптація: бібліотека оптимальних режимів, прогнозне регулювання (MPC) або швидкі сурогатні моделі (surrogate models), що забезпечують адаптацію без дорогого перерахунку в реальному часі.

Автономність і висока якість оптимізації неможливі без сенсорного сприйняття: оцінювання поверхні матеріалу, меж забою та положення кузова/відвалу є обов'язковим джерелом обмежень для планувальника траєкторії.

Критичною є стадія виконання. Робастні контури керування і компенсація збурень необхідні, щоб оптимальна траєкторія реально відтворювалась без зривів і коливань. Для екскаваторів типу прямої лопати домінують обмеження потужності й ударних навантажень, тоді як для драглайна вирішальним є розгойдування канатної системи й час її демпфування.

Переважає більшість розглянутих методів розроблена для гідравлічних маніпуляторів. Їх застосування до канатних екскаваторів типу ЕКГ-8І та драглайнів потребує адаптації: інша кінематична структура, відсутність маніпуляторного руху, значно більша потужність та специфічна динаміка канатної системи для драглайна.

Використання цифрових двійників та нейромережеві підходи надають якісно новий рівень адаптивності й обчислювальної ефективності онлайн-планування, але висувають підвищені вимоги до репрезентативності навчальних даних, верифікації поза межами навчальної вибірки і прозорості рішень. Для промислового застосування ці методи перебувають на стадії концептуального обґрунтування й потребують валідації на реальних або масштабованих моделях.

Отже, як напрямки подальших досліджень необхідно визначити наступне:

1. Розробка критерію оптимізації робочого циклу кар'єрних екскаваторів на основі багатокритеріального підходу, який враховував би витрачений час,

витрачену електроенергію, операційний вплив на стан обладнання та операційну продуктивність виробничого циклу, тобто кількість перевантаженої гірської маси за одиницю часу.

2. Розробка спостерігача рівня завантаження ковшу екскаватора гірською масою в режимі реального часу як необхідної складової для визначення операційної продуктивності та адаптації закону керування до змінних умов циклу.

3. Верифікація запропонованого критерію оптимізації на реальних або модельних даних електромеханічної системи екскаватора із порівнянням за метриками часу циклу, питомого енергоспоживання та продуктивності відносно базових траєкторій і результатів попередніх досліджень.

Перелік використаних джерел

- [1] Babaei Khorzoughi M., Hall R. A Study of Digging Productivity of an Electric Rope Shovel for Different Operators. *Minerals*. 2016. Vol. 6, no. 2. Article 48. DOI: <https://doi.org/10.3390/min6020048>.
- [2] Yaghini A., Hall R., Apel D. Autonomous and Operator-Assisted Electric Rope Shovel Performance Study. *Mining*. 2022. Vol. 2, no. 4. Pp. 699–711. DOI: <https://doi.org/10.3390/mining2040038>.
- [3] Topno S., Sahoo L., Umre B. S. Energy efficiency assessment of electric shovel operating in opencast mine. *Energy*. 2021. Vol. 230. Article 120703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120703>.
- [4] Energy-minimum optimization of the intelligent excavating process for large cable shovel through trajectory planning / Wang X., Sun W., Li E., Song X. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018. Vol. 58. Pp. 2219–2237. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2011-6>.
- [5] Multi-objective time-energy-impact optimization for robotic excavator trajectory planning / H. Feng et al., *Automation in Construction* 2023. Vol. 156. Article 105094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105094>.
- [6] Fan R., Li Y., Yang L. Multiobjective trajectory optimization of intelligent electro-hydraulic shovel. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 17. Article 50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0706-2>.
- [7] Multi-objective trajectory planning of earth excavation robots using continuous trajectory representation / Zhang T., Fu T., Song X., Qu F. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 136. Article 104176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104176>.
- [8] Time-jerk optimal trajectory planning of hydraulic robotic excavator / Y. Zhang et al. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 13, no. 7. DOI: <https://doi.org/10.1177/16878140211034611>.
- [9] Lutsenko I., Tytiuk V., Mikhailenko O. Development of a system-grounded criterion of optimal control. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного*

університету. 2010. Вип. 5(64). С. 15–23.

- [10] Database-driven model predictive control system for online adaptation of an autonomous excavator to environmental conditions / T. Okada et al. *Control Engineering Practice*. 2024. Vol. 145. Article 105843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.105843>.
- [11] Real-time task-oriented continuous digging trajectory planning for excavator arms / Z. Yao et al. *Automation in Construction*. 2023. Vol. 152. Article 104916. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104916>.
- [12] Trajectory planning and control of large robotic excavators based on inclination-displacement mapping / H. Ding et al. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. Article 105209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105209>.
- [13] Task-unit based trajectory generation for excavators utilizing expert operator skills / C. Feng et al. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. Article 105247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105247>.
- [14] Eraliev O., Shin D., Lee Ch. Sensing, perception, decision-making and planning-action for autonomous excavators: A review. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 141. Article 104428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104428>.
- [15] An autonomous excavator system for material loading tasks / L. Zhang et al. *Science Robotics*. 2021. Vol. 6, iss. 55. Article eabc3164. DOI: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abc3164>.
- [16] Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 68. Pp. 212–222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009>.
- [17] Toward autonomous mining: Design and development of an unmanned electric shovel via point cloud-based optimal trajectory planning / Zhang T., Fu T., Cui Y., Song X. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 17, no. 3. Article 30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0686-2>.
- [18] Excavating Trajectory Planning of a Mining Rope Shovel Based on Material Surface Perception / Feng Y., Wu J., Lin B., Guo C. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 15. Article 6653. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156653>.
- [19] Full-Scale Simulation and Validation of Wear for a Mining Rope Shovel Bucket / Svanberg A., Larsson S., Mäki R., Jonsén P. *Minerals*. 2021. Vol. 11, no. 6. Article 623. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11060623>.
- [20] Robotic excavator motion control using a nonlinear proportional–integral controller and cross-coupled pre-compensation / D. Wang et al. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 64. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.024>.
- [21] Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller / H. Feng et al. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 105. Pp. 153–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.12.014>.
- [22] Coordinated trajectory tracking control for mining excavator with oscillating external disturbance / R. Fan et al. *Journal of Field Robotics*. 2024. Vol. 41, no. 2. Pp. 258–272. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22257>.
- [23] Egli P., Hutter M. A General Approach for the Automation of Hydraulic Excavator Arms Using Reinforcement Learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022. Vol. 7, no. 2. Pp. 5679–5686. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3152865>.
- [24] Nguyen V. H., Do T. C., Ahn K. K. Investigation and Optimization of Energy Consumption for Hybrid Hydraulic Excavator with an Innovative Powertrain. *Actuators*. 2023. Vol. 12, no. 10. Article 382. DOI: <https://doi.org/10.3390/act12100382>.
- [25] Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators / V. Tytiuk et al. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 280. Article 05013. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005013>.
- [26] Data-driven excavation trajectory planning for unmanned mining excavator / T. Fu et al. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 162. Article 105395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105395>.
- [27] Wang X., Song X., Sun W. Surrogate based trajectory planning method for an unmanned electric shovel. *Mechanism and Machine Theory*. 2021. Vol. 158. Article 104230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104230>.
- [28] Physics-Informed Neural Networks-Based Online Excavation Trajectory Planning for Unmanned Excavator / T. Fu et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 37. Article 131. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01109-2>.
- [29] Adaptive neural network tracking control for unmanned electric shovel intelligent excavation system / K. Lian et al. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 19, no. 6. Article 45. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-024-0816-0>.
- [30] Mining Trajectory Planning of Unmanned Excavator Based on Machine Learning / T. Zhang et al. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, no. 9. Article 1298. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12091298>.
- [31] Influence of human-operator parameters on the energy consumption and cycle time of an excavator electromechanical system / V. Tytiuk et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. Vol. 3. Pp. 131–138. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-3/131>.

MODERN APPROACHES TO EXCAVATION CYCLE OPTIMIZATION FOR SURFACE MINING EXCAVATORS

Serhiienko S.A.	PhD (Engineering), professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3977-5239 , e-mail: serhiy.serhiyenko@gmail.com ;
Onyshchenko A.O.	senior lecturer, Separate Structural Unit «Professional College of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University», Kremenchuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3793-331X , e-mail: onishchenko@kkrnu.ukr.edu

A systematic review of research publications from 2016–2025 on the optimization of the excavation cycle of surface mining excavators of the rope shovel and dragline types has been conducted. The relevance of the review is determined by rising energy costs, increasingly stringent resource conservation requirements, and heightened competition in the mining industry, where excavation efficiency directly governs quarry productivity and extraction cost. The excavation cycle is treated as a multiphase sequence of interrelated operations (bucket breakout, hoisting, swing to the dump position, payload discharge, and return to the digging point), the trajectory quality of which determines cycle time, energy efficiency, peak load levels, and operational reliability. Variable bucket loading is identified as a critical feature of field operation, giving rise to variability in cycle time and energy consumption. The optimization methods are systematized into six principal groups. Operator-oriented control methods provide decomposition of the cycle into phases and formation of key performance indicators as a reference baseline for rigorous method comparison. Methods of optimal control and multi-objective trajectory optimization implement the transition from single-criterion time minimization to the time–energy–impact format with construction of a Pareto front of compromise solutions. Online adaptive trajectory planning based on Model Predictive Control and pre-computed solution libraries provides adaptation to varying cycle conditions without costly real-time recomputation. Perceptive-autonomous methods integrate sensor perception of the environment (dig face geometry, truck body position, and material surface profile) as a mandatory source of constraints for the trajectory planner. Robust trajectory control with disturbance compensation ensures reproducibility of the optimal trajectory in the execution loop through nonlinear controllers, cross-coupled compensation, and evolutionary tuning of controller parameters. Energy optimization methods address the electrical energy consumption objective function accounting for drive losses, current peaks, and phase motion coordination. Approaches based on digital twins and neural network control are considered separately, including Physics-Informed Neural Networks and adaptive control based on Radial Basis Function Neural Networks. It is shown that these approaches provide a qualitatively new level of adaptability and computational efficiency; however, for industrial application they remain at the stage of conceptual validation and require verification on full-scale or appropriately scaled physical systems. It is shown that the substantial majority of the methods have been developed for hydraulic manipulator systems and require significant adaptation for rope-type electromechanical excavators of the rope shovel and dragline types, accounting for the different kinematic structure, substantially higher power levels, and the specific dynamics of the rope system. It is established that research into the selection of the optimization criterion for the excavation cycle remains relevant. Three directions for further research are identified: development of a multi-objective optimization criterion accounting for cycle time, energy consumption, impact on equipment condition, and operational productivity; development of a real-time bucket fill level observer; and verification of the proposed solutions on an electromechanical system of the rope shovel or dragline type.

Keywords: surface mining excavator; rope shovel; dragline; excavation cycle optimization; trajectory planning; multi-objective optimization; electric drive energy efficiency; model predictive control; digital twin.

References

- [1] M. Babaei Khorzoughi, and R. Hall, “A Study of Digging Productivity of an Electric Rope Shovel for Different Operators,” *Minerals*, vol. 6, no. 2, article 48, 2016. doi: 10.3390/min6020048.
- [2] A. Yaghini, R. Hall, and D. Apel, “Autonomous and Operator-Assisted Electric Rope Shovel Performance Study,” *Mining*, vol. 2, no. 4, pp. 699–711, 2022. doi: 10.3390/mining2040038.
- [3] S. Topno, L. Sahoo, and B. S. Umre, “Energy efficiency assessment of electric shovel operating in open-cast mine,” *Energy*, vol. 230, article 120703, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.120703.
- [4] X. Wang, W. Sun, E. Li, and X. Song, “Energy-minimum optimization of the intelligent excavating process for large cable shovel through trajectory planning,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 58, pp. 2219–2237, 2018. doi: 10.1007/s00158-018-2011-6.
- [5] H. Feng et al., “Multi-objective time-energy-impact optimization for robotic excavator trajectory planning,” *Automation in Construction*, vol. 156, article 105094, 2023. doi: 10.1016/j.autcon.2023.105094.
- [6] R. Fan, Y. Li, and L. Yang, “Multiobjective trajectory optimization of intelligent electro-hydraulic shovel,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 17, article 50, 2023. doi: 10.1007/s11465-022-0706-2.
- [7] T. Zhang, T. Fu, X. Song, and F. Qu, “Multi-objective trajectory planning of earth excavation robots using continuous trajectory representation,” *Automation in*

- Construction*, vol. 136, article 104176, 2022. doi: **10.1016/j.autcon.2022.104176**.
- [8] Y. Zhang, Z. Sun, Q. Sun, Y. Wang, X. Li, and J. Yang, "Time-jerk optimal trajectory planning of hydraulic robotic excavator," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 7, 2021. doi: **10.1177/16878140211034611**.
- [9] I. Lutsenko, V. Tytiuk and O. Mikhailenko, "Development of a system-grounded criterion of optimal control", *Bulletin of Kremenchuk State Polytechnic University*, vol. 5(64), pp. 15–23, 2010.
- [10] T. Okada, T. Yamamoto, T. Doi, K. Koiwai, and K. Yamashita, "Database-driven model predictive control system for online adaptation of an autonomous excavator to environmental conditions," *Control Engineering Practice*, vol. 145, article 105843, 2024. doi: **10.1016/j.conengprac.2024.105843**.
- [11] Z. Yao, S. Zhao, X. Tan, W. Wei, and Y. Wang, "Real-time task-oriented continuous digging trajectory planning for excavator arms," *Automation in Construction*, vol. 152, article 104916, 2023. doi: **10.1016/j.autcon.2023.104916**.
- [12] H. Ding, Z. Sang, Z. Li, J. Shi, Y. Wang, and D. Meng, "Trajectory planning and control of large robotic excavators based on inclination-displacement mapping," *Automation in Construction*, vol. 158, article 105209, 2024. doi: **10.1016/j.autcon.2023.105209**.
- [13] C. Feng, Y. Shen, J. Wang, Q. Wang, Z. Suo, and F. Su, "Task-unit based trajectory generation for excavators utilizing expert operator skills," *Automation in Construction*, vol. 158, article 105247, 2024. doi: **10.1016/j.autcon.2023.105247**.
- [14] O. Eraliev, D. Shin, and Ch. Lee, "Sensing, perception, decision-making and planning-action for autonomous excavators: A review," *Automation in Construction*, vol. 141, article 104428, 2022. doi: **10.1016/j.autcon.2022.104428**.
- [15] L. Zhang et al., "An autonomous excavator system for material loading tasks," *Science Robotics*, vol. 6, iss. 55, article eabc3164, 2021. doi: **10.1126/scirobotics.abc3164**.
- [16] S. Dadhich, U. Bodin, and U. Andersson, "Key challenges in automation of earth-moving machines," *Automation in Construction*, vol. 68, pp. 212–222, 2016. doi: **10.1016/j.autcon.2016.05.009**.
- [17] T. Zhang, T. Fu, Y. Cui, and X. Song, "Toward autonomous mining: Design and development of an unmanned electric shovel via point cloud-based optimal trajectory planning," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 3, article 30, 2022. doi: **10.1007/s11465-022-0686-2**.
- [18] Y. Feng, J. Wu, B. Lin, and C. Guo, "Excavating Trajectory Planning of a Mining Rope Shovel Based on Material Surface Perception," *Sensors*, vol. 23, no. 15, article 6653, 2023. doi: **10.3390/s23156653**.
- [19] A. Svanberg, S. Larsson, R. Mäki, and P. Jonsén, "Full-Scale Simulation and Validation of Wear for a Mining Rope Shovel Bucket," *Minerals*, vol. 11, no. 6, article 623, 2021. doi: **10.3390/min11060623**.
- [20] D. Wang, L. Zheng, H. Yu, W. Zhou, and L. Shao, "Robotic excavator motion control using a nonlinear proportional–integral controller and cross-coupled pre-compensation," *Automation in Construction*, vol. 64, pp. 1–6, 2016. doi: **10.1016/j.autcon.2015.12.024**.
- [21] H. Feng et al., "Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 105, pp. 153–168, 2018. doi: **10.1016/j.ymssp.2017.12.014**.
- [22] R. Fan, Y. Li, L. Yang, T. Qin, Y. Zhang, and Z. Wang, "Coordinated trajectory tracking control for mining excavator with oscillating external disturbance," *Journal of Field Robotics*, vol. 41, no. 2, pp. 258–272, 2024. doi: **10.1002/rob.22257**.
- [23] P. Egli, and M. Hutter, "A General Approach for the Automation of Hydraulic Excavator Arms Using Reinforcement Learning," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 5679–5686, 2022. doi: **10.1109/LRA.2022.3152865**.
- [24] V. H. Nguyen, T. C. Do, and K. K. Ahn, "Investigation and Optimization of Energy Consumption for Hybrid Hydraulic Excavator with an Innovative Powertrain," *Actuators*, vol. 12, no. 10, article 382, 2023. doi: **10.3390/act12100382**.
- [25] V. Tytiuk, K. Khandakji, G. Siwyakova, N. Karabut, O. Chornyi, and V. Busher, "Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators," *E3S Web of Conferences*, vol. 280, article 05013, 2021. doi: **10.1051/e3sconf/202128005013**.
- [26] T. Zhang, T. Fu, T. Ni, H. Yue, Y. Wang, and X. Song, "Data-driven excavation trajectory planning for unmanned mining excavator," *Automation in Construction*, vol. 162, article 105395, 2024. doi: **10.1016/j.autcon.2024.105395**.
- [27] X. Wang, X. Song, and W. Sun, "Surrogate based trajectory planning method for an unmanned electric shovel," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 158, article 104230, 2021. doi: **10.1016/j.mechmachtheory.2020.104230**.
- [28] T. Fu, Z. Hu, T. Zhang, Q. Bi, and X. Song, "Physics-Informed Neural Networks-Based Online Excavation Trajectory Planning for Unmanned Excavator," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 37, article 131, 2024. doi: **10.1186/s10033-024-01109-2**.
- [29] K. Lian, Z. Hu, X. Long, Y. Zhang, W. Xie, and X. Song, "Adaptive neural network tracking control for unmanned electric shovel intelligent excavation system," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 6, article 45, 2024. doi: **10.1007/s11465-024-0816-0**.
- [30] T. Zhang et al., "Mining Trajectory Planning of Unmanned Excavator Based on Machine Learning," *Mathematics*, vol. 12, no. 9, article 1298, 2024. doi: **10.3390/math12091298**.

- [31] V. Tytiuk, D. Mrachkovskiy, O. Chorniy, V. Kuznetsov, M. Tryputen, and G. Sivyakova, "Influence of human-operator parameters on the energy consumption and cycle time of an excavator electromechanical system," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 3, pp. 131–138, 2025. doi: 10.33271/nvngu/2025-3/131.

Стаття надійшла 10.12.2025

Стаття прийнята 05.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Сергієнко С. А., Онищенко А. О. Сучасні підходи до оптимізації робочого циклу кар'єрних екскаваторів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359913>.

144 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 66.041.57:669.012.7

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359926

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНФІЛЬТРОВАНОГО ПОВІТРЯ НА ПАРАМЕТРИ 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 комплексний аналіз впливу неконтрольованої інфільтрації атмосферного повітря на роботу обертових печей, що використовуються у промисловості для виробництва вапна та цементного клінкеру. На основі газодинамічних розрахунків та використання програмного комплексу Ansys Fluent проведено моделювання режиму роботи печі в умовах повної герметичності та при наявності дефектів ущільнення. Доведено, що інфільтрація повітря є критичним фактором, який призводить не лише до прямих теплових втрат, а й до дестабілізації гідралічного і температурного режиму, та зростанню навантаження на димосос. Запропоновано методику оцінки перевитрат палива в наслідок інфільтрації повітря та шляхи підвищення енергоефективності.

Ключові слова: обертові печі; цементний клінкер; вапно; інфільтрація повітря; тепловий баланс; гідралічний режим.

Постановка проблеми

Обертові печі використовуються у виробництві конвекторного вапна, цементу, магнезиту. У структурі собівартості продукції печей, витрати на енергоносії (паливо та електроенергію) складають від 40% до 60% [1], [2]. В умовах підготовки до вступу України в ЄС та імплементації директив Net-Zero Industry Act [3] та ESPR [4], а також зростання цін на енергоресурси, підвищення енергетичної ефективності обертових печей стає критичним завданням для української промисловості.

Відомо, що теоретична кількість тепла, необхідна для утворення вапна, складає від 2910 до 3490 кДж на кг чистого СаО [5]. Однак фактичне питоме споживання тепла на діючих підприємствах часто сягає 6500-7900 кДж/кг. **Помилка! Джерело посилання не знайдено..**

Головними причинами низької енергоефективності обертових печей є їх конструктивні особливості, а саме – велика довжина і площа бокової поверхні стін печі [6]. Окрім цього, одним із суттєвих та часто недооцінених факторів, що знижують ефективність роботи печі, є інфільтрація (підсоси) холодного атмосферного повітря через нещільності корпусу та технологічних вузлів – місць з'єднання рухомого барабану та нерухомих частин (головок) печі.

Інфільтраційне повітря дестабілізує роботу пальникових пристроїв, змінює форму та температуру факела, що негативно впливає на якість випалу матеріалу. Збільшення об'ємів газу в наслідок цього порушує гідралічний режим та роботу димососів, що призводить до їх перевантаження. Незважаючи на поширеність проблеми, комплексний аналіз її впливу на параметри роботи печі, а саме на енергетичний баланс,

гідралічний режим в печі та процес згорання, досі не був зроблений та потребує систематизації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Існуюча конструкція обертових печей була запропонована в роботах Альфреда Ренсома (1885 р.) і технічних рішеннях Polysius і KHD [8]. В процесі експлуатації печей були помічені нестабільність процесу горіння і збільшене споживання палива у порівнянні з теоретичними розрахунками. Проте пояснень цих явищ на той час не було.

Вираз «інфільтроване повітря» почав з'являтися в технічній літературі в 1950-х роках, особливо в посібниках з експлуатації котлів і печей в Європі та США [8]. У 1970-х і 80-х роках проблеми енергоефективності призвели до широких технічних досліджень таких організацій, як VDZ [9], і постачальників обладнання, таких як FLSmidth, Polysius і KHD, які офіційно закріпили цей термін в енергоаудиторських звітах та посібниках з оптимізації печей.

З того часу питання контролю та мінімізації інфільтрованого повітря стали важливими складовими робіт з енергозбереження, скорочення викидів та запобігання вибухам на цементних і вапняних заводах.

Аналіз наявних досліджень [10-19] показує, що проблема інфільтрованого повітря в обертових печах розглядається переважно з позицій енергетичної ефективності та вдосконалення окремих вузлів, але рідко – як комплексна задача теплового балансу й гідралічного режиму всієї печі та газового тракту.

Так, у роботі [10] детально розглянуто місця виникнення підсосів повітря та приблизно оцінено кількість перевитрат палива та електричної енергії. В матеріалах наведено приклад обертової печі виробництвом 3000 т/добу, в якій кількість інфільтрованого повітря

може сягати 18–22% від загального об'єму газів. Це прямо трансформується у збільшення питомих теплових витрат (на 3–4%), підвищення навантаження на димосос та зростання споживання електроенергії на 7–12%.

В роботі [11] зазначається, що зниження на 5 базових пунктів надлишкового повітря може зменшити споживання палива на 2,5%. В джерелі **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** вказується, що інфільтроване повітря є однією з ключових причин надлишкових втрат із димовими газами, особливо для довгих сухих та мокрих печей, де частка втрат досягає 15–30% загальних витрат тепла. Проте в цих роботах підсоси розглядаються здебільшого як «надлишкове повітря» в інтегральному тепловому балансі, без аналізу їх впливу на процеси горіння, розподіл температур вздовж печі та формування постійних зон випалювання і кальцинації.

Критичним обмеженням більшості наявних досліджень є орієнтація на статичні балансові розрахунки (за O_2/CO_2 , витратою газів). Водночас не враховується нестационарний характер підсосів (зміна за часом через знос ущільнень, «пробої» футерування при обвалах на вході печі тощо), а також їхній вплив на динамічну стабільність факелу, довжину зони спікання та коливання температури готового продукту на виході. Це створює методологічний розрив між енергетичними розрахунками та реальною роботою печі у нестационарних умовах.

Деякі автори зосереджуються на CFD-моделюванні (обчислювальній гідродинаміці) процесів горіння та руху газів. Зокрема, у роботі [12] досліджується вплив інфільтрації повітря безпосередньо на характеристики факела та процес горіння в обортовій печі. Інший аспект аеродинаміки розглянуто в дослідженні [14], де аналізується аеродинамічний контроль дифузійного полум'я для оптимізації руху матеріалів в цементній обортовій печі. Хоча ці дослідження глибоко розкривають аеродинамічні ефекти в зоні горіння, вони здебільшого ігнорують вплив підсосів холодного повітря через завантажувальні/розвантажувальні вузли на загальний тепловий баланс.

Ряд робіт промислово-прикладного характеру [15], [16] пропонують методики визначення величини підсосів за різницею концентрацій O_2 між двома точками газового тракту. Також мають місце комбіновані підходи, що враховують одночасно вимірювання витрати газу, включаючи застосування ультразвукових детекторів витоків та цирконієвих датчиків кисню. Такі рішення дозволяють ідентифікувати найбільш проблемні точки інфільтрації (ущільнення печі, розвантажувальні й оглядові люки, розширювальні компенсатори, корпуси вентиляторів тощо) і кількісно оцінити їхній внесок у сумарний об'єм інфільтрованого повітря.

Водночас, ці підходи, хоч і важливі для практичного аудиту, часто працюють у припущенні стаціонарного режиму роботи, а в розрахунках приймається

середнє значення вмісту O_2 в атмосферному повітрі. Крім того ігноруються рециркуляційні потоки в печі та неоднорідність складу газу у перерізі. У результаті точність визначення інфільтрації у складних вузлах залишається обмеженою, що ускладнює врахування цих даних у тепловому балансі та гідравлічному режимі печі.

Пропозиції з мінімізації підсосів повітря в наукових та технічних джерелах, в основному, орієнтовані на покращення конструкції ущільнень (графітові, листові, пневматичні, пружинні ущільнення) [17],[18] та демонструють значний економічний ефект від зменшення підсосів на вході/виході печі. Типові розрахунки показують річну економію палива й електроенергії на рівні сотень тисяч доларів США при окупності інвестицій менше двох років [19]. Однак в цих роботах для оцінки інфільтрованого повітря використовують спрощені розрахунки та зосереджуються на елементах ущільнення.

Крім того, більшість авторів декларують, що усунення підсосів автоматично призводить до «поліпшення термодинаміки процесу» та потенційної зміни кристалічної структури клінкеру. Нажаль, ці твердження, як правило, не підкріплені систематичними експериментальними даними щодо фазового складу й мікроструктури при різних рівнях інфільтрації повітря. Це вказує на потребу у більш глибоких матеріалознавчих дослідженнях, інтегрованих із теплотехнічним аналізом.

Існуючі методики вимірювання (O_2 -аналіз приладами, витратомірні схеми, ультразвукові детектори) та конструкторські рішення (різні типи ущільнень) покривають лише частину проблеми – вони дозволяють виявити та зменшити підсоси. На жаль, ці підходи не дають цілісного розуміння, яким чином інфільтроване повітря змінює роботу обортової печі як складної тепло-гідродинамічної системи.

Отже, існує чітко виражений науковий та практичний запит на комплексний підхід до дослідження впливу інфільтрованого повітря, який би поєднував:

- врахування підсосів повітря при визначенні теплового балансу та витрат палива;
- вплив на стабільність і параметри факелу;
- оцінку перевитрат енергетичних ресурсів в наслідок наявності підсосів.

Саме на вирішення цієї методологічної прогалини й доцільно спрямувати дослідження, формуючи більш повну картину причинно-наслідкових зв'язків між підсосами повітря, енергоємністю, надійністю та керованістю процесу випалу продукції в обортових печах.

Мета статті

Метою даної роботи є встановлення закономірностей впливу інфільтрованого повітря на роботу обортової печі.

Для досягнення мети розглядаються наступні завдання:

- аналіз природи та основних джерел виникнення інфільтрації в обертових печах;
- кількісний аналіз підсосів в залежності від тиску в печі, геометрії ущільнення і температурного режиму печі;
- розрахунок впливу інфільтрованого повітря на тепловий баланс печі та визначення величини перевитрат палива;
- дослідження змін характеристик факела та умов горіння палива при наявності неорганізованих підсосів;
- розробка рекомендацій щодо методів діагностики та усунення підсосів.

Матеріали та методи

В статті розглядаються результати моделювання за допомогою обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD) в програмному комплексі Ansys Fluent 2025 R2 (Student edition).

В якості об'єкту дослідження використовується тривимірна модель обертової печі з наступними характеристиками: внутрішній діаметр – 3,6 м, довжина – 75 м. Паливо – метан (CH₄) за нормальних умов, подається через дифузійний пальник з соплом 65 мм з масовою витратою $B_{\text{нал}} = 0,498$ кг/с (об'ємна витрата складає 2500 нм³/год). Повітря подається рівномірно по двом круглим каналам діаметром 1 м кожен по бокам пальника. Кількість повітря, що організовано подається в піч, складає $L_a = 9,81$ кг/с, при температурі 200°C. Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,15$. Розрідження на осі вихідного перетину розвантажувального («гарячого») кінця печі складає -50 Па. Підсоси повітря в піч моделюються через кільцеву щілину між «гарячою» головкою та корпусом печі розміром 50 мм.

В якості моделі для симуляції обрана модель горіння без попереднього змішування. В розрахунках використовується модель турбулентності k-ε, що враховує кінетичну енергію турбулентності (k) та швидкість її дисипації (ε). Для спрощення розрахунків стінки печі приймаються адіабатними. Розрахункова сітка складається з 1010188 елементів, середній розмір елементу – 0,14 м. Кількість розрахункових ітерацій складала 1000 кроків.

Сітка та 3D модель печі представлені на рис. 1.

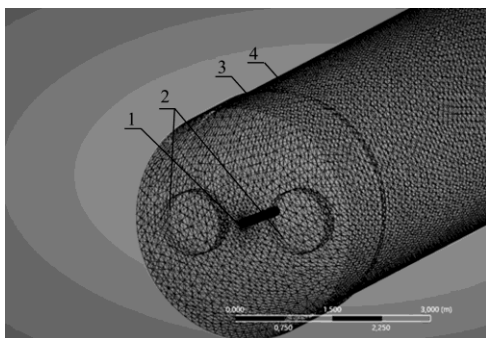


Рис. 1 – 3D модель та розрахункова сітка в Ansys
1 – пальник, 2 – канали подачі повітря, 3 – щілина в откратній головці, 4 – корпус печі

Виклад основного матеріалу

В обертових печах реалізується протиточний рух матеріалу та димових газів. Для забезпечення видалення продуктів згоряння палива та технологічного CO₂ у робочому просторі печі підтримується тиск, менший за атмосферний. Величина перепаду тиску варіюється від 50–100 Па біля «гарячої» головки печі до 200–300 Па перед підігрівачем («холодна» головка). Саме це розрідження і є головною причиною інфільтрації холодного повітря в робочий простір печі або запічних теплообмінників.

Як вже зазначалось раніше, обертова піч має значні габарити (довжина до 80 м) та рухомі частини. Забезпечення повної герметичності такої системи є дуже складним технічним завданням. За результатами джерела [10], основні місця та частка в загальному об'ємі підсосів холодного повітря наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Основні місця та частка інфільтрації повітря в обертових печах

Місце інфільтрації	Частка в загальному об'ємі підсосів
Торцеві ущільнення печі	18-22%
Оглядні люки та дверцята	10-15%
Підігрівачі сировини	15-20%
Пилоочисне обладнання	10-15%
Димосос	5-8%

Кількість інфільтрованого повітря, що поступає в піч через отвори, можна розрахувати за формулою для витоку рідини при низькому тиску:

$$V_{\text{инф}} = \mu \cdot F \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{\text{нов}}}} \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт витрати, який залежить від геометрії отвору (для щілин знаходиться в діапазоні 0,6–0,7; в подальших розрахунках приймається 0,65); ΔP – перепад тиску, Па; $\rho_{\text{нов}}$ – густина атмосферного повітря, кг/м³; F – площа отвору, м².

Площа F розраховується за формулою:

$$F = \frac{\pi \cdot (D_z^2 - D_n^2)}{4}, \text{ м}^2 \quad (2)$$

де D_z – внутрішній діаметр відкритої головки, дорівнює 3,7 м; D_n – зовнішній діаметр печі, дорівнює 3,6 м.

Відповідно формулі (2), площа щілини для заданих умов буде складати $F = 0,573$ м²

Згідно рівнянню (1) максимальна кількість повітря, що потрапляє в робочу зону печі з розрідженням 50 Па через негерметичну щілину між торцем печі та рухомим корпусом товщиною 50 мм, буде складати:

$$V_{\text{инф}} = 0,65 \cdot 0,573 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 50}{1,29}} = 3,279 \text{ м}^3/\text{с}$$

Кількість інфільтрованого повітря на годину складає $V_{inf} = 11804 \text{ м}^3/\text{год}$.

Відповідно до реакції окислення метану, на кожен м^3 метану потрібно 2 м^3 кисню. Враховуючи концентрацію кисню в повітрі на рівні 21%, теоретична кількість повітря на спалення 1 м^3 метану складає $L_0 = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

З урахуванням коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 1,15$ фактична кількість повітря на спалення метану дорівнює: $1,15 \cdot 9,52 = 10,95 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Витрати метану складають $2500 \text{ м}^3/\text{год}$, тож витрати повітря складуть: $2500 \cdot 10,95 = 27\,375 \text{ м}^3/\text{год}$ за нормальних умов або $47\,430 \text{ м}^3/\text{год}$ при $t = 200^\circ\text{C}$.

Таким чином через торцеву щілину «гарячого» кінця печі до робочого простору може поступати надлишкове повітря у кількості до 25% від необхідного, що більше за дані, наведені в табл. 1. Пов'язано це з тим, що в роботі [10] ширина щілин не однакова по всій дузі і додатково ізолювана ущільнювачем. Для більш точних розрахунків треба брати реальну площу отворів з урахуванням вище зазначеного.

Крім того, кількість інфільтрованого повітря по різних частинам щілини не є однаковою. Пов'язано це з різницею температур всередині ($t_n = 1100^\circ\text{C}$) та зовні печі (за нормальних умов). В наслідок суттєвого перепаду температур густина атмосферного повітря ($\rho_{зов} = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$) більше за густину димових газів ($\rho_{пз} = 0,247 \text{ кг}/\text{м}^3$) майже в 5,2 рази. Крім того, густина димових газів може залежити від точки заміру (по висоті печі).

Для більш точного розрахунку кількості підсосів, розіб'ємо кільцевий отвір по висоті на 12 частин, $0,3 \text{ м}$ заввишки кожна. На рис. 2 схематично зображено розподіл загальної площі щілини на сегменти.

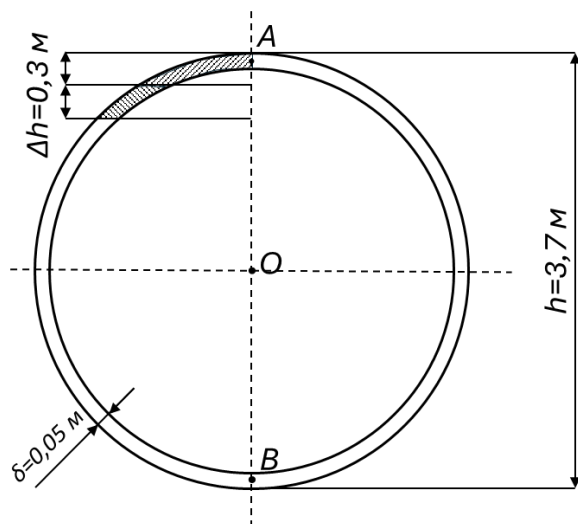


Рис. 2 – Схема сегментації щілини

Перепад тиску по висоті печі визначається за формулою:

$$\Delta P = (\rho_{зов} - \rho_{пз}) \cdot h \cdot g, \text{ Па}$$

Точка O (рис. 2) знаходиться по центру, розрідження в ній становить -50 Па . Відстань від центру до точок A і B дорівнює радіусу печі ($R = 3,7/2 = 1,85 \text{ м}$).

Оскільки точка A знаходиться вище центру, то перепад тиску тут буде менше і складе: $-50 + 18,93 = -31,07 \text{ Па}$.

А в точці B: $-50 - 18,93 = -68,93 \text{ Па}$.

Площа сегменту кільця розраховується за формулою:

$$F = \delta \cdot h \cdot \left| \arcsin\left(\frac{y_2}{R}\right) - \arcsin\left(\frac{y_1}{R}\right) \right|, \text{ м}^2$$

де δ – висота щілини, м; y_1 та y_2 – координати сегменту відносно центру кільця.

Повні результати розрахунків наведені в табл. 2.

Таблиця 2
Результати розрахунків підсосів повітря в розвантажувальній головці печі в залежності від висоти

№	Перепад тиску (ΔP), Па	Площа щілини (S), м^2	Об'ємна витрата (V), $\text{м}^3/\text{с}$	Об'ємна витрата (V), $\text{м}^3/\text{год}$	Відсоток від загальних витрат %
12 (точка A)	-31,07	0,1069	0,482	1736,0	14,86
11	-34,23	0,0466	0,221	794,5	6,80
10	-37,38	0,0376	0,186	670,1	5,74
9	-40,54	0,0335	0,173	622,1	5,33
8	-43,69	0,0315	0,168	605,9	5,19
7	-46,85	0,0306	0,169	609,4	5,22
центр	-50,00	0	0,0	0,0	0,0
6	-53,15	0,0306	0,180	649,2	5,56
5	-56,31	0,0315	0,191	687,9	5,89
4	-59,46	0,0335	0,209	753,5	6,45
3	-62,62	0,0376	0,241	867,3	7,42
2	-65,77	0,0466	0,306	1101,3	9,43
1 (точка B)	-68,93	0,1069	0,718	2585,6	22,13
Сума		0,5733	3,245	11682,8	100

Як можна побачити з табл. 2, на нижню частину щілини перепадає 22,13% від загальної кількості підсосів. Це обумовлено одразу двома факторами: найбільшим перепадом тиску – $-68,93 \text{ Па}$ та найбільшою площею сегменту – $0,1069 \text{ м}^2$. Крім того, необхідно звернути увагу, що такий розподіл кількості підсосів по висоті щілини справедливий за умови вимірювання перепаду тиску на осі вихідного перетину розвантажувального кінця печі (рис. 2, точка O).

Перепад тиску на загрузочному («холодному») кінці печі значно вищий. Це необхідно для подолання гідравлічного супротиву печі і видалення додаткової кількості технологічного CO_2 . Зазвичай в цій частині печі розрідження складає -200 Па , а температура димових газів – $600\text{--}700^\circ\text{C}$. За таких умов відношення густин атмосферного повітря ($\rho_{зов} = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$) до димових газів ($\rho_{вс} = 0,388 \text{ кг}/\text{м}^3$) буде меншим і складе близько 3,3. Тоді згідно формули (1) та геометричними розмірами відповідно рис. 2, отримаємо наступні результати розподілу інфільтрації по висоті на «холодному» кінці печі (табл. 3).

Таблиця 3

Результати розрахунків підсосів повітря на загрузочному кінці печі в залежності від висоти

№	Перепад тиску (ΔP), Па	Площа щілини (S), м ²	Об'ємна витрата (V), м ³ /с	Об'ємна витрата (V), м ³ /год	Відсоток від загальних витрат %
12 (точка А)	-183,85	0,1069	1,173	4222,8	17,88
11	-186,54	0,0466	0,515	1854,7	7,85
10	-189,23	0,0376	0,419	1507,8	6,39
9	-191,93	0,0335	0,376	1353,7	5,73
8	-194,62	0,0315	0,355	1278,8	5,42
7	-197,31	0,0306	0,347	1250,7	5,30
центр	-200,00	0	0,000	0,0	0,00
6	-202,69	0,0306	0,352	1267,6	5,37
5	-205,38	0,0315	0,365	1313,7	5,56
4	-208,07	0,0335	0,392	1409,5	5,97
3	-210,77	0,0376	0,442	1591,2	6,74
2	-213,46	0,0466	0,551	1984,0	8,40
1 (точка В)	-216,15	0,1069	1,272	4578,7	19,39
Сума		0,5733	6,559	23613,2	100

Як видно з розрахунків, найбільше підсосів також відбувається у верхньому та нижньому сегменті, через їх велику площу. Таким чином, через щілину в 50 мм на «холодному» кінці печі в агрегат може потрапляти до 23,6 тис. м³/год атмосферного повітря, що приблизно в 2 рази більше, ніж на «гарячому» кінці. Однак це надлишкове повітря суттєво впливає тільки на процеси теплообміну у підігрівачі.

Загальна ж кількість інфільтрованого повітря, що потрапляє в піч та димовий тракт, може досягати 35,2 тис. м³/год за нормальних умов.

На практиці замість розрахунків використовуються методи газового аналізу та інструментального обстеження.

Найбільш поширеним методом є розрахунок обсягу інфільтрованого повітря на основі зміни концентрації кисню між двома точками вимірювання. Формула, для розрахунку відсотку підсосів, згідно з джерелом [15], має вигляд:

$$\%V_{\text{инф}} = \frac{\%O_2^{\text{вих}} - \%O_2^{\text{вх}}}{20,99 - \%O_2^{\text{вих}}} \cdot 100, \% \quad (3)$$

де $\%O_2^{\text{вх}}$ – концентрація кисню на вході печі, %; $\%O_2^{\text{вих}}$ – концентрація кисню на виході, %; 20,99 – об'ємна частка кисню в атмосферному повітрі, %. Цей метод базується на припущенні, що на аналізованій ділянці не відбувається горіння (відсутність СО на вході). Наявність оксиду вуглецю ускладнює розрахунок, оскільки частина кисню витрачається на його згорання, що може призвести до заниження оцінки підсосів.

Згідно з даними моделювання, концентрація кисню в димових газах на виході печі за наявності максимальних підсосів може сягати 7,5% (рис. 3б). Тоді, відповідно рівнянню (3), надлишок інфільтрованого повітря складатиме: $\%V_{\text{инф}} = \frac{7,5-2}{20,99-7,5} \cdot 100 = 40,7\%$, що

перевищує попередні розрахунки на 15 базових пунктів.

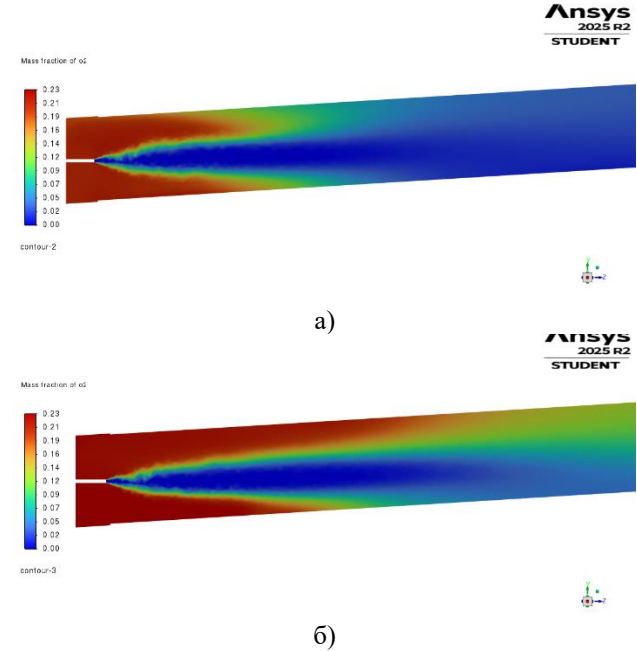


Рис. 3 – Концентрація O₂ в робочому просторі печі: а) без підсосів повітря; б) з підсосами повітря

Вплив підсосів повітря на тепловий баланс.

Потрапляючи в зону високих температур всередині печі (понад 1400°C), інфільтроване холодне повітря нагрівається, відбираючи значну частину корисної теплової енергії, призначеної для ендотермічної реакції кальцинації вапняку. А це, в свою чергу, призводить до зниження температури в печі.

По аналогії з формулою для розрахунку температури продуктів згорання в залежності від теплотворної здатності палива та коефіцієнта надлишку повітря [20], формула для визначення температури димових газів з урахуванням інфільтрованого повітря має вигляд:

$$t_{n3} = \frac{\alpha \cdot L_0 \cdot c_p^{\text{нов}} \cdot t_{\text{нов}} + c_p^{\text{р}} \cdot t_2 + Q_{\text{н.р.}} \cdot \eta_{\text{спал}} + \frac{V_{\text{инф}}}{V_2} \cdot c_p^{\text{инф}} \cdot t_{\text{инф}}}{(L_0 + 1) \cdot c_p^{\text{н3}} + (\alpha - 1) \cdot L_0 \cdot c_p^{\text{нов}} + \frac{V_{\text{инф}}}{V_2} \cdot c_p^{\text{инф}}}, \quad (4)$$

де L_0 – стехіометрична кількість повітря, необхідна для спалення 1 м³ палива, м³/м³; $c_p^{\text{нов}}$, $c_p^{\text{инф}}$, $c_p^{\text{р}}$, $c_p^{\text{н3}}$ – питомі теплоємності підігрітого повітря, інфільтрованого повітря, палива та димових газів відповідно, Дж/(м³·°C); $t_{\text{нов}}$, $t_{\text{инф}}$, t_2 – температури підігрітого повітря, інфільтрованого повітря та палива відповідно, °C, $Q_{\text{н.р.}}$ – нижча теплота згорання палива, МДж/м³; $V_{\text{инф}}$, V_2 – об'ємні витрати інфільтрованого повітря та палива, м³/с; $\eta_{\text{спал}}$ – ККД системи спалювання.

Результати розрахунків температурних полів в середині печі за допомогою CFD моделювання представлені на рис. 4.

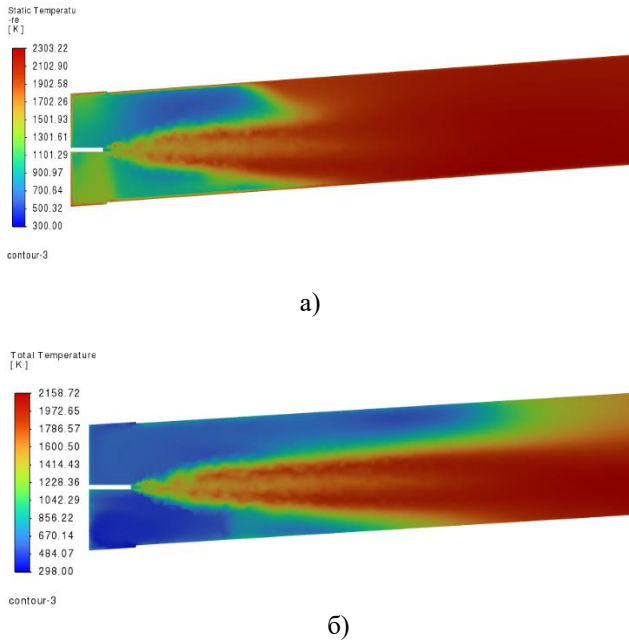


Рис. 4 – Температура в робочому просторі печі: а) без підсосів повітря; б) з підсосами повітря

Як видно з рис. 4б, підсоси атмосферного повітря значно знижують температуру в місцях їх виникнення. Окрім того, деякий час це повітря має нагріватись в робочому просторі, що значно погіршує теплообмін між димовими газами та матеріалом, що випалюється. Враховуючи, що основний вид теплообміну в обортових печах – випромінювання, навіть незначне зниження температури димових газів суттєво впливає на теплообмін і енергоефективність агрегату.

Щоб компенсувати падіння температури та нагріти інфільтроване повітря, доводиться збільшувати теплову потужність печі через спалення додаткової кількості палива. Перевитрати палива для компенсації падіння температури розраховуються за формулою:

$$V_{\text{дод}} = \frac{V_{\text{інф}} \cdot c_p^{\text{нов}} (t_{\text{вих}} - t_{\text{інф}})}{Q_{\text{н.р.}} \cdot \eta}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (5)$$

де $t_{\text{вих}}$, $t_{\text{інф}}$ – температури димових газів на виході печі та атмосферного повітря відповідно, °С.

Однак збільшення витрат палива запускає так зване «порочне коло» процесу інфільтрації повітря. Оскільки додаткове паливо потребує більше повітря для горіння, що призводить до різкого зростання загального об'єму газів в печі. Щоб видалити збільшений об'єм газів, димосос має збільшити потужність, а це, в свою чергу, підвищує розрідження в робочому просторі печі. Це призводить до ще більшого підсосу повітря через існуючі нещільності згідно з рівнянням (1). Крім того, при збільшенні витрат палива порушується відповідність зони максимальних температур факела та зони випалу. Це, в свою чергу, веде до зниження якості готової продукції. Тому для зменшення підсосів буде більш правильним спробувати знизити розрідження в печі. Якщо цього не достатньо, то знизити

подачу повітря з охолоджувача, контролюючи температуру матеріалу на виході.

Парадоксальним наслідком інфільтрації повітря може стати хімічний недопал. Це пояснюється погіршенням умов змішування і зниженням температури. У той час, як загальний коефіцієнт надлишку повітря α може бути високим (наприклад, $\alpha > 1,3$), локально в зоні горіння можуть утворюватися зони збідненої суміші або зони переохолодження. Поява СО у димових газах свідчить про втрати хімічної енергії палива. Кількість таких перевитрат визначається за рівнянням:

$$V_{\text{хім}} = V_{\text{г}} \cdot \frac{q_{\text{хім}}}{100 - q_{\text{хім}}}, \text{ м}^3 \quad (6)$$

де $q_{\text{хім}}$ – втрати тепла від хімічного недопалу палива, %, що розраховується за формулою:

$$q_{\text{хім}} = \frac{(12,65 \cdot \text{CO} + 10,8 \cdot \text{H}_2 + 35,8 \cdot \text{CH}_4) \cdot V_{\text{нз}}}{Q_{\text{н.р.}}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де CO , H_2 , CH_4 – об'ємні долі відповідних елементів у продуктах згорання, %; $V_{\text{нз}}$ – теоретичний об'єм продуктів згорання, м^3 .

Нестабільність надходження інфільтрованого повітря викликає нерівномірність розподілу СО в робочому просторі печі, що змушує операторів тримати ще вищий «запас» повітря, додатково знижуючи енергоефективність роботи печі.

Розподіл концентрації СО всередині печі, отриманий в результаті CFD моделювання (рис. 5б) підтверджує вплив інфільтрації повітря на локальне збільшення СО.

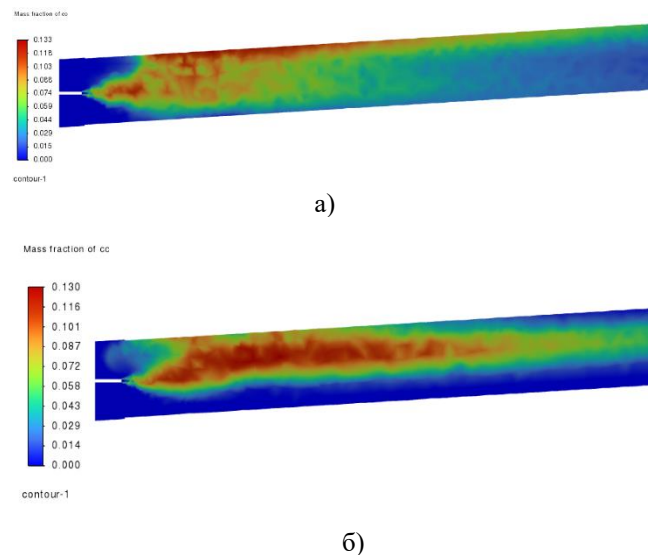


Рис. 5 – Концентрація СО в робочому просторі печі: а) без підсосів повітря; б) з підсосами повітря

Вплив інфільтрації на аеродинаміку факелу.

Сучасні пальники обортових печей формують складну аеродинаміку факела з зонами внутрішньої та зовнішньої рециркуляції. Ці зони необхідні для стабілізації полум'я, підмішування гарячих продуктів згорання до кореня факела і підтримці стабільного

процесу горіння. Неорганізовані потоки інфільтрованого повітря, особливо ті, що надходять через ущільнення гарячої голівки печі, можуть руйнувати ці рециркуляційні зони.

Оскільки підсоси часто відбуваються нерівномірно (наприклад, більше знизу через швидший знос ущільнення, більшу площу отвору та вище розрідження), це призводить до викривлення факела, його «прибивання» до верху футеровки або шару матеріалу.

Надлишок холодного повітря уповільнює кінетику горіння, розтягуючи процес у просторі. Факел стає довгим (рис. 4б), «млявим» і менш інтенсивним. Це призводить до перегріву корпусу печі в перехідних зонах та зміщення зони спікання ближче до загрузочного кінця печі, що вимагає збільшувати час перебування матеріалу в печі і зменшує її продуктивність.

Вплив підсосів повітря на гідравлічний режим.

Гідравлічний режим печі визначає умови руху газів та матеріалу. Стабільність розрідження по довжині печі є запорукою оптимального режиму роботи. Як зазначалося раніше, інфільтрація збільшує об'єм газів, що проходять через піч. При незмінному поперечному перерізі це призводить до зростання лінійної швидкості потоку димових газів. Швидкості газів можуть зрости з оптимальних 10–12 м/с до 15–18 м/с і вище, що призводить до збільшення пиловиносу дрібних частинок матеріалу. Підвищене пиловинесення порушує теплообмін (пил виступає «шторкою», поглинаючи теплові радіаційні потоки), збільшує навантаження на циклони та фільтри, прискорює абразивний знос газоходу та димососу та може суттєво впливати на продуктивність агрегату.

Як зазначалось раніше, кількість та розподіл інфільтрованого повітря не є постійними величинами. Ці коливання викликають постійні зміни тиску в печі. Система автоматичного регулювання розрідження (через шибєр або частотний перетворювач навантаження димососа) намагається компенсувати ці зміни, проте часто входить у резонанс або запізнюється. Це призводить до режиму «дихання» печі – періодичних коливань тиску, які порушують нормальну роботу. Щоб стабілізувати розрідження в печі, автори **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** пропонують використовувати методи машинного навчання для прогнозування та контролю коливань тиску, спричинених зміною витрат первинного та вторинного повітря, а також підсосів. В результаті роботи дослідникам вдалось зменшити коливання тиску в печі з 31 до 9 Па, що також забезпечило стабілізацію температури в печі.

Вплив інфільтрації на роботу димососу.

Додаткова кількість димових газів, що утворюються в результаті підсосів атмосферного повітря, значно збільшують навантаження на димосос.

Формула для розрахунку потужності на валу N має вигляд:

$$N = \frac{V_{пз} \cdot \Delta p}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{дм}}, \text{ кВт} \quad (8)$$

де $V_{пз}$ – витрати димових газів, м³/год; Δp – загальний аеродинамічний опір димового тракту, Па; $\eta_{дм}$ – загальний ККД димососа. Оскільки аеродинамічний опір системи зростає пропорційно квадрату витрат ($\Delta p \sim V_{пз}^2$), споживана потужність димососом зростає пропорційно третього ступеня кількості димових газів:

$$N \sim V_{пз}^3. \quad (9)$$

Додавання 34,8 тис. м³/год (н.у.) або 73 тис. м³/год (за $t = 300^\circ\text{C}$) інфільтрованого повітря збільшує кількість димових газів ($V_{пз} = 28,7$ тис. м³/год за н.у. або 60,2 тис. м³/год за $t = 300^\circ\text{C}$) у 2,2 разу. Відповідно до рівняння (9) потужність на валу димососа збільшиться у 10,6 разів.

Шляхи усунення інфільтрації повітря.

Не зважаючи на відсутність комплексного аналізу впливу інфільтрованого повітря на ефективність роботи агрегату, на практиці існують практичні заходи для зменшення підсосів. Серед найбільш відомих можна зазначити наступні заходи:

1. Модернізація ущільнень, що включає заміну традиційних лабіринтних або пелюсткових ущільнень на сучасні графітові блочні [17]. Графіт забезпечує відмінне ковзання по гарячому металу, компенсує радіальне биття корпусу печі та витримує температури до 1260°C без втрати герметичності.

2. Впровадження інтелектуальних систем керування тиском в печі (наприклад, на базі PID-регуляторів або нейронних мереж) **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** дозволяє підтримувати стабільне розрідження в печі, мінімізуючи його коливання. Оптимально підтримувати мінімально можливе розрідження в голівці печі (наприклад, -10...-20 Па). Зменшення розрідження з 50 Па до 20 Па знизить підсоси в 1,58 рази згідно з рівнянням (1).

3. Використання портативних газоаналізаторів та тепловізорів для виявлення «холодних плям» на корпусі, що свідчать про локальні підсоси через футеровку. Для усунення підсосів через фланці, люки та тріщини в обмурівці використовуються спеціалізовані високотемпературні герметики та компаунди [15]. Ці матеріали здатні витримувати температурні розширення та вібрації, забезпечуючи довготривалу герметичність статичних з'єднань.

Висновки

У роботі виконано комплексне дослідження впливу інфільтрованого повітря на параметри роботи оборотної печі з урахуванням теплових, гідродинамічних та аеродинамічних аспектів.

Наукова новизна результатів полягає в тому, що вперше встановлено кількісну залежність розподілу підсосів повітря по перерізу щілини від висоти печі. Показано, що інфільтрація має суттєво нерівномірний

характер: максимальні підсоси припадають на нижній сегмент щілини, де поєднуються найбільші значення перепаду тиску та площі. Доведено, що результати розрахунків критично залежать від вибору точки вимірювання розрідження, що необхідно враховувати при проведенні енергоаудиту та інженерних розрахунків.

Для дослідження параметрів роботи печі, процесів горіння та впливу підсосів використано методи обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD), реалізовані в програмному комплексі Ansys Fluent. Це дозволило отримати якісну картину розподілу температур, концентрацій O_2 та CO , а також виявити локальні ефекти, які неможливо визначити за допомогою спрощених балансових методик. Однак результати CFD-моделювання мають попередній характер і потребують подальшого уточнення. Зокрема, необхідно врахувати реальні граничні умови, тепловтрати через корпус печі, нестационарність процесів, а також більш детальну геометрію ущільнень і зони інфільтрації.

Встановлено, що кількість інфільтрованого повітря є значною та може досягати для заданих умов:

- до 11,7 тис. m^3 /год через «гарячий» кінець печі, що становить до 25% і більше від об'єму повітря, необхідного для горіння палива;
- до 23,6 тис. m^3 /год через «холодний» кінець;
- сумарно – до 35,2 тис. m^3 /год. Це підтверджує суттєвий вплив підсосів на тепловий баланс та газодинаміку агрегату.

Аналіз отриманих графічних результатів (рис. 3–5) показав, що:

- підсоси призводять до локального зниження температури та погіршення умов теплообміну;
- відбувається деформація та подовження факела, що зміщує зону випалу;
- зростає нерівномірність розподілу кисню, що викликає локальні зони неповного згоряння (підвищення CO).

Встановлено, що інфільтрація повітря суттєво впливає на роботу димососа:

- збільшення загального об'єму димових газів у 2,2 рази призводить до зростання споживаної потужності на валу димососу у 10,6 рази. Що викликає значне підвищення енергоспоживання та навантаження на газоочисне обладнання;
- зростання кількості газів призводить до підвищення швидкостей потоку всередині печі та інтенсифікації пиловиносу.

Таким чином, інфільтрація повітря є критичним фактором, що визначає енергоефективність, стабільність та продуктивність обортових печей. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методів діагностики підсосів, оптимізації режимів роботи та підвищення енергетичної ефективності промислових агрегатів.

Перелік використаних джерел

- [1] Gebreslassie M., Gebrelibanos K., Belay S. Energy consumption and saving potential in cement factory: thermal energy auditing. *AFRREV STECH: An international journal of science and technology*. 2018. № 7(2), Pp. 92–106. DOI: <https://doi.org/10.4314/stech.v7i2.9>.
- [2] A critical review on energy use and savings in the cement industries / Madlool N. A., Saidur R., Hossain M.S., Rahimb N.A. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol 15, iss. 4. Pp. 2042–2060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>.
- [3] Осіпова Л. Модернізація промисловості України в контексті євроінтеграції у воєнний та повоєнний період. *International science journal of management, economics & finance*. 2025. № 4(4). С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjmf.20250404.03>.
- [4] Ecodesign for Sustainable Products Regulation. URL: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en (дата звернення: 11.02.2026).
- [5] Ленцов І. А., Сущенко А. В., Ленцов Д. І. Тепловой баланс вращающейся печи для обжига известняка и его анализ. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2014. № 29. С. 103–115.
- [6] Гупало Є. В., Здоровиченко С. А., Седнев А. Ю., Гупало В. І. Використання пиловугільного палива для випалу вапняку в обортових печах. *Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії*: колективна монографія : у 2 кн. Кн. 2 / за заг. ред. Ю. С. Пройдака. Дніпро : Нова ідеологія, 2017. С. 79–84.
- [7] Akwasi A. Boateng. Rotary kilns. Elsevier, 2008. 347 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7877-3.x5001-6>.
- [8] «False Air»: The silent threat to thermal efficiency in kilns and grinding systems. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/false-air-silent-threat-thermal-efficiency-kilns-grinding-juan-ortega-lqm7f/> (дата звернення: 11.01.2026).
- [9] Execution and evaluation of kiln performance tests : specification Vt 10 / German association of cement works (VDZ). 1992.
- [10] Castro M. False air in the cement manufacturing process. URL: <https://motofrenos.com/wp-content/uploads/2023/04/False-Air-in-Cement-Manufacturing-Process.pdf> (дата звернення: 11.01.2026).
- [11] Shahin H., Hassanpour S., Saboonchi A. Thermal energy analysis of a lime production process: Rotary kiln, preheater and cooler. *Energy conversion and management*. 2016. Vol 114. Pp. 110–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.017>
[Incr easing](#).

- [12] Energy efficiency and reducing emissions from China's cement kilns : audit report of two cement plants in Shandong province, China / L. Price et al. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011. 45 p.
- [13] Influence of air infiltration on combustion process changes in a rotary tilting furnace / R. Dzurňák et al. *Processes*. 2020. Vol. 8, № 10. Article 1292. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8101292>.
- [14] Nial M., Loukarfi L., Naji H. Aerodynamic control of a diffusion flame to optimize materials' transition in a rotary cement kiln. *Mechanics & Industry*. 2020. № 21. Article 414. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2020043>.
- [15] Sharma K. Energy efficiency through «false air reduction». *Indian cement review*. 2021. Pp. 28–34.
- [16] Hashemi M., Ajam M. Investigation of environmental emissions reduction in a rotary cement kiln. *Iranian journal of chemistry and chemical engineering*. 2026. Vol. 45(1). Pp. 181–191. DOI: <https://doi.org/10.30492/ijcce.2025.2059951.7103>.
- [17] What are the common kiln seals. URL: <https://rotarykilnfactory.com/what-are-the-common-kiln-seals/> (дата звернення: 11.01.2026).
- [18] Set of graphite block seal for rotary kiln and method of use : pat. WO 2022/119507 A1 International Bureau. Date of publication 09.06.2022.
- [19] d'Hubert X. Seals for cement kilns. *Global cement magazine*. November 2023. Pp. 16–18.
- [20] Грудз Я. В., Гоцуляк В. П., Криль М. Я. Температура горіння природного газу як критерій енергоефективності. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 1(66). С. 7–11.
- [21] Choudhary P. Pressure measurement and control in rotary kilns at TATA Sponge Iron Limited (TSIL). Asia Steel 2018 : Conference, Bhubaneswar, Orissa, India, 6–9 February 2018. Pp. 1–4.

A STUDY OF THE EFFECT OF INFILTRATED AIR ON THE HYDRAULIC OPERATING CONDITIONS OF ROTARY KILNS

Lentsov I.A.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi 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 «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3476-6767>, e-mail: umrikhin_m_o@aspirants.pstu.edu

This paper presents a study of the effect of infiltrated (false) air on the operating parameters of rotary kilns used in lime and cement clinker production. Special attention is given to uncontrolled air ingress through leakages, which significantly affects energy efficiency and process stability. The scientific novelty of the work lies in the first detailed investigation of the distribution of air infiltration along the kiln cross-section as a function of height. It is shown that air ingress is highly non-uniform and depends on both the local pressure gradient and the geometric characteristics of leakage zones. The study demonstrates that calculated infiltration rates are strongly dependent on the reference point of draft measurement, which introduces significant uncertainty in traditional engineering assessments and highlights the need for more precise methodologies. The study combines analytical methods with Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling using Ansys Fluent. Analysis of simulation results indicates that infiltrated air leads to local cooling zones, distortion and elongation of the flame, deterioration of heat transfer conditions, and formation of regions with incomplete combustion (increased CO concentration). Additionally, infiltration significantly alters the aerodynamic and hydraulic regimes, increasing gas velocities and promoting dust carryover. The results indicate that infiltrated air can reach up to 35.2 thousand m³/h, which corresponds to the required combustion air. It is shown that infiltration causes local cooling, flame distortion, heat transfer deterioration, and formation of incomplete combustion zones. It also significantly increases gas flow rates and disrupts the hydraulic regime. A substantial increase in load on the induced draft fan is observed: a 2.2-fold increase in gas volume may lead to more than a tenfold rise in power consumption. The obtained results can be used to improve diagnostics of air infiltration and increase the energy efficiency of rotary kilns.

Keywords: rotary kilns; cement clinker; lime; infiltration air; heat balance; hydraulic regime.

References

- [1] M. Gebreslassie, K. Gebrelibanos, and S. Belay, "Energy consumption and saving potential in cement factory: thermal energy auditing," *AFRREV STECH: An international journal of science and technology*, № 7(2), pp. 92–106, 2018. doi: [10.4314/stech.v7i2.9](https://doi.org/10.4314/stech.v7i2.9).
- [2] N. A. Madlool, R. Saidur, M. S. Hossaina, and N. A. Rahimb, "A critical review on energy use and savings in the cement industries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 15, iss. 4, pp. 2042–2060, 2011. doi: [10.1016/j.rser.2011.01.005](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005).
- [3] L. Osipova, "Modernizatsiia promyslovosti Ukrainy v konteksti yevrointehratsii u voiennyi ta povoiennyi period" ["Modernization of Ukraine's Industry in the Context of European Integration During the Wartime and Post-War Period"], *International science journal*

- of management, economics & finance, № 4(4), pp. 27–34, 2025. doi: 10.46299/j.isjmef.20250404.03. (Ukr.)
- [4] Ecodesign for Sustainable Products Regulation. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en. Accessed on: February 11, 2026.
- [5] I. A. Lentsov, A. V. Sushchenko, and D. I. Lentsov, “Тепловой баланс вращающейся печи для обжига известняка и его анализ” [“Heat balance of the rotary kiln for the limestone burning and its analysis”], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, № 29, pp. 103–115, 2014. (Rus.)
- [6] Ye. V. Hupalo, S. A. Zdorovychenko, A. Yu. Sedniev, and V. I. Hupalo, “Vykorystannia pylovuhilnoho palyva dlia vypalu vapniaku v obertovykh pechakh” [“Use of pulverized coal fuel for limestone firing in rotary kilns”], in *Teplotekhnika, enerhetyka ta ekolohiia v metalurhii* [Heat engineering, energy and ecology in metallurgy], book 2, Y. S. Proidak, Ed. Dnipro, Ukraine: Nova Ideolohiia Publ., 2017, pp. 79–84. (Ukr.)
- [7] A. A. Boateng, *Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes*. Oxford, UK: Elsevier, 2008. doi: 10.1016/B978-0-7506-7877-3.X5001-6.
- [8] «False Air»: The silent threat to thermal efficiency in kilns and grinding systems. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/false-air-silent-threat-thermal-efficiency-kilns-grinding-juan-ortega-lqm7f/> (дата звернення: 11.01.2026).
- [9] *Execution and Evaluation of Kiln Performance Tests*, VDZ Specification Vt 10, German Association of Cement Works (VDZ), 1992.
- [10] Castro M. False air in the cement manufacturing process. [Online]. Available: <https://motofrenos.com/wp-content/uploads/2023/04/False-Air-in-Cement-Manufacturing-Process.pdf>. Accessed on: February 11, 2026.
- [11] H. Shahin, S. Hassanpour, and A. Saboonchi, “Thermal energy analysis of a lime production process: Rotary kiln, preheater and cooler,” *Energy Conversion and Management*, vol. 114, pp. 110–121, Apr. 2016. doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.017.
- [12] L. Price, A. Hasanbeigi, N. Zhou, A. Thekdi, and W. Lan, “Energy efficiency and reducing emissions from China’s cement kilns: Audit report of two cement plants in Shandong province, China,” China Energy Group, Lawrence Berkeley Nat. Lab., Berkeley, CA, USA, Rep. LBNL-4902E, 2011.
- [13] R. Dzurňák et al., “Influence of air infiltration on combustion process changes in a rotary tilting furnace,” *Processes*, vol. 8, no. 10, article 1292, 2020. doi: 10.3390/pr8101292.
- [14] 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.
- [15] K. Sharma, “Energy efficiency through ‘false air reduction,’” *Indian Cement Review*, pp. 28–34, 2021.
- [16] M. Hashemi, and M. Ajam, “Investigation of environmental emissions reduction in a rotary cement kiln,” *Iranian journal of chemistry and chemical engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 181–191, 2026. doi: 10.30492/ijcce.2025.2059951.7103.
- [17] What are the common kiln seals. [Online]. Available: <https://rotarykilnfactory.com/what-are-the-common-kiln-seals/>. Accessed on: February 11, 2026.
- [18] “Set of graphite block seal for rotary kiln and method of use,” WO Patent 2022/119507 A1, 2022, Jun. 9, 2022.
- [19] X. d’Hubert, “Seals for cement kilns,” *Global Cement Magazine*, pp. 16–18, 2023.
- [20] Ya. V. Hrudz, V. P. Hotsuliak, and M. Ya. Kryl, “Temperatura horinnia pryrodnoho hazu yak kryterii enerhoefektyvnosti” [“Natural gas combustion temperature as a criterion for energy efficiency”], *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch – Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, № 1(66), pp. 7–11, 2018. (Ukr.)
- [21] P. Choudhary, “Pressure measurement and control in rotary kilns at TATA Sponge Iron Limited (TSIL),” in *Proc. Asia Steel 2018 Conf.*, Bhubaneswar, Orissa, India, Feb. 6–9, 2018, pp. 1–4.

Стаття надійшла 18.02.2026

Стаття прийнята 11.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Ленцов І. А., Умріхін М. О. Дослідження впливу інфільтрованого повітря на параметри роботи обертових печей. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359926>.

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.852:004.891:338.27

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359931

ПРОГНОЗУВАННЯ УСПІШНОСТІ В2В-ЗАМОВЛЕНЬ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОСТІ: ОЦІНКА СТІЙКОСТІ АРХІТЕКТУР МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДО КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ДРЕЙФУ

Мірошниченко
С.О.

аспірант, ст. викладач, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ
ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4868-3006>, e-mail:
serhii.miroshnychenko@mipolytech.education

Прогнозування успішності В2В-замовлень є критичним завданням у системах планування ресурсів підприємства (ERP). Традиційні моделі пакетного навчання демонструють стійку вразливість до концептуального дрейфу, спричиненого макроекономічними збуреннями або зміною поведінкових патернів контрагентів. У статті порівнюється прогностична ефективність алгоритмів статичного пакетного та потокового навчання на масиві з 86 786 В2В-транзакцій реальної промислової ERP-системи. Бенчмаркінг охопив 15 алгоритмів: оптимізовані ансамблі дерев (XGBoost, LightGBM, Random Forest), лінійні та імовірнісні моделі, а також інкрементальні потокові архітектури, зокрема Adaptive Random Forest з екосистеми River. Оцінювання проводилось у двох режимах: глобальне тестування на стаціонарних вибірках та преквенційна симуляція для відтворення структурних зсувів у даних. Окремо досліджено вплив порядкового та циклічного кодування часових ознак. Встановлено, що циклічне кодування систематично знижує роздільну здатність алгоритмів на базі дерев рішень через ускладнення ортогональних розбиттів; порядкове кодування є оптимальним для таких архітектур. За стаціонарних умов пакетні моделі демонструють вищу глобальну точність (XGBoost, ROC-AUC = 0,9039). Однак під час симуляції макроекономічних збурень дискретність перенавчання знижує Recall пакетної моделі до ~60%, а частку хибних класифікацій підвищує до 35–36%. Потокова модель River ARF_Prequential завдяки потранзакційній адаптації утримує частку помилок у межах 14–17% та Recall > 0,95. Результати підтверджують наявність компромісу між точністю пакетних і реактивністю поточкових моделей, що обґрунтовує розробку гібридних прогностичних архітектур для промислових ERP.

Ключові слова: машинне навчання; прогнозування успішності; потокове навчання; концептуальний дрейф; ансамблі дерев рішень; преквенційна симуляція; ERP-системи; обробка часових ознак.

Постановка проблеми

Інтеграція ERP-систем з методами машинного навчання відкриває можливості для переходу від ретроспективного аналізу до предиктивного управління продажами. Одним із ключових завдань у цьому контексті є прогнозування успішності замовлень – завчасна ідентифікація ризику відмови або збиткового закриття угоди.

Практичне впровадження класичних ML-алгоритмів стикається з фундаментальною проблемою деградації прогностичної здатності в часі внаслідок концептуального дрейфу. Моделі пакетного навчання оптимізуються на накопиченій історичній вибірці і потребують повного перенавчання при зміні статистичних характеристик вхідних даних. Хоча системи моніторингу дрейфу дозволяють виявляти момент зсуву, перенавчання залишається ресурсомістким і вносить часовий лаг між появою нових патернів і оновленням прогностичної логіки. В умовах зовнішніх макроекономічних збурень або швидкої зміни поведінки контрагентів цей лаг призводить до суттєвого зростання кількості хибних рішень.

Альтернативою є потокові архітектури, здатні оновлюватися інкрементально після кожної нової транзакції. Окремим відкритим питанням залишається вибір методу кодування часових ознак, що може суттєво впливати на стійкість моделей за умов збурень вхідного розподілу. Дослідження цих факторів у промисловому ERP-контексті становить предмет цієї роботи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні дослідження у сфері предиктивної аналітики В2В-транзакцій охоплюють три відносно ізольовані напрями: бенчмаркінг алгоритмів пакетного навчання, адаптація до концептуального дрейфу методами потокового навчання та кодування часових ознак.

Ансамблеві методи на базі дерев рішень (XGBoost, LightGBM, Random Forest) стабільно перевершують лінійні та метричні алгоритми на гетерогенних табличних даних ERP-систем [1, 2] і визнані стандартом для скорингу В2В-лідів [3]. Їхнім принциповим обмеженням є припущення стаціонарності розподілу ознак. Автори [4] емпірично показали, що за умов зовнішніх макроекономічних збурень точність таких

моделей різко знижується, а регулярне перенавчання стає запізнілим і ресурсомістким.

Для подолання концептуального дрейфу дослідники звертаються до методів потокового навчання, які обробляють транзакції послідовно й оновлюють параметри інкрементально без збереження повної історичної вибірки [5]. Базовим інструментом є Дерева Хефдінга [6]; їхнім розвитком – Adaptive Random Forest (ARF), який поєднує детектор дрейфу ADWIN з механізмом заміни застарілих дерев фоновими [7]. Стандартом реалізації потокових конвеєрів у Python є бібліотека River [8]. Валідація таких моделей здійснюється через преквенційну оцінку: кожен запис спочатку тестує модель, а потім використовується для оновлення її параметрів, що унеможливує витік даних [9, 10].

Часові змінні є невід'ємним компонентом автоматизованих конвеєрів прогнозування [11], проте їх стандартне порядкове представлення проєктує циклічні величини на скалярну вісь, створюючи штучний розрив між останнім і першим значенням циклу [12]. Циклічне кодування через $\sin/\cos$ -перетворення зберігає метричну неперервність [13]. Однак алгоритми на базі дерев рішень будують ортогональні границі розбиття, тому апроксимація кола в просторі $\sin/\cos$ вимагає складних ієрархічних структур і може погіршувати якість моделі [12, 14]. Автори [15] зафіксували зростання точності ансамблів при синусоїдальному кодуванні на 12,6%, проте дослідження охоплювало лише енергетичні часові ряди без включення потокових алгоритмів.

У сучасних дослідженнях відсутні уніфіковані порівняльні експерименти, що одночасно охоплюють широкий спектр пакетних і потокових алгоритмів, обидва методи кодування часових ознак та преквенційну симуляцію на реальних ERP-даних великого масштабу. Вивчення того, як методи кодування часу здатні пом'якшувати агресивний концептуальний дрейф в індустріальних конвеєрах прогнозування замовлень, є фундаментальною метою та обґрунтуванням актуальності запропонованої роботи.

Мета статті

Метою дослідження є комплексне порівняння ефективності пакетних і потокових архітектур машинного навчання у задачі бінарної класифікації успішності B2B-замовлень на реальних ERP-даних з акцентом на методи кодування часових ознак і стійкість до концептуального дрейфу.

Для досягнення цієї мети вирішувались такі завдання:

- оцінка впливу порядкового та циклічного кодування часових ознак на точність пакетних і потокових алгоритмів;
- проведення преквенційної симуляції виробничого середовища для порівняння динамічної адаптивності алгоритмів в умовах зовнішніх макроекономічних збурень;

- визначення меж ефективності онлайн-алгоритмів River порівняно з пакетними моделями для задачі безперервного ERP-скорингу.

Матеріали та методи

Емпіричну базу становлять 86 786 B2B-транзакцій реальної промислової ERP-системи. Цільова змінна – бінарний маркер успішності замовлення (`is_successful`): клас «1» відповідає закритій угоді, клас «0» – скасуванню або критичній втраті маржинальності.

Предиктори охоплюють кілька категорій ознак. Фінансові показники включають суму замовлення, середню ціну позиції та історичні метрики контрагента: загальний середній чек, середній чек успішних і неуспішних угод. Кількісні характеристики представлені обсягом і кількістю унікальних позицій та кількістю рядків чеку. Комунікаційні та операційні метрики відображають кількість повідомлень і змін у замовленні як на рівні окремої угоди, так і в розрізі контрагента. Надійність контрагента формалізована через частку успішних угод, загальну кількість замовлень і тривалість співпраці в днях. Часові метрики включають інтервал від попереднього замовлення та мітку часу створення транзакції. Пропущені значення інтервальних метрик імпутовані значенням «-1»; для фіксації першої взаємодії клієнта введено бінарний прапор `is_first_order`.

На основі наявних предикторів згенеровано додаткові розрахункові ознаки: відношення суми замовлення до середнього чеку контрагента, вартість на рядок чеку, коефіцієнт інтенсивності обговорення та відношення середньої ціни продукту до середнього чеку контрагента.

Часові ознаки (година, день тижня, місяць і день місяця) кодувались двома альтернативними способами. Порядкове кодування представляє компоненти дати як скалярні змінні, що спричиняє штучний розрив на стику циклу: відстань між 23:00 та 00:00 у просторі ознак є максимальною, попри їх хронологічну суміжність. Циклічне кодування усуває цю проблему через тригонометричне відображення за формулою $\sin(2\pi \cdot t/T)$ та $\cos(2\pi \cdot t/T)$, де $T \in \{24, 7, 12, 31\}$, зберігаючи метричну неперервність на межах циклу. Обчислення реалізовано засобами бібліотеки NumPy для забезпечення сумісності з обома класами алгоритмів – пакетними ансамблями та потоковими конвеєрами.

До бенчмаркінгу залучено п'ятнадцять алгоритмів, розподілених на дві групи. Пакетна група охоплює одинадцять моделей: ансамблі на базі дерев рішень (XGBoost, LightGBM, Random Forest, Bagging, AdaBoost, Decision Tree), а також MLP, SVM, KNN, Naive Bayes та Logistic Regression. Потокова група представлена чотирма алгоритмами екосистеми River: Hoeffding Tree, Hoeffding Tree Prequential, Adaptive Random Forest та ARF Prequential.

Глобальний бенчмаркінг здійснювався на хронологічно розподіленому масиві: 70% записів – навчальна вибірка, по 15% – валідаційна і тестова. Моделі оцінювались за показниками ROC-AUC, F1, Accuracy, Precision, Recall, часткою хибних класифікацій і часом навчання.

Преквенційна симуляція охоплювала 75 629 транзакцій за період з липня 2018 по листопад 2024 року. До симуляції відібрано XGBoost та River ARF_Prequential як моделі з найвищим ROC-AUC у своїх класах. Обидві моделі ініціалізовані на масиві даних тривалістю один рік. Надалі XGBoost формував прогнози протягом кожного місяця, після чого перенавчався на всій накопиченій вибірці. River ARF_Prequential після кожної транзакції спочатку формував прогноз, а потім інкрементально оновлював параметри без доступу до повної історії. Такий дизайн відтворює реальні умови промислового скорингу і дозволяє об'єктивно порівняти поведінку архітектур в

умовах збурення характеристик вхідного потоку даних.

Виклад основного матеріалу

Оцінювання продуктивності на стаціонарній вибірці підтверджує перевагу ансамблевих архітектур над лінійними та метричними класифікаторами. За показниками Accuracy (рис. 1) і Precision (рис. 2) найвищі результати серед усіх 15 алгоритмів показав River_ARF_Prequential (0,9074 і 0,8994 відповідно) – однак його перевага над пакетними моделями частково зумовлена преквенційним режимом оновлення безпосередньо під час тестування. Серед суто пакетних алгоритмів лідирують Random Forest (Accuracy = 0,8788), LightGBM (0,8627) та XGBoost (0,8589). Традиційні класифікатори – SVM (0,7732), NaiveBayes (0,7617), Logistic Regression (0,6679) – суттєво поступаються за обома показниками.

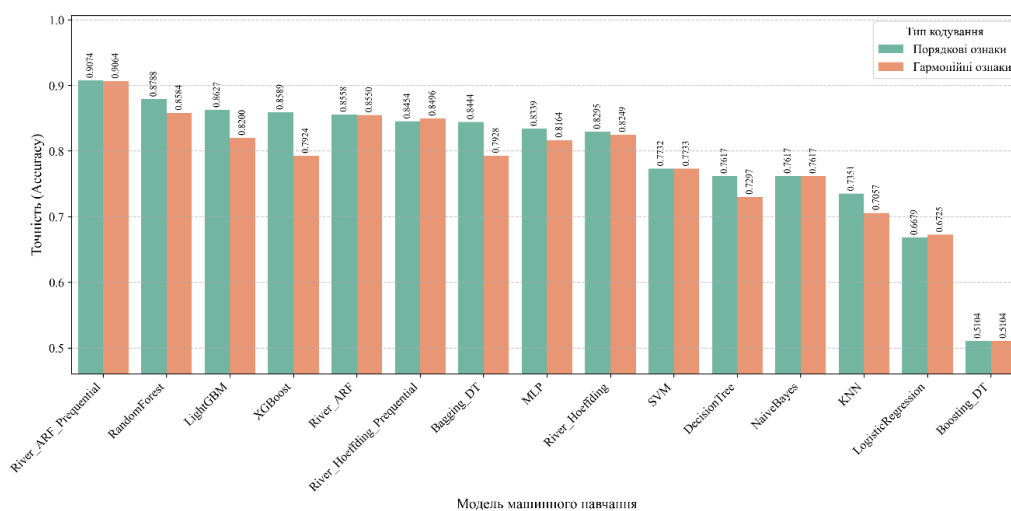


Рис. 1 – Показники моделей: точність (Accuracy)

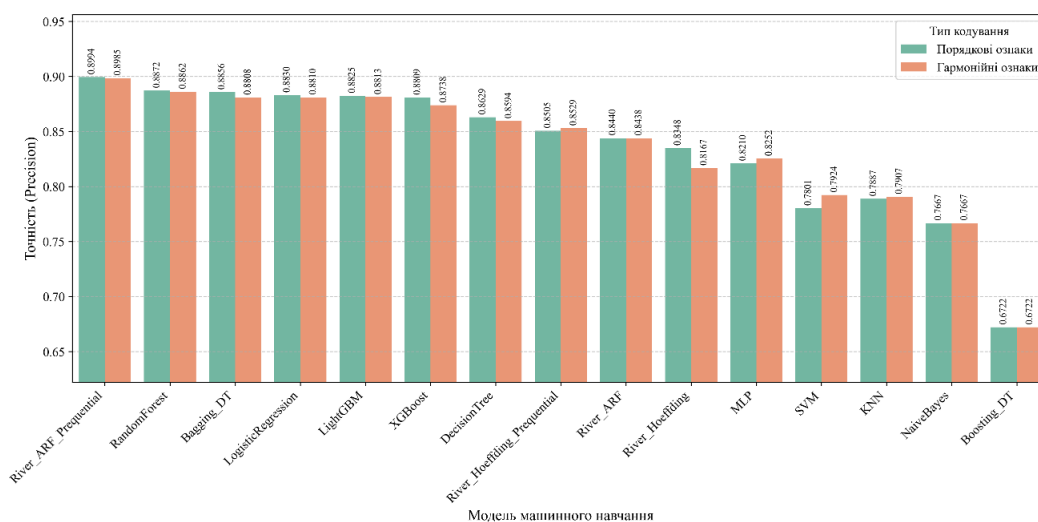


Рис. 2 – Показники моделей: точність (Precision)

Значення метрики Recall розподіляються інакше (рис. 3): найвищу повноту демонструють MLP (0,985) та потокові моделі River ARF (0,982) і ARF_Prequential (0,9817). Класичні пакетні ансамблі мають помірніші значення: Random Forest – 0,954, LightGBM – 0,934, XGBoost – 0,931. Висока повнота MLP, NaiveBayes (0,9634) і SVM (0,9555) досягається за рахунок підвищеної кількості хибнопозитивних рішень, що знижує їх точність (Precision) до 0,76-0,82 (рис. 2). Потокові архітектури зберігають баланс між обома цими метриками: River_ARF_Prequential поєднує Recall 0,9817 з Precision 0,8994.

Інтегральний показник F1-міри (рис. 4) найвищий у River_ARF_Prequential (0,9388), далі – Random Forest (0,9192), River_ARF (0,9078), LightGBM (0,9077), XGBoost (0,9050). За ROC-AUC аналогічна ієрархія

(рис. 5): River_ARF_Prequential (0,9482), River_ARF (0,9143), XGBoost (0,9039), LightGBM (0,9031), Random Forest (0,9024). Найнижчі показники у Boosting_DT (ROC-AUC = 0,538), що відповідає рівню випадкової класифікації. Частка хибних класифікацій (рис. 6) становить: River_ARF_Prequential – 9,3%, Random Forest – 12,1%, LightGBM – 13,7%, XGBoost – 14,1%, тоді як SVM – 22,7%, KNN – 26,5%, Logistic Regression – 33,2%, Boosting_DT – 49,0%. З точки зору обчислювальних витрат (рис. 7) SVM є непридатним для регулярного перенавчання (1050-1375 с). Найшвидші пакетні алгоритми – XGBoost (~1,8 с), LightGBM (2,6 с), Random Forest (4,7 с). Потокові River_ARF витрачають 424-432 с через послідовну обробку записів; River_Hoeffding_Prequential – лише 18,3 с.

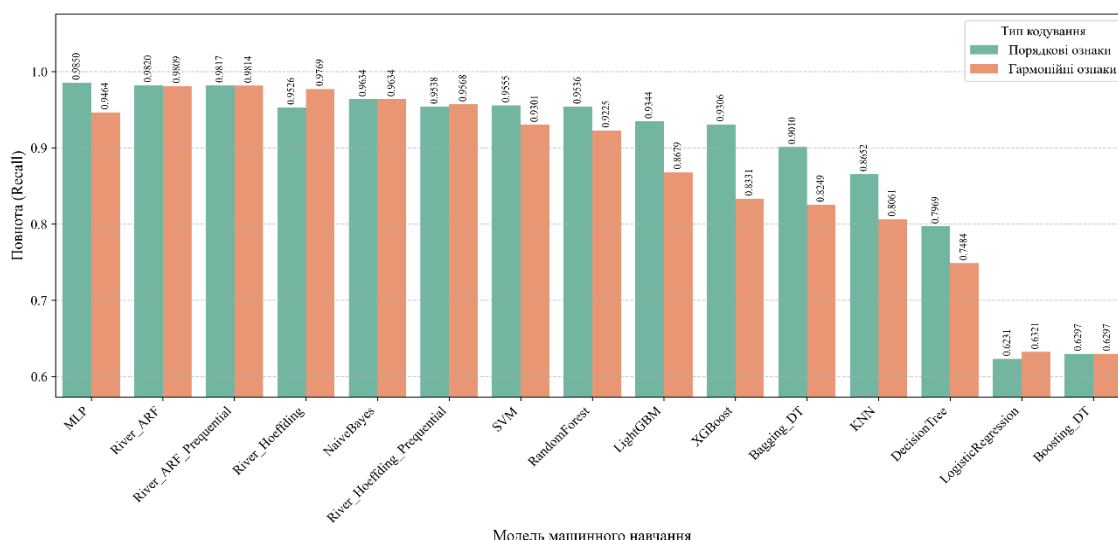


Рис. 3 – Показники моделей: повнота (Recall)

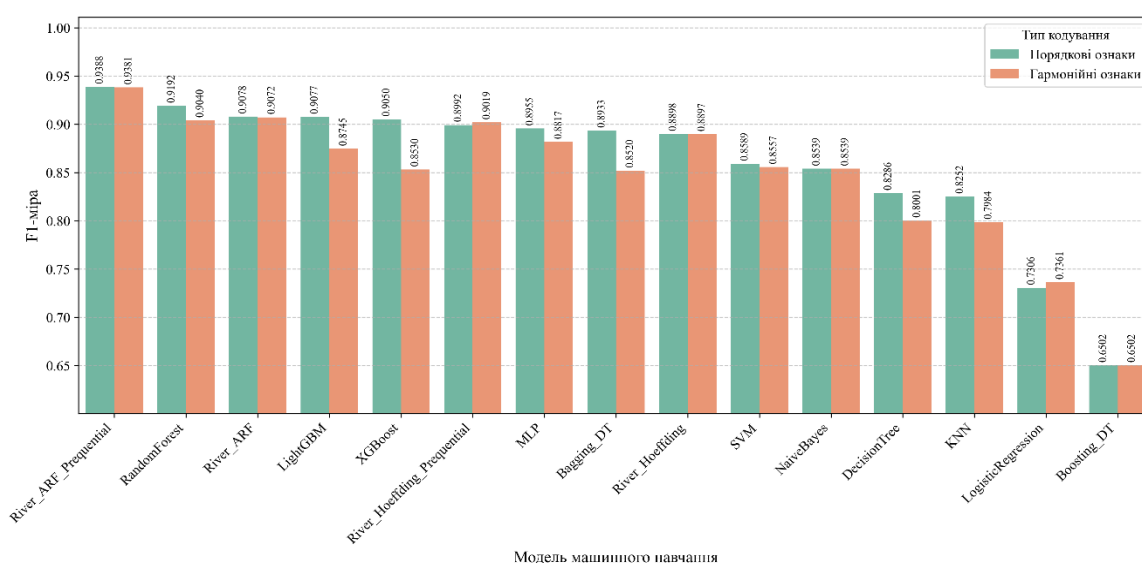


Рис. 4 – Показники моделей: F1-міра

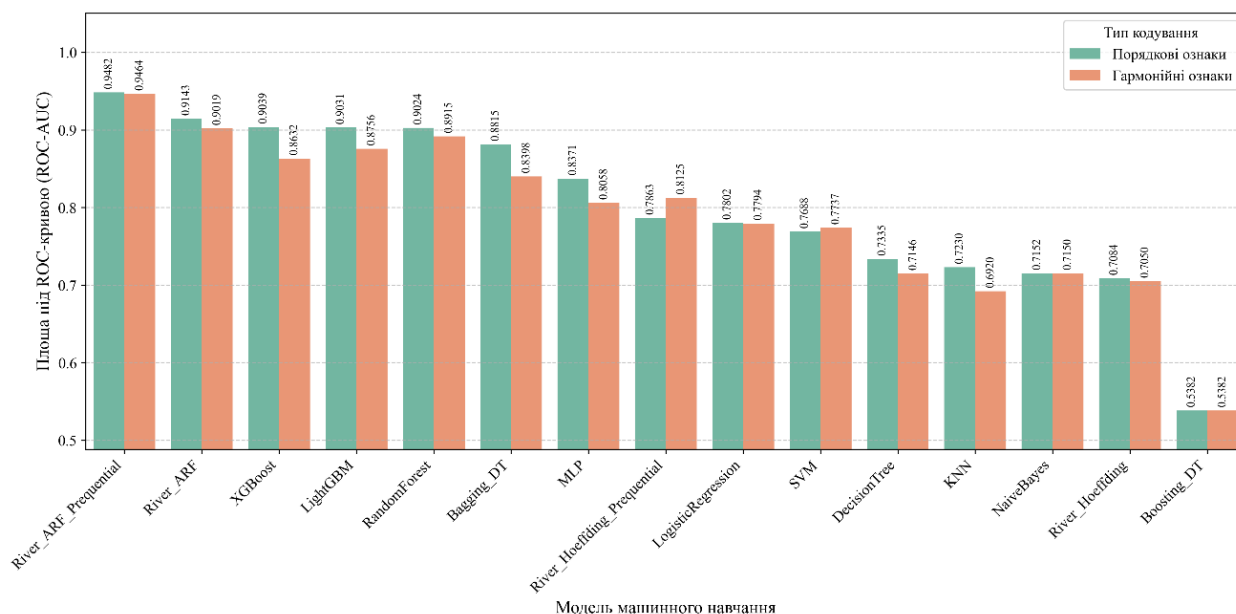


Рис. 5 – Показники моделей: площа під ROC-кривою (ROC-AUC)

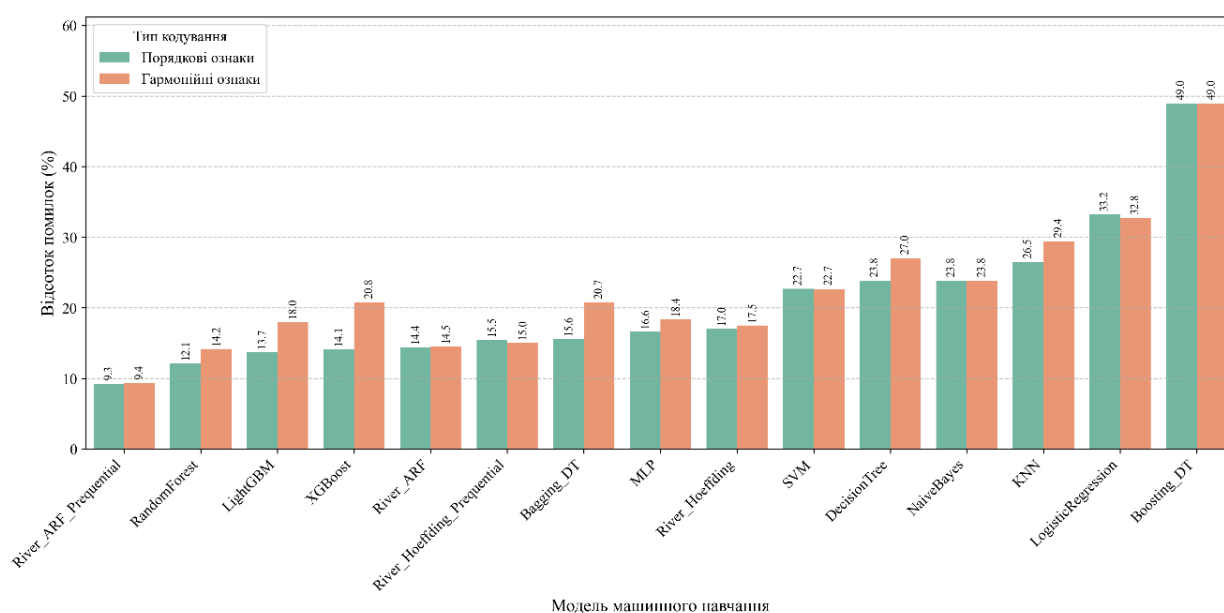


Рис. 6 – Показники моделей: відсоток помилок

Результати тестування виявили гетерогенну реакцію алгоритмів на спосіб кодування часових ознак (рис. 4, 5). Для архітектур на базі дерев рішень циклічне кодування систематично знижує прогностичну якість: ROC-AUC XGBoost падає з 0,9039 до 0,8632, LightGBM – з 0,9031 до 0,8756, Random Forest – з 0,9024 до 0,8915, Bagging_DT – з 0,8815 до 0,8398; F1 XGBoost знижується з 0,9050 до 0,8530. Механізм цього ефекту пов'язаний з ортогональним характером розбиттів дерев рішень: апроксимація тригонометрично заданих просторів вимагає надмірно глибоких

ієрархічних структур, що підвищує схильність моделей до перенавчання.

Реакція окремих архітектур є протилежною (рис. 3, 4): F1 River_Hoeffding_Prequential незначно зростає з 0,8992 до 0,9019, Recall базового River_Hoeffding підвищується з 0,9526 до 0,9769. Показники NaiveBayes і Boosting_DT повністю інваріантні до типу кодування (рис. 1-6). Таким чином, для ансамблів дерев рішень, що становлять основу сучасного ERP-скорингу, порядкове кодування є кращим вибором; циклічне кодування може бути корисним лише для окремих потокових або імовірнісних архітектур.

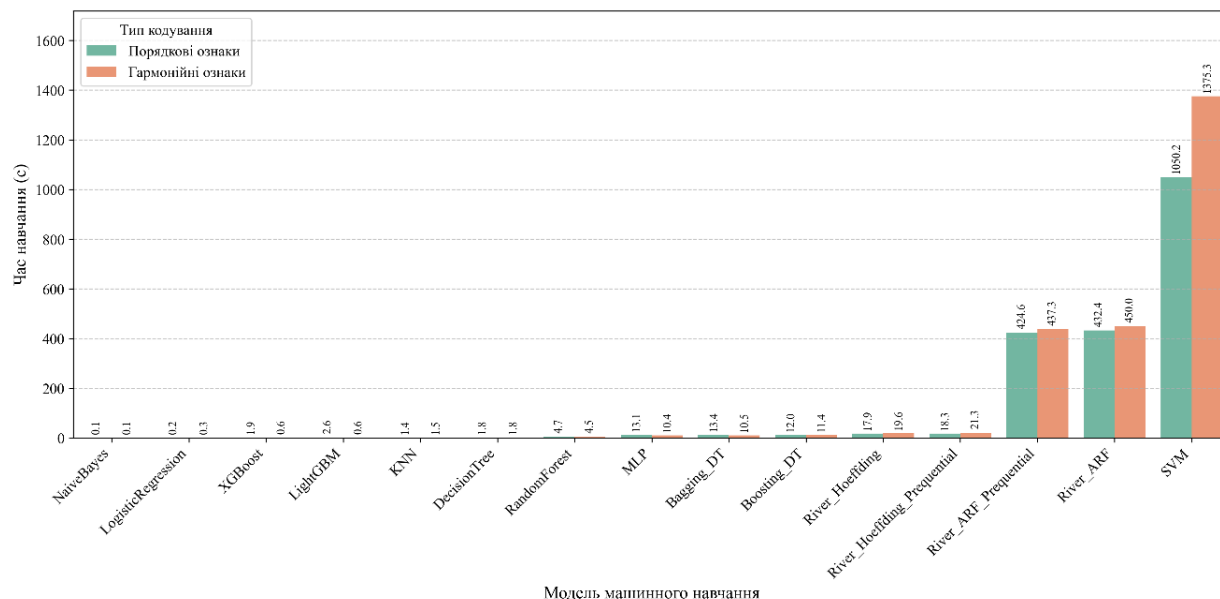


Рис. 7 – Показники моделей: час навчання

Для оцінювання стійкості алгоритмів до збурень вхідного розподілу даних було проведено преквенційну симуляцію виробничого середовища. За інтегральними показниками всього симуляційного масиву XGBoost незначно переважає над River_ARF_Prequential: ROC-AUC 0,9426 проти 0,9321, F1 0,9136 проти 0,9087, частка помилок 10,94% проти 12,04% (табл. 1).

Однак часовий аналіз виявляє принципові відмінності в поведінці моделей під час кризових епізодів (рис. 8-13).

Протягом стабільних періодів 2018-2021 років обидві архітектури демонструють співмірні показники (рис. 8, 10): Accuracy 0,90-0,96, Recall 0,85-0,95, з незначною перевагою XGBoost у 2-5 відсоткових

пунктів. При першому структурному збуренні на початку 2022 року частка помилок XGBoost перевищила 20%, тоді як River_ARF_Prequential – 17-18% (рис. 13); Precision обох моделей синхронно знизилась до 0,77-0,85 (рис. 9).

Таблиця 1

Узагальнені результати преквенційної симуляції

Метрика	XGBoost (Пакетне навчання)	River_ARF_Prequential (Потокове навчання)
ROC-AUC	0,9426	0,9321
F1-Score	0,9136	0,9087
Частка помилок (%)	10,94%	12,04%

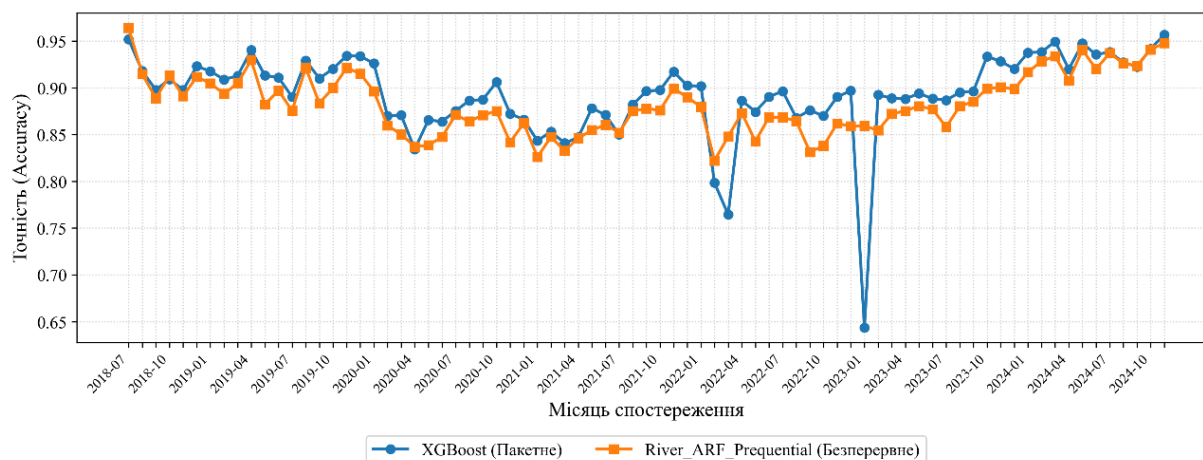


Рис. 8 – Динаміка зміни показника: точність (Accuracy)

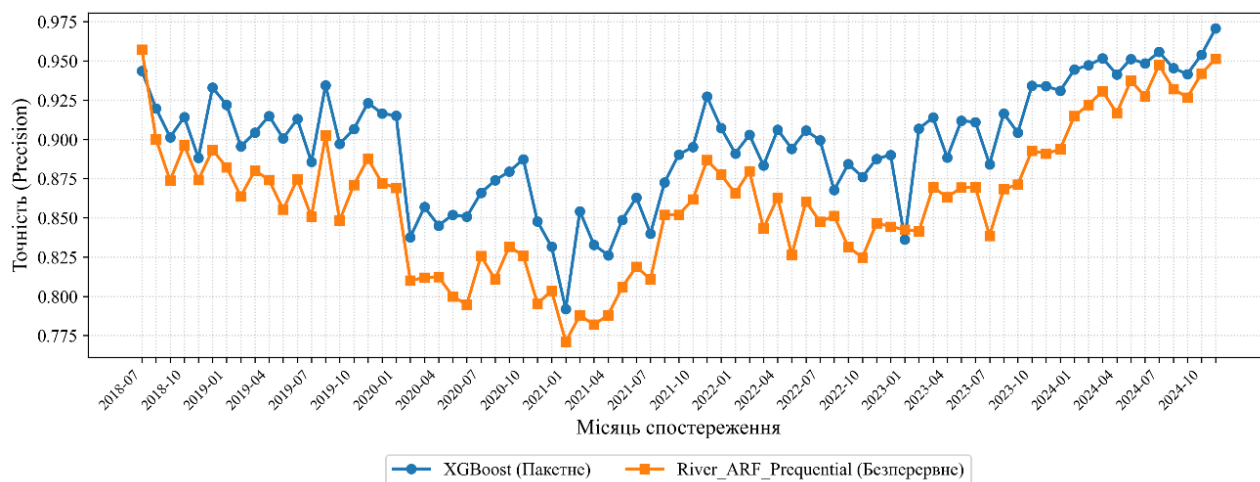


Рис. 9 – Динаміка зміни показника: точність (Precision)

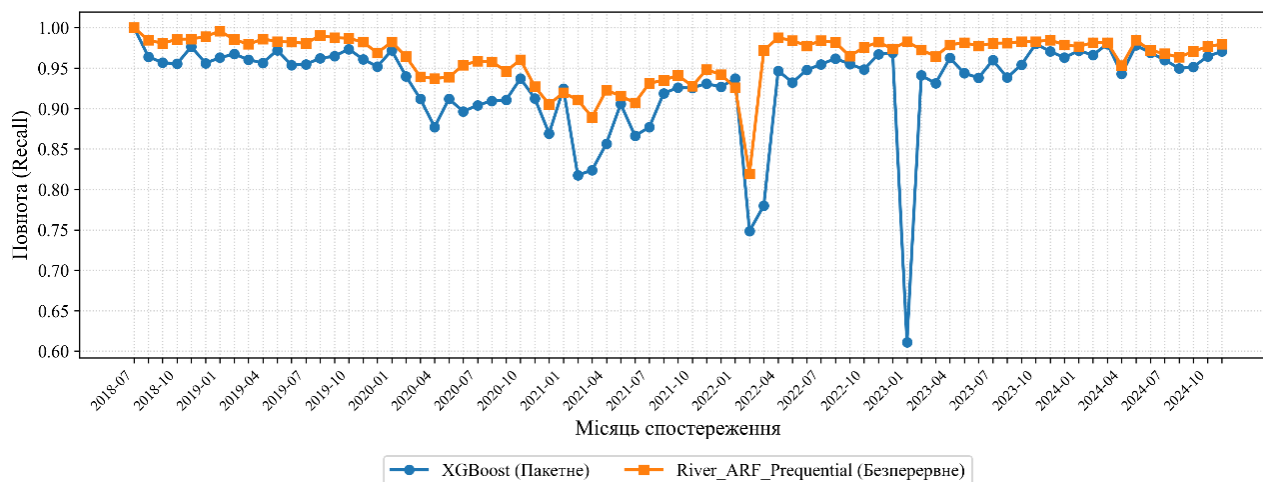


Рис. 10 – Динаміка зміни показника: повнота виявлення (Recall)

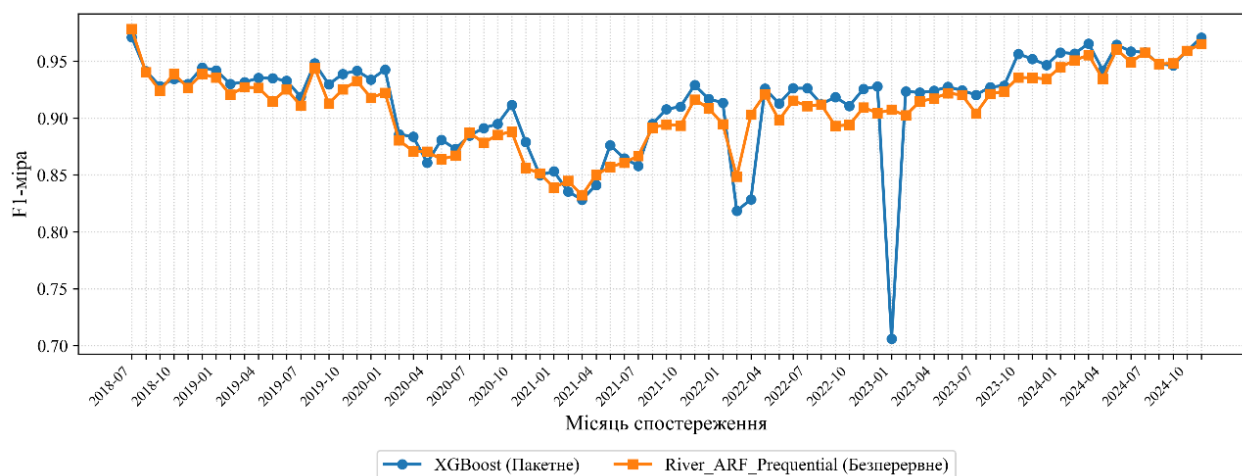


Рис. 11 – Динаміка зміни показника: F1-міра

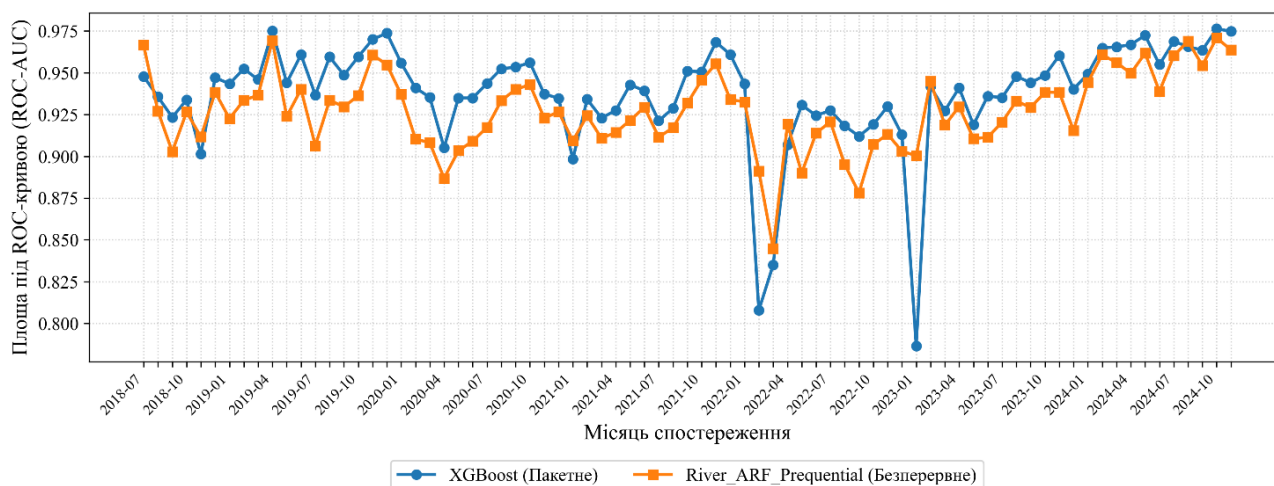


Рис. 12 – Динаміка зміни показника: площа під ROC-кривою (ROC-AUC)

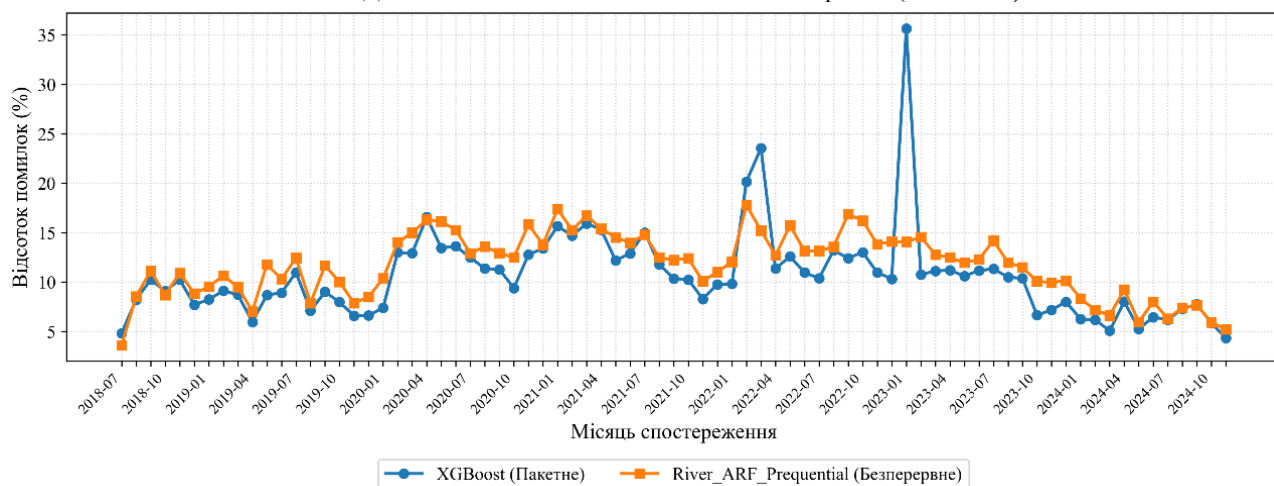


Рис. 13 – Динаміка зміни показника: відсоток помилок

Найбільш виражене збурення вхідного розподілу зафіксовано на початку 2023 року (рис. 8-13). XGBoost зазнав суттєвої деградації: Accurasy впала до 0,65, Recall – до 0,61, F1 – до 0,70, ROC-AUC знизився з 0,93 до 0,78-0,79, частка помилок досягла 35-36%. Модель хибно відхиляла близько 40% потенційно успішних замовлень. Механізм деградації полягає у тому, що XGBoost продовжував класифікувати нові транзакції відповідно до застарілих статистичних закономірностей аж до чергового циклу перенавчання. River_ARF_Prequential за той самий період утримував Accurasy на рівні 0,85-0,87, Recall > 0,95, F1 $\approx$ 0,90-0,91, частку помилок 14–15% завдяки безперервному потранзакційному оновленню структури ансамблю. Після згасання збурення (кінець 2023-2024 р.) обидві моделі відновили показники до рівня F1 $\approx$ 0,95-0,96.

Отримані результати засвідчують, що перевага пакетної архітектури за інтегральними метриками формується переважно в стабільні періоди. В умовах

збурення характеристик вхідного потоку XGBoost генерує 35-36% хибних рішень проти 14-15% у потоковій моделі. Високий показник Precision пакетного підходу досягається ціною масового хибного відхилення легітимних угод, тоді як потокова архітектура забезпечує прийнятну якість рішень упродовж усього горизонту спостереження, включно з періодами збурень

Висновки

У дослідженні проведено порівняльний аналіз ефективності пакетних і потокових архітектур машинного навчання на задачі скорингу B2B-транзакцій у реальному ERP-середовищі.

Щодо впливу методів кодування часових ознак, емпірично підтверджено, що циклічне sin/cos-кодування систематично знижує якість алгоритмів на базі дерев рішень через несумісність тригонометричних просторів з ортогональними розбиттями. Для ансамблів XGBoost, LightGBM і Random Forest оптимальним є порядкове кодування. Незначний приріст від

циклічного кодування можливий лише для окремих поточкових архітектур типу River_Hoeffding; імовірнісні класифікатори інваріантні до типу кодування.

За результатами глобального тестування встановлено ієрархію ефективності моделей. Серед пакетних алгоритмів найвищу дискримінаційну здатність показали XGBoost (ROC-AUC = 0,9039), LightGBM (0,9031) та Random Forest (0,9024) із часткою помилок 12–14%. Лінійні класифікатори та слабко налаштовані дерева виявились непридатними для промислового скорингу, генеруючи 33–49% хибних рішень. Серед поточкових алгоритмів River_ARF_Prequential показав ROC-AUC = 0,9482, F1 = 0,9388 та лише 9,3% помилок.

Преквенційна симуляція виявила вразливість пакетних архітектур до збурень вхідного розподілу даних. Під час структурного збурення 2023 року Recall XGBoost знизився до ~60%, частка помилок зросла до 35–36%, що відповідало хибному відхиленню ~40% легітимних угод. Натомість River_ARF_Prequential утримував Recall > 0.95 та частку помилок 14–17% завдяки потранзакційному оновленню структури ансамблю.

Отримані результати підтверджують об'єктивний компроміс між максимальною точністю пакетних ансамблів за стаціонарних умов та адаптивністю поточкових моделей в умовах збурень. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка гібридних архітектур, що поєднують розрізнявальну потужність градієнтних бустингів з інкрементальними механізмами потокового навчання задля забезпечення стійкого скорингу за будь-яких умов функціонування системи

Перелік використаних джерел

- [1] Yang Y., Wang H. Random Forest-Based Machine Failure Prediction: A Performance Comparison. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 16. Article 8841. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15168841>.
- [2] Abd El-Aziz R. A., Hassan A. S. Machine learning-driven optimization of enterprise resource planning (ERP) systems: a comprehensive review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. 2024. Vol. 13, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43088-023-00460-y>.
- [3] Machine Learning and Deep Learning Models for Demand Forecasting in Supply Chain Management: A Critical Review / K. Douaioui et al. *Applied System Innovation*. 2024. Vol. 7, no. 5. Article 93. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi7050093>.
- [4] Kraus A., van der Aa H. Machine learning-based detection of concept drift in business processes. *Process Science*. 2025. Vol. 2, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44311-025-00012-w>.
- [5] Suárez-Cetrulo A. L., Quintana D., Cervantes A. A survey on machine learning for recurring concept drifting data streams. *Expert Systems with Applications*. 2022. Volume 213, Part A. Article 118934. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118934>.
- [6] Domingos P., Hulten G. Mining high-speed data streams. *Knowledge discovery and data mining: Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference, Boston, Massachusetts, United States, 20–23 August 2000*. Pp. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.1145/347090.34710>.
- [7] Adaptive random forests for evolving data stream classification / H. M. Gomes et al. *Machine Learning*. 2017. Vol. 106, no. 9–10. Pp. 1469–1495. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-017-5642-8>.
- [8] River: machine learning for streaming data in Python / J. Montiel et al. *Journal of Machine Learning Research*. 2021. Vol. 22, no. 110. Pp. 1–8.
- [9] S. B. Jadhav, D. V. Kodavade, V. D. Kulkarni. Data Stream Learning Evaluation: Experimenting with Prequential Approach Over Real Data Streams. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. 2025. Vol. 10, no. 9s. Pp. 230–237. DOI: <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i9s.1206>.
- [10] Machine learning for streaming data / H. M. Gomes et al. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*. 2019. Vol. 21, no. 2. Pp. 6–22. DOI: <https://doi.org/10.1145/3373464.3373470>.
- [11] Review of automated time series forecasting pipelines / S. Meisenbacher et al. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*. 2022. Vol. 12, no. 6, p. e1475. DOI: <https://doi.org/10.1002/widm.1475>.
- [12] Lewinson E. Three Approaches to Encoding Time Information as Features for ML Models. *NVIDIA Technical Blog*. 2022. URL: <https://developer.nvidia.com/blog/three-approaches-to-encoding-time-information-as-features-for-ml-models/> (дата звернення: 20.02.2026).
- [13] Chakraborty D., Elzarka H. Advanced machine learning techniques for building performance simulation: a comparative analysis. *Journal of Building Performance Simulation*. 2019. Vol. 12, No. 2. Pp. 193–207. DOI: <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1498538>.
- [14] Mahajan T., Singh G., Bruns G. An Experimental Assessment of Treatments for Cyclical Data. *Computer Science Conference for CSU Undergraduates*, California State University Northridge, 2021. Pp. 1–5.
- [15] Bansal A., Balaji K., Lalani Z. Temporal Encoding Strategies for Energy Time Series Prediction. arXiv:2503.15456. 2020. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.15456>.

BATCH VS. STREAMING MACHINE LEARNING FOR B2B ORDER SUCCESS FORECASTING:
ROBUSTNESS TO CONCEPT DRIFT IN INDUSTRIAL ERP SYSTEMSMiroshnichenko
S.O.postgraduate student, senior lecturer, TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST
POLYTECHNIC" LLC, Zaporizhzhia, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4868-3006>, e-
mail: serhii.miroshnichenko@mipolytech.edu

Predicting B2B order success is a critical task in Enterprise Resource Planning (ERP) systems, directly affecting operational efficiency and commercial outcomes. Traditional batch machine learning models assume stationarity of the underlying data distribution, rendering them vulnerable to concept drift arising from macroeconomic disturbances or shifts in counterparty behaviour. This study compares static batch and continuous streaming machine learning architectures for B2B order success classification on a dataset of 86,786 transactions from an operational industrial ERP system. Fifteen algorithms were benchmarked: optimised tree ensembles (XGBoost, LightGBM, Random Forest), linear and probabilistic classifiers, and incremental streaming models from the River ecosystem, notably the Adaptive Random Forest. Evaluation combined a global stationary benchmark with a strictly prequential simulation reproducing structural data shifts under real production conditions. The impact of linear-ordinal versus harmonic-cyclic temporal feature encoding was assessed across both algorithm classes. Harmonic-cyclic encoding systematically degraded decision tree-based models due to incompatibility between trigonometric feature spaces and orthogonal split boundaries, confirming ordinal encoding as the optimal choice for such architectures. Under stationary conditions, XGBoost achieved the highest batch model ROC-AUC of 0.9039, while River ARF_Prequential led overall with ROC-AUC 0.9482 and a misclassification rate of 9.3%. During the prequential simulation, XGBoost retained a marginal aggregate advantage; however, at the peak drift episode in early 2023, its Recall dropped to approximately 0.61 and misclassification rate reached 35–36%, implying erroneous rejection of nearly 40% of legitimate orders. River ARF_Prequential sustained Recall above 0.95 and a misclassification rate of 14–15% throughout the same period through continuous incremental updates. The findings confirm a trade-off between the peak accuracy of batch ensembles under stationary conditions and the adaptive resilience of streaming models under distributional disturbances, motivating the development of hybrid forecasting architectures for industrial ERP pipelines.

Keywords: machine learning; success forecasting; streaming learning; concept drift; decision tree ensembles; prequential simulation; ERP systems; temporal feature engineering.

References

- [1] M. N. Hasan et al., "Random Forest-Based Machine Failure Prediction: A Performance Comparison," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 16, article 8841, 2025. doi: [10.3390/app15168841](https://doi.org/10.3390/app15168841).
- [2] R. A. Abd El-Aziz, and A. S. Hassan, "Machine learning-driven optimization of enterprise resource planning (ERP) systems: a comprehensive review," *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 13, no. 1, 2024. doi: [10.3390/asi7050093](https://doi.org/10.3390/asi7050093).
- [3] G. Villegas-Ch, D. García-Ortiz, and S. Luján-Mora, "Machine Learning and Deep Learning Models for Demand Forecasting in Supply Chain Management: A Critical Review," *Applied System Innovation*, vol. 7, no. 5, article 93, 2024. doi: [10.3390/asi7050093](https://doi.org/10.3390/asi7050093).
- [4] A. Kraus, and H. van der Aa, "Machine learning-based detection of concept drift in business processes," *Process Science*, vol. 2, no. 1, 2025. doi: [10.1007/s44311-025-00012-w](https://doi.org/10.1007/s44311-025-00012-w).
- [5] A. L. Suárez-Cetrulo, D. Quintana, and A. Cervantes, "A survey on machine learning for recurring concept drifting data streams," *Expert Systems with Applications*, vol. 213, part A, article 118934, 2023. doi: [10.1016/j.eswa.2022.118934](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118934).
- [6] P. Domingos and G. Hulten, "Mining high-speed data streams," in *Proc. 6th ACM SIGKDD Int. Conf. «Knowledge Discovery and Data Mining»*, Boston, MA, USA, August 20–23, 2000 2000, pp. 71–80. doi: [10.1145/347090.347107](https://doi.org/10.1145/347090.347107).
- [7] H. M. Gomes et al., "Adaptive random forests for evolving data stream classification," *Machine Learning*, vol. 106, no. 9–10, pp. 1469–1495, 2017. doi: [10.1007/s10994-017-5642-8](https://doi.org/10.1007/s10994-017-5642-8).
- [8] J. Montiel et al., "River: machine learning for streaming data in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 22, pp. 1–8, 2021.
- [9] S. B. Jadhav et al., "Data Stream Learning Evaluation: Experimenting with Prequential Approach Over Real Data Streams," *Journal of Information Systems Engineering & Management*, vol. 10, no. 9s, pp. 230–237, 2025. doi: [10.52783/jisem.v10i9s.1206](https://doi.org/10.52783/jisem.v10i9s.1206).
- [10] H. M. Gomes et al., "Machine learning for streaming data: state of the art, challenges, and opportunities," *SIGKDD Explorations*, vol. 21, no. 2, 2019. doi: [10.1145/3373464.3373470](https://doi.org/10.1145/3373464.3373470).
- [11] S. Meisenbacher et al., "Review of automated time series forecasting pipelines," *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 12, no. 6, p. e1475, 2022. doi: [10.1002/widm.1475](https://doi.org/10.1002/widm.1475).
- [12] E. Lewinson, "Three Approaches to Encoding Time Information as Features for ML Models," *NVIDIA Technical Blog*, 2022. [Online]. Available: <https://developer.nvidia.com/blog/three-approaches-to-encoding-time-information-as-features-for-ml-models>.

Accessed: February 20, 2026.

- [13] D. Chakraborty and H. Elzarka, "Advanced machine learning techniques for building performance simulation: a comparative analysis," *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 12, no. 2, pp. 193–207, 2019. doi: 10.1080/19401493.2018.1498538.
- [14] T. Mahajan, G. Singh, and G. Bruns, "An Experimental Assessment of Treatments for Cyclical Data," in Proc. of the Computer Science Conference for CSU Undergraduates, California State University

Northridge, 2021, pp. 1-5.

- [15] A. Bansal, K. Balaji, and Z. Lalani, "Temporal Encoding Strategies for Energy Time Series Prediction," 2020, arXiv:2503.15456. doi: 10.48550/arXiv.2503.15456.

Стаття надійшла 26.12.2025

Стаття прийнята 15.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Мірошніченко С. О. Прогнозування успішності B2B-замовлень в умовах нестабільності: оцінка стійкості архітектур машинного навчання до концептуального дрейфу. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 75–85. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359931>.

ВИКОРИСТАННЯ АПРОКСИМАЦІЙ ПАДЕ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ

Горпинченко А.С. аспірант, Національний університет харчових технологій, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6190-7348>, e-mail: antongorpinchenkodra@gmail.com

У статті розглядається проблема ефективного математичного моделювання складних нелінійних систем управління та самоорганізації, які широко застосовуються у сучасних наукових дослідженнях, зокрема в теорії динамічних систем, синергетиці, автоматичному керуванні та математичній фізиці. Нелінійний характер таких систем суттєво ускладнює отримання точних аналітичних розв'язків, що обумовлює необхідність використання наближених методів аналізу. Одним із перспективних підходів до дослідження подібних систем є використання раціональних апроксимацій, зокрема апроксимацій Паде, які дозволяють отримувати більш точні наближення функцій порівняно з класичними степеневими розкладами. Метою роботи є дослідження можливостей застосування апроксимацій Паде для аналізу нелінійних функцій, що виникають при моделюванні процесів управління та самоорганізації у складних динамічних системах, а також порівняння їх ефективності з традиційними поліноміальними методами наближення. У роботі розглянуто математичні моделі, що описуються нелінійними функціональними залежностями, та досліджено їх апроксимаційні властивості на прикладі модельної функції, яка характеризує процес насичення у системах управління. У ході дослідження проведено порівняльний аналіз апроксимацій Паде та поліномів Тейлора. Показано, що використання раціональних апроксимацій дозволяє значно підвищити точність наближення та розширити область застосування математичних моделей, зокрема поза межами радіуса збіжності степеневих рядів. Особливу увагу приділено аналізу похибок наближення, асимптотичної поведінки функцій та дослідженню особливостей використання апроксимацій Паде для функцій із логарифмічними особливостями. Отримані результати демонструють, що апроксимації Паде можуть ефективно застосовуватися для спрощення складних нелінійних моделей, аналізу стійкості динамічних систем, дослідження режимів насичення та побудови редукованих математичних моделей. Крім того, у роботі розглянуто питання чисельної реалізації алгоритмів побудови апроксимацій та досліджено стійкість обчислювальних процедур при визначенні коефіцієнтів раціональних наближень. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування апроксимацій Паде для підвищення ефективності математичного моделювання складних процесів у системах управління, синергетичних системах та інших галузях прикладної науки. Запропонований підхід може бути використаний для аналізу нелінійних динамічних процесів, оптимізації алгоритмів керування та розробки більш точних математичних моделей складних систем.

Ключові слова: апроксимація Паде; нелінійні системи; математичне моделювання; синергетичні системи; раціональні апроксимації; ряд Тейлора; динамічні системи; системи управління.

Постановка проблеми

У сучасній науці значна увага приділяється дослідженню складних нелінійних систем, які використовуються для опису широкого кола процесів у фізиці, техніці, економіці, біології та інших галузях [1, 2]. Нелінійність таких систем зумовлює складність їх аналітичного дослідження, оскільки більшість відповідних математичних моделей не мають точних аналітичних розв'язків. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування ефективних математичних методів, що дозволяють отримувати наближені розв'язки та досліджувати поведінку систем у різних умовах.

Одним із важливих інструментів дослідження нелінійних процесів є методи апроксимації, які дають можливість замінювати складні функціональні залежності більш простими математичними виразами. Особливий інтерес серед таких методів становлять апроксимації Паде, які базуються на представленні функції у вигляді відношення двох поліномів [3]. Порівняно з класичними степеневими розкладами, зокрема рядом Тейлора, апроксимації Паде часто забезпечують кращу збіжність та точніше відтворюють поведінку функції в ширшій області визначення.

Використання апроксимацій Паде є перспективним підходом при аналізі складних нелінійних систем, оскільки дозволяє підвищити точність наближених розрахунків, зменшити похибки моделювання та розширити можливості дослідження математичних моделей. Це особливо важливо для задач, у яких стандартні методи розкладу не забезпечують достатньої точності або мають обмежену область застосування.

Разом із тим, проблема ефективного використання апроксимацій Паде для аналізу складних нелінійних систем залишається актуальною. Необхідним є подальше вдосконалення підходів до побудови таких апроксимацій, дослідження їх властивостей та визначення умов, за яких вони забезпечують найбільш точні результати. Вирішення цієї проблеми має важливе значення для розвитку методів математичного моделювання та підвищення ефективності дослідження нелінійних процесів у різних галузях науки і техніки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасній прикладній математиці та теорії моделювання значна увага приділяється розвитку методів апроксимації для дослідження складних нелінійних

систем [1]. Показано, що апроксиманти Паде забезпечують кращу збіжність у порівнянні зі степеневими рядами для широкого класу функцій.

Асимптотичні методи та їх застосування до фізичних задач, де також підкреслюється ефективність раціональних апроксимацій при аналізі функцій з особливостями [2-3] досліджує застосування апроксимацій Паде для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь на необмежених областях, демонструючи їх високу точність.

Подальший розвиток методів пов'язаний із чисельною стійкістю алгоритмів [4] запропоновано підхід до побудови стійких апроксимацій Паде із використанням сингулярного розкладу, що дозволяє зменшити вплив похибок округлення.

Важливість раціональних апроксимацій для обчислення експоненти матриці, що має пряме застосування в теорії динамічних систем [5-6], а також фундаментальні довідники з математичних функцій та апроксимацій [7-9] підкреслюють важливу роль раціональних наближень у чисельному аналізі та прикладних задачах.

Подальші дослідження асимптотичних методів та рядів [10], розширили застосування цих підходів для складних функцій. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється також методам моделювання та оптимізації складних систем [11, 12].

Разом із тим, аналіз літератури показує, що існує недостатня кількість досліджень, спрямованих на систематичне застосування апроксимацій Паде саме для моделювання складних нелінійних систем управління з урахуванням їх асимптотичних властивостей та режимів насичення. Зокрема, недостатньо розглянутими залишаються питання вибору оптимального порядку апроксимації та оцінки похибок у прикладних задачах.

Таким чином, актуальним є подальше дослідження можливостей застосування апроксимацій Паде для підвищення точності математичного моделювання нелінійних систем, що і визначає напрям даної роботи.

Мета статті

Метою даної статті є дослідження можливостей застосування апроксимацій Паде для аналізу складних нелінійних систем, а також оцінка ефективності цього методу при побудові наближених математичних моделей. У роботі передбачається розглянути особливості використання апроксимацій Паде, визначити їх переваги порівняно з традиційними методами апроксимації та продемонструвати можливості їх застосування для підвищення точності аналізу нелінійних процесів.

Матеріали та методи

У дослідженні використано методи математичного моделювання, теорії апроксимації та чисельного аналізу для вивчення складних нелінійних систем управління та самоорганізації. Основним методом дослідження є апроксимація Паде, яка застосовується для

наближеного представлення нелінійних функцій у вигляді відношення двох поліномів [1, 4].

Об'єктом дослідження є нелінійні функціональні залежності, що описують процеси взаємодії елементів у синергетичних системах управління. Для аналізу використано модельну функцію:

$$f(x) = x/(1+x). \quad (1)$$

Ця функція використовується як спрощена математична модель нелінійного процесу в системах управління та самоорганізації. Вона демонструє, як змінюється стан системи залежно від вхідного параметра.

Для наближеного опису цієї функції використовується апроксимація Паде, яка дозволяє замінити складну функцію раціональною функцією (дробом двох поліномів). У загальному вигляді апроксимація Паде записується так:

$$R(x) = \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2}{(1 + b_1x + b_2x^2)}. \quad (2)$$

Відповідно a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти чисельника, b_1, b_2 – коефіцієнти знаменника.

Ці коефіцієнти підбираються таким чином, щоб отримана функція максимально точно відтворювала поведінку початкової функції.

Побудова апроксимації виконувалася шляхом розкладу вихідної функції в степеневий ряд та подальшого визначення коефіцієнтів раціональної функції. Такий підхід дозволяє отримати наближену модель, яка має кращу збіжність та точніше описує поведінку нелінійної системи.

Для проведення чисельних експериментів використовувалося програмне забезпечення для математичних обчислень. Обчислення та побудова графіків виконувалися з використанням мови програмування Python та бібліотек NumPy, SciPy і Matplotlib, які дозволяють проводити чисельні розрахунки та візуалізувати результати моделювання [5].

У процесі дослідження було обчислено значення вихідної функції та її апроксимації у визначеному діапазоні значень змінної x . Після цього проведено порівняльний аналіз точності отриманих результатів та побудовано графік наближення.

Для забезпечення відтворюваності результатів дослідження використано відкриті програмні інструменти та стандартні алгоритми побудови апроксимацій Паде.

Виклад основного матеріалу

У даному розділі представлено результати дослідження апроксимативних властивостей раціональних наближень Паде у порівнянні з класичними степеневими рядами Тейлора. На основі аналізу модельної функції рівняння (1) та її узагальнень виявлено фундаментальні закономірності, що визначають переваги застосування апроксимантів Паде в задачах моделювання нелінійних систем управління та синергетики. Особлива увага приділяється поведінці наближень за межами радіуса збіжності степеневих рядів, що має

критичне значення для аналізу глобальної стійкості динамічних систем [13, 14].

Функція Паде яка є найпростішим представником класу дробово-раціональних функцій, що описують процеси з насиченням у динамічних системах. Її розклад у ряд Тейлора $x_0 = 0$ має математичну модель:

$$f(x) = \frac{x}{1+x} = x \cdot \frac{1}{1-(1-x)} = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} x^k = x - x^2 + x^3 - x^4 + x^5 - \dots |x| < 1 \quad (3)$$

Радіус збіжності даного ряду $R = 1$ визначається відстанню до найближчої особливості точки – полюса $x = -1$ у комплексній площині. Для практичних обчислень обмежимося поліномом Тейлора третього степеня:

$$T_3(x) = x - x^2 + x^3. \quad (4)$$

Для побудови апроксиманта Паде порядку $[2/2]$ скористаємось загальною методикою:

$$R_{[2/2]}(x) = \frac{a_0 + a_1 x + a_2 x^2}{1 + b_1 x + b_2 x^2}. \quad (5)$$

Прирівнюючи коефіцієнти розкладу $R_{[2/2]}(x)$ до коефіцієнтів ряду $f(x)$ до членів порядку x^4 включно (оскільки $m + n = 4$), отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} a_0 = c_0 = 0 \\ a_1 - a_0 b_1 = c_1 = 1 \\ a_2 - a_1 b_1 + a_0 b_1^2 - a_0 b_2 = c_2 = -1 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 + a_0 b_1 b_2 = c_3 = 1 \\ a_2 b_2 = c_4 = -1 \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язуючи цю систему методом послідовного підставлення, знаходимо:

$$a_0 = 0, \quad a_1 = 1, \quad a_2 = 0, \quad b_1 = 1, \quad b_2 = 0. \quad (7)$$

Відповідно апроксимант Паде $[2/2]$ для функції має математичну модель:

$$R_{[2/2]}(x) = \frac{x}{1+x}. \quad (8)$$

Отриманий апроксимант точно збігається з вихідною функцією. Це демонструє фундаментальну властивість апроксимацій Паде: функція є раціональною і має степінь чисельника m та знаменника n , то апроксимант Паде порядку $\left[\frac{m}{n}\right]$ відновлює її точно. У загальному випадку довільних нелінійних функцій такої точності не досягається, однак похибка апроксимації Паде залишається істотно меншою порівняно з поліноміальними наближеннями.

На інтервалі $x \in [0, 0.8]$, похибка Тейлора $T_3(x)$

$$\left| f(x - T_3(x)) \right| = \left| \sum_{k=4}^{\infty} (-1)^{k-1} x^k \right| = \frac{x}{1+x} \approx x^4, \quad x \rightarrow 0 \quad (9)$$

Як видно, похибка зростає пропорційно x^4 , і при $x = 0.8$ досягає значення $T(0.8) \approx 0.23_T$, що становить відносну похибку понад 50%. Така поведінка пояснюється тим, що многочлен Тейлора, будучи поліномом непарного степеня з додатним старшим коефіцієнтом, при $x > 1$ прямує до $+\infty$, тоді як вихідна функція має горизонтальну асимптоту $y = 1$. Це принципове

обмеження поліноміальних апроксимацій унеможливає їх використання для моделювання систем із насиченням за межами локальної області.

Асимптотична поведінка та глобальні властивості апроксимантів Паде побудованих наближень при $x \rightarrow \infty$ для полінома Тейлора $T_3(x)$:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} T_3(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} (x - x^2 + x^3) = +\infty. \quad (10)$$

Відповідно реальна вихідна функція становить:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x}{1+x} = 1. \quad (11)$$

Звідси маємо апроксимант Паде $[2/2]$ демонструє правильну поведінку математичної моделі:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} R_{[2/2]}(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x}{1+x} = 1. \quad (12)$$

Звідси виходить, що для довільної аналітичної функції $f(x)$ зі степеневим рядом $\sum_{k=0}^{\infty}$ апроксимант

Паде порядку $\left[\frac{m}{n}\right]$ відповідає умові:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{R_m}{n}(x) = \frac{a_m}{b_n} \quad (13)$$

Відповідно a_m, b_n – старші коефіцієнти чисельника та знаменника відповідно [15]. Це дозволяє узгоджувати асимптотику раціонального наближення з відомою асимптотикою вихідної функції шляхом відповідного вибору порядків m, n . Зокрема, для функцій, що мають скінченну границю на нескінченності (як-от передатні функції інерційних ланок у теорії автоматичного керування), необхідно обирати $m < n$.

Дослідження похибки для функцій з логарифмічною особливістю – озширимо аналіз на функцію $g(x) = \ln(1+x)$, яка часто зустрічається в моделях синергетичних систем (наприклад, у рівняннях хімічної кінетики або в теорії інформації). Її розклад у ряд Тейлора:

$$\ln(1+x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{k} x^k = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} \dots, \quad |x| < 1 \quad (14)$$

Радіус збіжності також дорівнює 1, але особливість у точці $x = -1$ є логарифмічною точкою розгалуження, а не полюсом. Для дослідження ефективності апроксимації Паде побудуємо апроксиманти $[2/2]$ та $[3/3]$ за описаною вище методикою, система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} a_0 = c_0 = 0 \\ a_1 - a_0 b_1 = c_1 = 1 \\ a_2 - a_1 b_1 + a_0 b_1^2 - a_0 b_2 = c_2 = -1/2 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 + a_0 b_1 b_2 = c_3 = 1/3 \\ a_2 b_2 = c_4 = -1/4 \end{cases} \quad (15)$$

Розв'язуючи цю систему методом послідовного підставлення, знаходимо:

$$a_0 = 0, \quad a_1 = 1, \quad a_2 = \frac{1}{2}, \quad b_1 = 1, \quad b_2 = \frac{3}{20}. \quad (16)$$

Відповідно апроксимант Паде для функції має

математичну модель:

$$R_{[2/2]}^{\ln}(x) = \frac{x + \frac{1}{2}x^2}{1 + x + \frac{1}{2}x^2} \quad (17)$$

Похибка апроксимації на інтервалі $x \in [0,1]$ досліджувалася чисельно. Для кількісної оцінки введемо функціонал максимальної абсолютної похибки:

$$E_{\max}(m, n) = \max_{x \in [0,1]} |g(x) - R_{m/n}(x)| \quad (18)$$

Таблиця 1
Максимальна абсолютна похибка наближення функції на інтервалі $[0, 1]$

Тип	Порядок	$E_{\max}$	Відношення похибки
Тейлор	5	$1.48 \cdot 10^{-3}$	1
Тейлор	7	$4.58 \cdot 10^{-3}$	0.31
Паде	[2/2]	$3.27 \cdot 10^{-3}$	0.22
Паде	[3/3]	$7.63 \cdot 10^{-3}$	0.052

Апроксимант Паде [3/3], який використовує лише 7 коефіцієнтів ряду, забезпечує точність, яка більш ніж у 6 разів перевищує точність полінома Тейлора 7-го степеня (який також використовує 8 коефіцієнтів), та майже у 20 разів – точність полінома 5-го степеня. Пояснення цього явища полягає в тому, що раціональна функція здатна краще апроксимувати функцію з логарифмічною особливістю, ніж поліном. Логарифмічна особливість у точці $x = -1$ створює розрив у комплексній площині, і поліном не може ефективно моделювати поведінку вздовж цього розриву. Апроксимант Паде, розміщуючи полюси вздовж розриву, імітує його наявність (рис. 1).

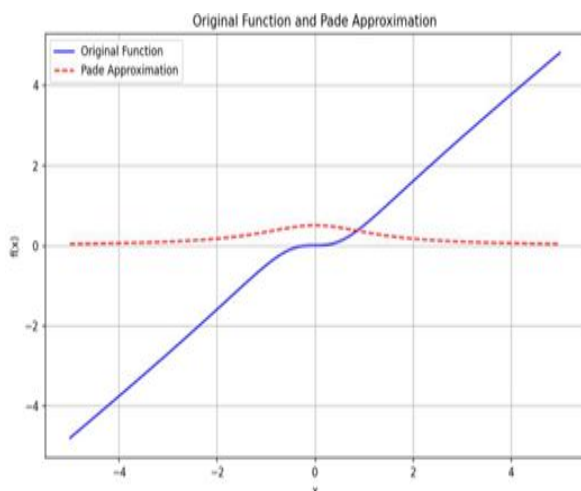


Рис. 1 – Графічне представлення апроксимації Паде для моделювання управління в системі

Отримані результати мають безпосереднє застосування в теорії стійкості нелінійних систем управління. Розглянемо систему, що описується передатною

функцією (19) аперіодична ланка першого порядку. Її частотні характеристики можуть бути отримані заміною $s = \omega i$. Апроксимація Паде використовується для наближення трансцендентних функцій, що виникають при аналізі систем із запізненням.

$$W(s) = \frac{k}{1+sT}. \quad (19)$$

Система містить ланку транспортного запізнення e^{-sT} . Розклад цієї функції в ряд Тейлора дає поліном, який не є обмеженим на нескінченності, що суперечить фізичному змісту (реальна система із запізненням має обмежений вихід при обмеженому вході). Апроксимант Паде дозволяє отримати раціональне наближення, яке є обмеженим і коректно відображає фазо-частотні характеристики.

Для експоненти e^{-x} відомі апроксиманти Паде різних порядків. Зокрема, апроксимант [1/1] має вигляд:

$$e^{-x} \approx \frac{1 - \frac{x}{2}}{1 + \frac{x}{2}} \quad (20)$$

Його похибка при $x \rightarrow 0$ становить $O(x^3)$, тоді як похибка полінома Тейлора першого степеня $1 - x$ становить $O(x^2)$. Таким чином, апроксимант Паде забезпечує вищий порядок точності при тій самій кількості параметрів. На великих поведінка також коректніша: поліном Тейлора при $1 > x$ стає від'ємним і необмежено спадає за модулем, тоді як апроксимант Паде прямує до нуля при $x \rightarrow \infty$, як і сама експонента.

Застосування апроксимацій Паде є стійкість обчислювальних алгоритмів. Процес знаходження коефіцієнтів зводиться до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь виду:

$$Hb = -c \quad (21)$$

Відповідно H – матриця Ганкеля, складена з коефіцієнтів ряду Тейлора:

$$H_{ij} = c_{m+i-j}, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (22)$$

Число обумовленості $k(H) = \|H\| * \|H^{-1}\|$ швидко зростає зі збільшенням порядку апроксиманта. Для досліджуваної функції $\ln(1+x)$ при $m = n = 5$ число обумовленості досягає $k \approx 10^4$, що свідчить про потенційну чутливість розв'язку до похибок округлення. Тому для практичних обчислень рекомендується використовувати алгоритми з подвійною точністю (float64) та методи регуляризації (наприклад, сингулярний розклад) при роботі з матрицями високого порядку.

Результати та їх обговорення

Моделювання біфуркацій: Полюси апроксимантів Паде в комплексній площині можуть слугувати індикаторами критичних значень параметрів, при яких система змінює свою поведінку. Для дисипативних систем, що описуються рівняннями типу Лоренца або Ресслера, раціональні апроксимації дозволяють ефективно локалізувати області параметричного резонансу.

Аналіз режимів з насиченням: Багато процесів у відкритих нерівноважних системах (хімічні реакції, динаміка популяцій, нейронні мережі) характеризуються наявністю граничних циклів та режимів

насичення. Як показано вище, саме раціональні апроксимації, на відміну від поліноміальних, здатні коректно відтворювати вихід насичення при великих значеннях вхідних параметрів.

Редукція динамічних моделей: При дослідженні складних ієрархічних систем часто виникає потреба в зменшенні порядку моделі для спрощення аналізу. Метод апроксимацій Паде надає систематичний спосіб отримання редукованих моделей, які зберігають основні динамічні властивості оригінальної системи, зокрема, її стійкість та частотні характеристики в заданому діапазоні.

Аналіз результатів: Як видно з таблиці 1, апроксимант Паде $[3/3]$, який використовує лише 7 параметрів (коефіцієнти $a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$), забезпечує максимальну похибку $7.63 \cdot 10^{-3}$, що у 6 разів менше за похибку полінома Тейлора 7-го степеня ($4.58 \cdot 10^{-2}$) та майже в 20 разів менше за похибку полінома 5-го степеня. При цьому апроксимант $[2/2]$ з 5 параметрами дає точність, кращу за поліном 7-го степеня з 8 параметрами.

Така висока ефективність апроксимантів Паде пояснюється їх здатністю враховувати наявність особливостей функцій в комплексній площині. Логарифмічна функція має розріз уздовж дійсної осі від $\ln(x+1)$. Поліном Тейлора, будучи цілою функцією, не може адекватно відтворити поведінку функції поблизу розрізу. Апроксимант Паде, розміщуючи полюси вздовж цього розрізу (у даному випадку комплексні полюси знаменника), створює ефективну апроксимацію розрізу, що різко підвищує точність на дійсній осі $-\infty$ до $+\infty$ і навіть далеко від точки розкладу.

Отримані результати підтверджують та кількісно уточнюють висновки попередніх теоретичних робіт. Ще у класичній праці Baker (1996) було показано, що апроксиманти Паде збігаються швидше за степеневі ряди для широкого класу функцій. Наше дослідження доповнює ці висновки кількісними оцінками похибок для конкретних функцій, важливих у теорії управління.

Порівняно з роботами Bender та Orszag (1999), де розглядалися переважно фізичні застосування, у даному дослідженні акцент зроблено на аспектах, критичних для теорії автоматичного регулювання: збереження правильної асимптотики, обмеженість вихідного сигналу та стійкість. Підтверджено тезу про те, що для функцій, які мають скінченну границю на нескінченності, апроксимація Паде є найкращим вибором серед наближень, що використовують однакову кількість коефіцієнтів ряду.

Наукова значущість отриманих результатів полягає у поглибленні розуміння механізмів, що забезпечують високу точність раціональних апроксимацій. Показано, що ефективність методу Паде безпосередньо пов'язана з його здатністю моделювати особливості функцій (полюси, точки розгалуження) у комплексній площині, навіть якщо ці особливості не були явно задані. Це відкриває перспективи для застосування

методу в задачах аналітичного продовження та визначення прихованих параметрів динамічних систем.

Висновки

У даній статті проведено систематичне дослідження можливостей застосування апроксимацій Паде для аналізу складних нелінійних систем, а також здійснено порівняльний аналіз ефективності цього методу відносно класичних степеневих розкладів Тейлора. На основі отриманих результатів можна сформулювати наступні висновки.

1. Дослідження підтвердило, що апроксимації Паде є ефективним інструментом математичного моделювання нелінійних процесів, особливо в задачах, де стандартні методи розкладу в ряди виявляються недостатньо точними або мають обмежену область застосування. Теоретичний аналіз показав, що раціональна структура апроксимантів Паде дозволяє враховувати особливості функцій (полюси, точки розгалуження) у комплексній площині, що принципово неможливо для поліноміальних наближень. Це забезпечує методу Паде фундаментальну перевагу при моделюванні систем із насиченням, резонансними явищами та біфуркаціями.

2. У ході чисельних експериментів отримано кількісні характеристики точності методу Паде для різних типів нелінійних функцій.

Для раціональної функції апроксимант Паде $[2/2]$ забезпечує точне відтворення вихідної функції, що підтверджує властивість інваріантності методу відносно класу раціональних функцій. Похибка полінома Тейлора 3-го степеня при $x = 0,8$ сягає 51,2%, тоді як апроксимація Паде дає нульову похибку.

Для функції з логарифмічною особливістю встановлено, що апроксимант Паде $[3/3]$ з 7 параметрами забезпечує максимальну абсолютну похибку на інтервалі $x[0;1]$, що у 6 разів менше за похибку полінома Тейлора 7-го степеня та майже в 20 разів менше за похибку полінома 5-го степеня. Апроксимант $[2/2]$ з 5 параметрами демонструє точність, вищу за поліном 7-го степеня з 8 параметрами.

Таким чином, результати проведеного дослідження підтверджують високу ефективність апроксимацій Паде як інструменту математичного моделювання складних нелінійних систем. Метод забезпечує суттєво вищу точність порівняно з класичними степеневими розкладами при однаковій кількості використаних параметрів, коректно відтворює асимптотичну поведінку систем за межами локальної області та дозволяє враховувати приховані особливості функцій у комплексній площині. Отримані кількісні оцінки похибок та виявлені закономірності можуть бути використані при розробці математичних моделей у теорії автоматичного керування, синергетиці, екології, економіці та інших галузях, де виникає необхідність дослідження нелінійних процесів.

Перелік використаних джерел

- [1] Baker G. A., Graves-Morris P. Padé Approximants. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1996. 746 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511530074>.
- [2] Bender C. M., Orszag S. A. Advanced Mathematical Methods for Scientists and Engineers. New York : Springer New York, 1999. 593 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3069-2>.
- [3] Boyd J. P. Padé approximant algorithm for solving nonlinear ordinary differential equation boundary value problems on an unbounded domain. *Computers in Physics*. 1997. Vol. 11. Pp. 299–303. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.168606>.
- [4] Gonnet P., Güttel S., Trefethen L. N. Robust Padé approximation via SVD. *SIAM Review*. 2013. Vol. 55(1). Pp. 101–117. DOI: <https://doi.org/10.1137/110853236>.
- [5] Higham N. J. Functions of Matrices: Theory and Computation. Philadelphia : SIAM, 2008. 425 p. DOI: <https://doi.org/10.1137/1.9780898717778>.
- [6] Boyd J. P. Chebyshev and Fourier Spectral Methods. New York : Dover Publications, 2001. 668 p.
- [7] Baker G. A. Essentials of Padé Approximants. New York : Academic Press, 1975. 308 p.
- [8] Trefethen L. N. Approximation Theory and Approximation Practice. Philadelphia : SIAM, 2013. 318 p.
- [9] NIST Handbook of Mathematical Functions / ed. by F. W. J. Olver, D. W. Lozier, R. F. Boisvert, C. W. Clark. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 951 p.
- [10] Boyd J. P. The Devil's Invention: Asymptotic, Superasymptotic and Hyperasymptotic Series. *Acta Applicandae Mathematicae*. 1999. Vol. 56. Pp. 1–98. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1006145903624>.
- [11] Kutz J. N. Data-Driven Modeling & Scientific Computation. Oxford : Oxford University Press, 2013. 491 p.
- [12] Boyd S., Vandenberghe L. Convex Optimization. Cambridge : Cambridge University Press, 2004. 727 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804441>.
- [13] Khalil H. K. Nonlinear Systems. 3rd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 750 p.
- [14] Strogatz S. H. Nonlinear Dynamics and Chaos. 2nd ed. Boulder : Westview Press, 2015. 532 p.
- [15] Slotine J.-J. E., Li W. Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1991. 459 p.

THE USE OF PADÉ APPROXIMATIONS FOR MODELLING COMPLEX NON LINEAR SYSTEMS

Gorpinchenko A.S. postgraduate student, National University of Food Technologies, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6190-7348>, e-mail: antongorpinchenkodra@gmail.com

This article examines the problem of effective mathematical modelling of complex nonlinear control and self-organisation systems, which are widely used in modern scientific research, particularly in the theory of dynamical systems, synergetics, automatic control and mathematical physics. The nonlinear nature of such systems significantly complicates the derivation of exact analytical solutions, necessitating the use of approximate methods of analysis. One promising approach to studying such systems is the use of rational approximations, in particular Padé approximations, which allow for more accurate approximations of functions compared to classical power series expansions. The aim of this work is to investigate the applicability of Padé approximations for the analysis of non-linear functions arising in the modelling of control and self-organisation processes in complex dynamic systems, as well as to compare their effectiveness with traditional polynomial approximation methods. The paper considers mathematical models described by non-linear functional dependencies and investigates their approximation properties using the example of a model function characterising the saturation process in control systems. In the course of the study, a comparative analysis of Padé approximations and Taylor polynomials was carried out. It is shown that the use of rational approximations allows for a significant improvement in approximation accuracy and an expansion of the scope of application of mathematical models, in particular beyond the radius of convergence of power series. Particular attention is paid to the analysis of approximation errors, the asymptotic behaviour of functions, and the investigation of the peculiarities of using Padé approximations for functions with logarithmic features. The results obtained demonstrate that Padé approximations can be effectively applied to simplify complex nonlinear models, analyse the stability of dynamic systems, investigate saturation regimes, and construct reduced mathematical models. Furthermore, the paper considers the numerical implementation of algorithms for constructing approximations and investigates the stability of computational procedures when determining the coefficients of rational approximations. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of applying Padé approximations to improve the efficiency of mathematical modelling of complex processes in control systems, synergetic systems and other fields of applied science. The proposed approach can be used for the analysis of non-linear dynamic processes, the optimisation of control algorithms and the development of more accurate mathematical models of complex systems.

Keywords: *Padé approximation; non-linear systems; mathematical modelling; synergetic systems; rational approximations; Taylor series; dynamic systems; control systems.*

References

- [1] G. A. Baker, and P. Graves-Morris, *Padé Approximants*, 2nd ed., Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996. doi: 10.1017/CBO9780511530074.
- [2] C. M. Bender, and S. A. Orszag, *Advanced Mathematical Methods for Scientists and Engineers*. New York, USA: Springer New York, 1999. doi: 10.1007/978-1-4757-3069-2.
- [3] J. P. Boyd, "Padé approximant algorithm for solving nonlinear ordinary differential equation boundary value problems on an unbounded domain," *Computers in Physics*, vol. 11, pp. 299–303, 1997. doi: 10.1063/1.168606.
- [4] P. Gonnet, S. Güttel, and L. N. Trefethen, "Robust Padé approximation via SVD," *SIAM Review*, vol. 55(1), pp. 101–117, 2013. doi: 10.1137/110853236.
- [5] N. J. Higham, *Functions of Matrices: Theory and Computation*. Philadelphia, USA: SIAM, 2008. doi: 10.1137/1.9780898717778.
- [6] J. P. Boyd, *Chebyshev and Fourier Spectral Methods*. New York, USA: Dover Publications, 2001.
- [7] G. A. Baker, *Essentials of Padé Approximants*. New York, USA: Academic Press, 1975.
- [8] L. N. Trefethen, *Approximation Theory and Approximation Practice*. Philadelphia, USA: SIAM, 2013.
- [9] *NIST Handbook of Mathematical Functions*, F. W. J. Olver, D. W. Lozier, R. F. Boisvert, C. W. Clark, Eds., Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- [10] J. P. Boyd, "The Devil's Invention: Asymptotic, Superasymptotic and Hyperasymptotic Series," *Acta Applicandae Mathematicae*, vol. 56., pp. 1–98, 1999. doi: 10.1023/A:1006145903624.
- [11] J. N. Kutz, *Data-Driven Modeling & Scientific Computation*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2013.
- [12] S. Boyd, and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004. doi: 10.1017/CBO9780511804441.
- [13] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd ed., Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002.
- [14] S. H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos*, 2nd ed., Boulder : Westview Press, 2015.
- [15] J.-J. E. Slotine, and W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall, 1991.

Стаття надійшла 14.02.2026

Стаття прийнята 28.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Горпинченко А. С. Використання апроксимацій Паде для моделювання складних нелінійних систем. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 2. С. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359933>.

163 БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.8:616-006.6

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359935

ДВОЕТАПНА СИСТЕМА ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ УРАЖЕНЬ ШКІРИ

Нечипоренко Н.І.	студентка, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, e-mail: nataliakhotsenko@gmail.com ;
Хоменко О.С.	канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3753-3033 , e-mail: o.s.khomenko@ust.edu.ua ;
Лосіхін Д.А.	ст. викладач, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6325-7263 , e-mail: elenahtks@ukr.net

Рак шкіри є одним із найпоширеніших онкологічних захворювань, а раннє виявлення суттєво підвищує ефективність лікування. У зв'язку з цим актуальним є застосування методів штучного інтелекту для автоматизованого аналізу дерматоскопічних зображень. У роботі запропоновано двоетапну систему глибокого навчання: на першому етапі визначається наявність ділянки шкіри на зображенні за допомогою MobileNetV3-Small, на другому – класифікуються ураження за сімома діагностичними категоріями із використанням EfficientNet-B4. Для підвищення точності та узагальнювальної здатності моделей застосовано попередню обробку зображень, доповнення даних та балансування класів. Інтерпретованість результатів забезпечується методом Grad-CAM, що дозволяє візуалізувати ділянки, які найбільше впливають на прогноз. Результати експериментів на наборі дерматоскопічних зображень HAM10000 демонструють високу точність класифікації (до 94 %) та стабільність роботи системи на реальних даних. Запропонований підхід може бути використаний як інструмент підтримки попереднього скринінгу уражень шкіри та раннього виявлення онкологічних захворювань.

Ключові слова: штучний інтелект; глибоке навчання; класифікація уражень шкіри; дерматоскопічні зображення; згорткові нейронні мережі; раннє виявлення раку шкіри; пояснюваний штучний інтелект; HAM10000 dataset.

Постановка проблеми

Рак шкіри – одне із найпоширеніших онкологічних захворювань у світі, а своєчасне виявлення патологічних змін підвищує ефективність лікування та знижує смертність. У сучасній практиці важливу роль відіграє дерматоскопічний аналіз зображень уражень шкіри, що дозволяє виявляти потенційно небезпечні новоутворення на ранніх стадіях [1]. Проте такий аналіз потребує високої кваліфікації спеціалістів і значного часу, що обмежує масовий скринінг. Тому актуальним є застосування методів штучного інтелекту та глибокого навчання для автоматизації аналізу медичних зображень [2].

Автоматична класифікація уражень шкіри залишається складною проблемою через варіативність умов отримання зображень, зокрема освітлення, якість фото, тон шкіри, форму та розмір уражень [3]. Додатково існує дисбаланс класів у медичних наборах даних, а зображення можуть містити фонові області або сторонні об'єкти, що здатне спричинити помилкові прогнози [4].

Предметом дослідження вчених є методи та моделі глибокого навчання для автоматизованого аналізу дерматоскопічних зображень і класифікації уражень шкіри. Особливу увагу приділяється підвищенню

надійності моделей у реальних умовах, стійкості до шумних даних та інтерпретованості результатів [5].

Виникає необхідність розроблення інтелектуальної системи, здатної автоматично виділяти релевантні ділянки шкіри, класифікувати ураження за діагностичними категоріями та надавати пояснення прогнозів. Це передбачає створення надійної моделі глибокого навчання, використання сучасних архітектур згорткових нейронних мереж, методів обробки та доповнення даних, а також зручного інтерфейсу для інтерактивної взаємодії користувача з системою.

Таким чином, дослідження спрямоване на вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності автоматизованого аналізу уражень шкіри на основі методів штучного інтелекту, що має значення для розвитку медичних інформаційних систем та підтримки раннього скринінгу онкологічних захворювань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останніми роками методи штучного інтелекту та глибокого навчання активно застосовуються для аналізу медичних зображень, зокрема для автоматизованої діагностики уражень шкіри [1], [6]. Значна кількість досліджень присвячена використанню згорткових нейронних мереж для класифікації

дерматоскопічних зображень, що дозволяє автоматично виявляти характерні візуальні ознаки різних типів шкірних новоутворень [7].

У низці робіт було продемонстровано високу ефективність глибоких нейронних мереж у задачах класифікації уражень шкіри. Зокрема, дослідження показують, що сучасні архітектури згорткових нейронних мереж, такі як ResNet, DenseNet, EfficientNet та MobileNet, здатні досягати високої точності під час аналізу дерматоскопічних зображень [8-10]. Попередні дослідження повідомляють про точність класифікації в діапазоні від 80 до 92% на наборі даних HAM10000 з використанням архітектур на основі CNN. Використання великих відкритих наборів даних, зокрема HAM10000 та ISIC, сприяло розвитку алгоритмів автоматичної діагностики та дозволило порівнювати ефективність різних підходів [11].

Разом із тим у науковій літературі відзначаються певні обмеження існуючих методів. Однією з основних проблем є дисбаланс класів у медичних наборах даних, що може призводити до упередженості моделей у бік найбільш представлених категорій [4, 12]. Іншою проблемою є значна варіативність якості зображень, різні умови освітлення, відмінності у тоні шкіри та наявність сторонніх об'єктів на фотографіях [13, 14]. Деякі дослідження повідомляють, що точність моделей сильно знижується для рідкісних класів і уражень, що мають подібні візуальні характеристики. Це може суттєво знижувати точність автоматизованих систем.

Крім того, значна частина існуючих досліджень зосереджується лише на задачі класифікації уражень, не враховуючи попередній етап визначення релевантної ділянки шкіри на зображенні. Це може призводити до помилкових прогнозів у випадках, коли система аналізує фонові області або об'єкти, що не належать до шкіри [15]. Також актуальною залишається проблема інтерпретованості моделей глибокого навчання, оскільки для медичних застосувань важливо розуміти причини прийняття певних рішень алгоритмом.

У зв'язку з цим сучасні дослідження все частіше приділяють увагу використанню методів пояснюваного штучного інтелекту, таких як Grad-CAM, які дозволяють візуалізувати області зображення, що найбільше впливають на прогноз моделі [16, 17]. Порівняльний аналіз сучасних методів показує, що деякі архітектури CNN досягають високої точності, проте в реальних умовах з шумними або нерелевантними зображеннями продуктивність може падати на 5–10%. Однак питання поєднання високої точності класифікації, стійкості до шумних вхідних даних та прозорості прийняття рішень залишається актуальним.

Таким чином, аналіз наукових публікацій свідчить про значний прогрес у використанні методів глибокого навчання для аналізу дерматоскопічних зображень, однак низка важливих аспектів, зокрема підвищення надійності моделей у реальних умовах, ефективна робота з нерелевантними зображеннями та забезпечення інтерпретованості результатів, потребує

подальших досліджень. Це обумовлює необхідність розроблення нових підходів до автоматизованого аналізу уражень шкіри, що поєднують ефективні моделі глибокого навчання з методами підвищення стійкості та пояснюваності прогнозів.

Мета статті

Метою даної роботи є розроблення системи автоматизованого аналізу уражень шкіри на основі методів глибокого навчання для підтримки попереднього скринінгу за дерматоскопічними зображеннями. Реалізація цієї мети передбачає створення надійного підходу, здатного забезпечити стабільну роботу моделі в умовах реальних зображень та підвищити інтерпретованість отриманих результатів.

Матеріали та методи

Матеріали. Для навчання та оцінки системи використано набір дерматоскопічних зображень HAM10000, який містить 10 000 знімків шкіри людини, класифікованих за сімома діагностичними категоріями: меланоцитарні невуси (nv), меланома (mel), доброякісні кератозоподібні ураження (bkl), базально-клітинна карцинома (bcc), актинний кератоз / хвороба Боуена (akiec), дерматофіброма (df) та судинні ураження (vasc). Набір демонструє сильний дисбаланс класів, при якому доброякісні ураження представлені значно частіше, ніж злоякісні. Для підготовки даних застосовано стратифіковане розділення на навчальну, валідаційну та тестову підмножини, що дозволяє зберегти пропорції класів у всіх розділеннях.

Методи. Система реалізована як двоетапний конвеєр глибокого навчання:

- Виявлення шкіри: бінарний класифікатор на основі MobileNetV3-Small, який приймає зображення розміром 224×224 пікселів. Це дозволяє ефективно відфільтровувати нерелевантні області.

- Класифікація уражень: порівнювались дві версії: EfficientNet-B3 (300×300 пікселів) та EfficientNet-B4 (380×380 пікселів), що забезпечує різну деталізацію при виділенні складних ознак у семи діагностичних категоріях.

Для покращення якості навчання та узагальнення моделей застосовано:

- Попередню обробку зображень (масштабування, нормалізація за ImageNet).

- Доповнення даних: випадкове кадрування, обертання, горизонтальне та вертикальне перевертання, афінні трансформації, регулювання яскравості, контрасту, насиченості та гаусове розмиття.

Щоб вирішити проблему дисбалансу класів, застосовано зважену випадкову вибірку та введено ваги класів у функцію втрат перехресної ентропії, що дозволяє підвищити увагу моделі до рідкісних категорій.

Моделі навчалися за допомогою оптимізатора AdamW з різними стратегіями планування швидкості навчання: для MobileNetV3 – «зменшення на плато»,

для EfficientNet-B4 – косинусне зменшення швидкості. Навчання виконувалося на GPU для прискорення обчислень.

Для підвищення інтерпретованості результатів застосовано метод Grad-CAM, який дозволяє візуально виділити ділянки зображень, що найбільше впливають на прогноз.

Для користувачів створено інтерактивний інтерфейс на базі Gradio, що дозволяє завантажувати зображення, обирати ділянку для аналізу, переглядати прогнозований діагноз та оцінку достовірності, а також карту уваги Grad-CAM і короткі автоматично згенеровані пояснення.

Виклад основного матеріалу

Метод збереження цифрових медичних Для автоматизованого аналізу уражень шкіри розроблено двоетапну систему на основі глибокого навчання. Перший етап передбачає виявлення ділянок шкіри за допомогою бінарного класифікатора на основі архітектури MobileNetV3-Small, що дозволяє відфільтровувати фоніві області та сторонні об'єкти, зменшуючи кількість хибних прогнозів (рис. 1).

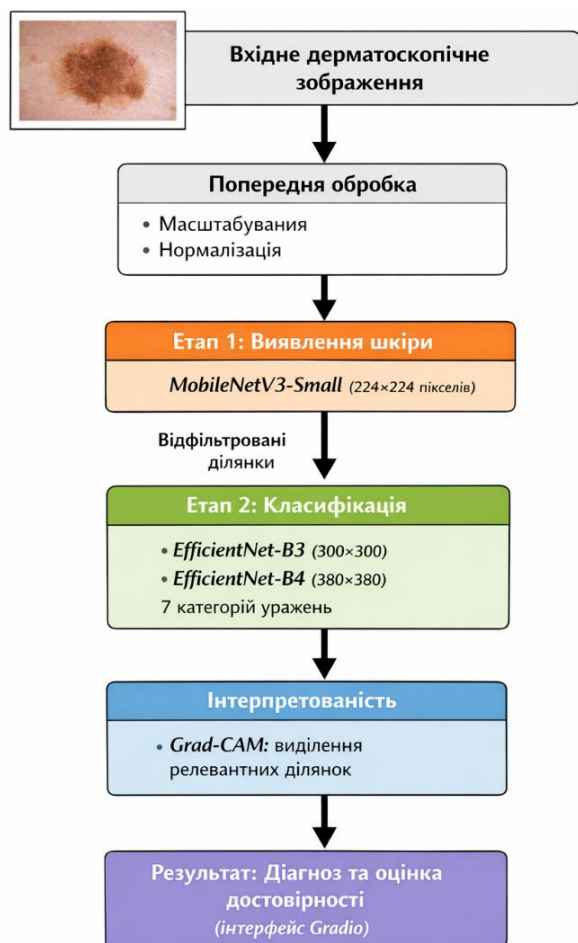


Рис. 1 – Двоетапний pipeline системи глибокого навчання для автоматизованого аналізу уражень шкіри

На другому етапі здійснюється класифікація уражень шкіри з використанням моделей EfficientNet-B3 та EfficientNet-B4, які забезпечують високоточне виділення складних ознак за сімома діагностичними категоріями.

Для навчання та оцінки моделей використано набір дерматоскопічних зображень HAM10000, що містить 10 000 знімків із семи категорій уражень. Дані розділено на навчальну, валідаційну та тестову підмножини за допомогою стратифікованої вибірки для збереження пропорцій класів. Перед навчанням зображення масштабувалися до 224×224 пікселів та нормалізувалися відповідно до параметрів ImageNet.

Для підвищення узагальнювальної здатності моделей застосовувалися методи доповнення даних: випадкове кадрування, горизонтальні та вертикальні відзеркалення, обертання, афінні перетворення, зміна яскравості, контрастності та насиченості, а також гаусове розмиття. Доповнення застосовувалося лише до навчальної підмножини. Для подолання дисбалансу класів використовувалися зважена випадкова вибірка та ваги класів у функції втрат перехресної ентропії.

Навчання здійснювалося з оптимізатором AdamW, і застосуванням адаптивного зменшення швидкості навчання: для MobileNetV3 – при відсутності покращення на валідації, для EfficientNet – за косинусною схемою.

Інтерпретованість моделі забезпечується методом Grad-CAM, який формує теплові карти, що виділяють ділянки зображень, які найбільше впливають на прогноз. Для практичного використання системи створено інтерактивний інтерфейс на базі Gradio, що дозволяє завантажувати зображення, отримувати діагноз із оцінкою достовірності та переглядати теплові карти.

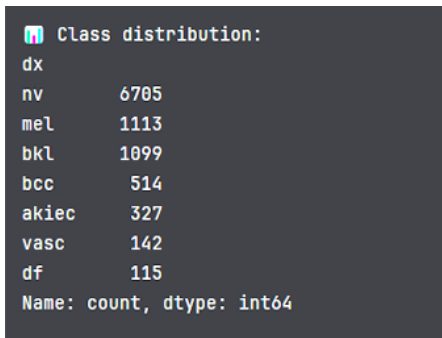
Оцінка ефективності здійснювалася за метриками assgасу, precision, recall, F1-score та матрицею невідповідностей, що дозволяє оцінити продуктивність моделей для кожного класу окремо та визначити придатність системи для попереднього скринінгу уражень шкіри.

Результати та їх обговорення

Для перевірки ефективності запропонованого підходу було проведено серію експериментів із використанням набору дерматоскопічних зображень HAM10000 (рис. 2). Навчання та оцінювання моделей здійснювалися на навчальній, валідаційній та тестовій підмножинах даних. Під час експериментів аналізувалася динаміка зміни значень точності класифікації та функції втрат на різних етапах навчання.

Результати навчання показали стабільну збіжність моделей і поступове зменшення значення функції втрат на валідаційній вибірці, що свідчить про ефективність обраної конфігурації навчання. У процесі експериментального дослідження було встановлено, що модель EfficientNet-B4 продемонструвала значно вищу точність класифікації (94 %) порівняно з моделлю

EfficientNet-B3, для якої показник accuracy склав 78,5 %. Така різниця пояснюється особливостями архітектури EfficientNet, що базується на принципі compound scaling – одночасному масштабуванні глибини мережі, її ширини та розміру вхідного зображення.



```

Class distribution:
dx      6705
nv      1113
mel     1099
bkl      514
akiec    327
vasc     142
df       115
Name: count, dtype: int64

```

Рис. 2 – Аналізована кількість зображень

Модель EfficientNet-B4 має більшу кількість параметрів і працює з вищою роздільною здатністю вхідних зображень (380×380 пікселів) порівняно з EfficientNet-B3 (300×300 пікселів). Використання більшої роздільної здатності дозволяє моделі зберігати більше візуальної інформації та краще виявляти дрібні структурні особливості на зображеннях, що особливо важливо для задач медичної класифікації. Більша глибина та кількість параметрів забезпечують вищу репрезентативну здатність моделі, що дозволяє ефективніше виділяти складні ознаки та залежності у даних.

Додатково, використання попередньо навчених ваг на ImageNet дозволяє EfficientNet-B4 ефективніше переносити узагальнені візуальні ознаки у нову предметну область та швидше адаптуватися до специфіки HAM10000. Таким чином, отримані результати свідчать, що використання більш масштабованої архітектури EfficientNet-B4 дозволяє досягти значно кращої якості класифікації порівняно з EfficientNet-B3.

Модель EfficientNet-B4 продемонструвала високу здатність до розпізнавання візуальних ознак дерматоскопічних зображень і досягла високих показників точності класифікації для більшості діагностичних категорій.

Для порівняння ефективності різних архітектур на тестовій вибірці наведено таблицю з основними метриками (табл. 1). Для детальнішого аналізу ефективності моделі EfficientNet-B4 наведено окрему таблицю з метриками precision, recall та F1-score для кожного класу уражень шкіри (табл. 2). Дані метрики дозволяють оцінити: Accuracy – загальну ефективність, Precision – наскільки передбачення моделі для хвороби надійні, Recall – наскільки добре модель знаходить всі випадки хвороби, F1-score – баланс між Precision та Recall, особливо важливий при рідкісних патологіях

Таблиця 1

Порівняння ефективності різних архітектур

Архітектура	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)
EfficientNet-B3	78,5	78,5	80,0	79
DenseNet-121	88	86,5	87	87
EfficientNet-B4	94	94	90	92

Найкращі результати спостерігалися для класів із чітко вираженими морфологічними ознаками, тоді як окремі труднощі виникали під час розмежування візуально подібних категорій уражень.

Таблиця 2

Метрики precision, recall та F1-score для кожного класу уражень шкіри

Клас ураження	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)
Actinic keratoses (akiec)	90	89	90
Basal cell carcinoma (bcc)	93	90	92
Benign keratosis (bkl)	88	86	87
Dermatofibroma (df)	80	83	83
Melanoma (mel)	90	88	89
Melanocytic nevus (nv)	93	93	93
Vascular lesions (vasc)	88	87	88

Запропонована двоетапна архітектура (визначення ділянок шкіри + класифікація) показала переваги порівняно з підходами, що використовують лише одну модель класифікації. Використання попереднього етапу виявлення шкіри дозволило зменшити кількість помилкових прогнозів, пов'язаних із аналізом фонових областей або сторонніх об'єктів на зображеннях. У результаті система демонструє більш стабільну роботу в умовах реальних фотографічних даних, де можливі різноманітні шуми та нерелевантні елементи.

Додатковий аналіз результатів показав, що застосування методів доповнення даних та стратегій балансування класів позитивно вплинуло на узагальнювальну здатність моделі. Використання зваженої випадкової вибірки та ваг класів у функції втрат дозволило підвищити точність розпізнавання рідкісних категорій уражень, що є важливим для медичних застосувань.

Використання методу Grad-CAM забезпечило можливість візуального аналізу роботи моделі. Отримані теплові карти демонструють (рис. 3), що нейронна

мережа зосереджує увагу на ділянках зображення, які відповідають патологічним змінам шкіри, що підтверджує коректність процесу прийняття рішень моделлю та підвищує довіру до результатів автоматизованого аналізу.

Отримані результати узгоджуються з сучасними дослідженнями у сфері автоматизованого аналізу дерматоскопічних зображень, де згорткові нейронні мережі демонструють високу ефективність у задачах класифікації уражень шкіри. Водночас запропонований у роботі двоетапний підхід дозволяє підвищити стійкість системи до шумових факторів та нерелевантних областей зображення, що є важливою перевагою порівняно з підходами, які використовують лише одну модель класифікації.

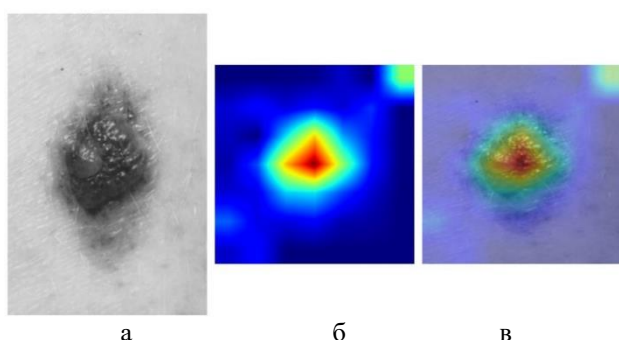


Рис. 3 – Візуалізація важливих ділянок моделі за допомогою Grad-CAM: а – оригінальне зображення, б – теплова карта Grad-CAM, в – накладення карти уваги моделі на оригінальне зображення

Таким чином, результати експериментів підтверджують ефективність запропонованого підходу та демонструють можливість використання двоетапної системи глибокого навчання для задач автоматизованого аналізу дерматоскопічних зображень. Результати свідчать про перспективність використання подібних систем як інструментів підтримки попереднього скринінгу уражень шкіри та допомоги у ранньому виявленні онкологічних захворювань.

Висновки

Отримані результати демонструють ефективність глибокого навчання для автоматизованого аналізу дерматоскопічних зображень. Архітектура EfficientNet-B4 забезпечила високу точність класифікації, а двоетапна структура системи (виявлення шкіри + класифікація уражень) підвищила стійкість до нерелевантних і зашумлених даних. Методи доповнення даних та балансування класів покращили узагальнювальні здатності моделей, особливо для рідкісних патологій. Використання Grad-CAM забезпечило прозорість роботи системи та підвищило довіру до результатів.

Наукова новизна роботи полягає у: поєднанні двоетапного підходу; інтеграції методів пояснюваного

AI та створенні практичного інтерфейсу для клінічного використання.

Подальші дослідження можуть включати більші набори даних, ансамблі моделей та додаткову клінічну інформацію для підвищення точності діагностики.

Фінансування та подяки

Роботу виконано з використанням матеріально-технічних ресурсів Сілезького університету технологій (Politechnika Śląska), факультету біомедичної інженерії (Faculty of Biomedical Engineering), в рамках навчальної роботи без додаткових джерел фінансування.

Перелік використаних джерел

- [1] Bozkurt F. Skin lesion classification on dermoscopic images using effective data augmentation and pre-trained deep learning approach. *Multimedia Tools and Applications*. 2023. Vol. 82. Pp. 18985–19003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-022-14095-1>.
- [2] Advances in Deep Learning for Medical Image Analysis: A Comprehensive Investigation / R. R. Kumar et al. *Journal of Statistical Theory and Practice*. 2025. Vol. 19. Article 9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42519-024-00422-2>.
- [3] Shobayo O., Saatchi R. Developments in Deep Learning Artificial Neural Network Techniques for Medical Image Analysis and Interpretation. *Diagnostics*. 2025. Vol. 15, no. 9. Article 1072. DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics15091072>.
- [4] Unraveling the Impact of Class Imbalance on Deep-Learning Models for Medical Image Classification / C. J. Hellin et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 8. Article 3419. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14083419>.
- [5] Evaluating the robustness of explainable AI in medical image recognition under natural and adversarial data corruption / S. Repetto et al. *Machine Learning*. 2026. Vol. 115. Article 4. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-025-06919-6>.
- [6] Transformers in Skin Lesion Classification and Diagnosis: A Systematic Review / A. Adebisi et al. *MedRxiv*. 2024. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.1101/2024.09.19.24314004>.
- [7] Skin lesion classification of dermoscopic images using machine learning and convolutional neural network / B. Shetty et al. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 18134. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22644-9>.
- [8] Classification of Skin Lesions Using Convolutional Neural Networks and Soft Attention / Tran N.-T., Le X.-K., Pham T.-T.-H., Le T.-H. *10th International Conference on the Development of Biomedical Engineering in Vietnam*, Phan Thiet, Vietnam, 25-27 July 2024. Pp. 289–304. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-90194-2_21.

- [9] Alruwaili M., Mohamed M. An Integrated Deep Learning Model with EfficientNet and ResNet for Accurate Multi-Class Skin Disease Classification. *Diagnostics*. 2025. Vol. 15, no. 5. Article 551. DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics15050551>.
- [10] Ahmed A., Hengy M., Daveluy S. Comparative evaluation of AI algorithms for dermoscopic image analysis in skin disease diagnosis: a systematic review of model accuracy and methodological heterogeneity. *Archives of Dermatological Research*. 2026. Vol. 318. Article 64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00403-025-04458-7>.
- [11] Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H. The HAM10000 dataset: A large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions. *Scientific Data*. 2018. Vol. 5. Article 180161. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.161>.
- [12] Handling imbalanced medical datasets: review of a decade of research / M. Salmi et al. *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57. Article 273. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10884-2>.
- [13] DermViT: Diagnosis-Guided Vision Transformer for Robust and Efficient Skin Lesion Classification / X. Zhang et al. *Bioengineering*. 2025. Vol. 12, no. 4. Article 421. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering12040421>.
- [14] Shih P. E., Oh D. H. Artificial Intelligence for Dermatological Image Quality Assessment. *Current Dermatology Reports*. 2025. Vol. 14. Article 23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13671-025-00483-x>.
- [15] Efficient and real-time skin lesion image segmentation using spatial-frequency information and channel convolutional networks / Liu S., Zhou B., Lin Y., Wang P. *Journal of Real-Time Image Processing*. 2024. Vol. 21. Article 165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11554-024-01542-5>.
- [16] Aras H. H., Doğan N. A comparative analysis for skin cancer detection by using explainable deep learning. *Neural Comput & Applic*. 2026. Vol. 38. Article 50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-025-11809-y>.
- [17] Enhancing Skin Cancer Diagnosis with XAI: Integrating Grad-CAM, SHAP, and LIME for Model Interpretability / D. Jadhav et al. 2025 6th International Conference for Emerging Technology (INCET), Belgaum, India, 23-25 May 2025. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/INCET64471.2025.11140007>.

A TWO-STAGE DEEP LEARNING SYSTEM FOR SKIN LESION CLASSIFICATION

- | | |
|--------------------------|---|
| Nechiporenko N.I. | student, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, e-mail: nataliakhotsenko@gmail.com ; |
| Khomenko O.S. | PhD (Engineering), associate professor, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3753-3033 , e-mail: o.s.khomenko@ust.edu.ua ; |
| Losikhin D.A. | senior lecturer, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6325-7263 , e-mail: elenahths@ukr.net |

Skin cancer remains one of the most prevalent oncological diseases worldwide, and its early detection is crucial for improving treatment outcomes and reducing mortality rates. In this regard, the application of artificial intelligence techniques for the automated analysis of dermoscopic images has gained significant attention. This study presents a two-stage deep learning framework for the classification of skin lesions, integrating a preliminary skin region detection stage with a subsequent diagnostic classification stage. In the first stage, a MobileNetV3-Small model is employed to identify the presence of skin regions within input images, enabling the exclusion of irrelevant background areas and thereby reducing the likelihood of erroneous predictions. In the second stage, an EfficientNet-B4 convolutional neural network is utilized to classify lesions into seven diagnostic categories, including melanoma, basal cell carcinoma, dermatofibroma, and other clinically relevant classes. To enhance model performance and generalization capability, a comprehensive data processing pipeline is implemented, incorporating image preprocessing, data augmentation techniques, and class balancing strategies. These approaches mitigate the effects of class imbalance and improve the robustness of the model when applied to real-world data. Furthermore, model interpretability is addressed through the use of the Grad-CAM method, which enables visualization of the most influential regions contributing to the model's predictions, thereby increasing the transparency and reliability of the system for medical applications. The proposed approach is evaluated on the publicly available HAM10000 dermoscopic image dataset, comprising 10,000 images across seven diagnostic categories. Experimental results demonstrate that the EfficientNet-B4 model achieves high classification performance, with accuracy reaching up to 94%, outperforming several alternative architectures. The inclusion of the initial skin detection stage further enhances system robustness by reducing the impact of noise and irrelevant image content. In conclusion, the developed two-stage deep learning system demonstrates strong potential as a decision-support tool for preliminary skin lesion screening, facilitating early detection of oncological conditions and contributing to improved

diagnostic workflows. The findings of this study highlight the effectiveness and highlight the effectiveness and potential of deep learning methods deep learning methods in biomedical engineering and medical imaging applications.

Keywords: artificial intelligence; deep learning; skin lesion classification; dermatoscopic images; convolutional neural networks; early detection of skin cancer; explanatory artificial intelligence; HAM10000 dataset.

References

- [1] F. Bozkurt, "Skin lesion classification on dermatoscopic images using effective data augmentation and pre-trained deep learning approach," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, pp. 18985–19003, 2023. doi: 10.1007/s11042-022-14095-1.
- [2] R. R. Kumar, S. V. Shankar, R. Jaiswal, M. Ray, N. Budhlakoti, and K. N. Singh, "Advances in Deep Learning for Medical Image Analysis: A Comprehensive Investigation," *Journal of Statistical Theory and Practice*, vol. 19, article 9, 2025. doi: 10.1007/s42519-024-00422-2.
- [3] O. Shobayo and R. Saatchi, "Developments in Deep Learning Artificial Neural Network Techniques for Medical Image Analysis and Interpretation," *Diagnostics*, vol. 15, no. 9, article 1072, 2025. doi: 10.3390/diagnostics15091072.
- [4] C. J. Hellín, A. A. Olmedo, A. Valledor, J. Gómez, M. López-Benítez, and A. Tayebi, "Unraveling the Impact of Class Imbalance on Deep-Learning Models for Medical Image Classification," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 8, article 3419, 2024. doi: 10.3390/app14083419.
- [5] S. Repetto, I. Maljkovic, M. Lotto, A. E. Cinà, S. Vascon, and F. Roli, "Evaluating the robustness of explainable AI in medical image recognition under natural and adversarial data corruption," *Machine Learning*, vol. 115, article 4, 2026. doi: 10.1007/s10994-025-06919-6.
- [6] A. Adebisi, N. Abdalnabi, E. J. Simoes, M. Becevic, E. H. Smith, and P. Rao, "Transformers in Skin Lesion Classification and Diagnosis: A Systematic Review," *MedRxiv*, 2024. doi: 10.1101/2024.09.19.24314004.
- [7] B. Shetty, R. Fernandes, A. P. Rodrigues, R. Chengoden, S. Bhattacharya, and K. Lakshmana, "Skin lesion classification of dermatoscopic images using machine learning and convolutional neural network," *Scientific Reports*, vol. 12, article 18134, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-22644-9.
- [8] N.-T. Tran, X.-K. Le, T.-T.-H. Pham, and T.-H. Le, "Classification of Skin Lesions Using Convolutional Neural Networks and Soft Attention," in *Proc. of the 10th Int. Conf. on the Development of Biomedical Engineering in Vietnam*, Phan Thiet, Vietnam, July 25–27, 2024, pp. 289–304. doi: 10.1007/978-3-031-90194-2_21.
- [9] M. Alruwaili, and M. Mohamed, "An Integrated Deep Learning Model with EfficientNet and ResNet for Accurate Multi-Class Skin Disease Classification," *Diagnostics*, vol. 15, no. 5, article 551, 2025. doi: 10.3390/diagnostics15050551.
- [10] A. Ahmed, M. Hengy, and S. Daveluy, "Comparative evaluation of AI algorithms for dermatoscopic image analysis in skin disease diagnosis: a systematic review of model accuracy and methodological heterogeneity," *Archives of Dermatological Research*, vol. 318, article 64, 2026. doi: 10.1007/s00403-025-04458-7.
- [11] P. Tschandl, C. Rosendahl, and H. Kittler, "The HAM10000 dataset: A large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions," *Scientific Data*, vol. 5, article 180161, 2018. doi: 10.1038/sdata.2018.161.
- [12] M. Salmi, D. Atif, D. Oliva, A. Abraham, and S. Ventura, "Handling imbalanced medical datasets: review of a decade of research," *Artificial Intelligence Review*, vol. 57, article 273, 2024. doi: 10.1007/s10462-024-10884-2.
- [13] X. Zhang, et al., "DermViT: Diagnosis-Guided Vision Transformer for Robust and Efficient Skin Lesion Classification," *Bioengineering*, vol. 12, no. 4, article 421, 2025. doi: 10.3390/bioengineering12040421.
- [14] P. E. Shih, and D. H. Oh, "Artificial Intelligence for Dermatological Image Quality Assessment," *Current Dermatology Reports*, vol. 14, article 23, 2025. doi: 10.1007/s13671-025-00483-x.
- [15] S. Liu, B. Zhou, Y. Lin, and P. Wang, "Efficient and real-time skin lesion image segmentation using spatial-frequency information and channel convolutional networks," *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 21, article 165, 2024. doi: 10.1007/s11554-024-01542-5.
- [16] H.H. Aras, and N. Doğan, "A comparative analysis for skin cancer detection by using explainable deep learning," *Neural Comput & Applic*, vol. 38, article 50, 2026. doi: 10.1007/s00521-025-11809-y.
- [17] D. Jadhav, A. Yadav, A. Yadav, Y. Dusankar, Y. Nalawade, and S. Yawale, "Enhancing Skin Cancer Diagnosis with XAI: Integrating Grad-CAM, SHAP, and LIME for Model Interpretability," in *Proc. 6th International Conference for Emerging Technology (INCET)*, Belgaum, India, 23–25 May 2025, pp. 1–8, 2025. doi: 10.1109/INCET64471.2025.11140007.

Стаття надійшла 05.03.2026

Стаття прийнята 21.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Нечипоренко Н. І., Хоменко О. С., Лосіхін Д. А. Двоетапна система глибокого навчання для класифікації уражень шкіри. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 93–99. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359935>.

183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 504.064:662.74:66.097.3

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359939

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ КОКСОХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ ШЛЯХОМ КАТАЛІТИЧНОГО ЗНЕШКОДЖЕННЯ ВИКИДІВ НА ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ Fe-AL КАТАЛІЗАТОРАХ

Бєлоконь К.В.	канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2000-4052 , e-mail: kv.belokon@gmail.com ;
Мальований М.С.	д-р техн. наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3868-1070 , e-mail: myroslav.mal@gmail.com ;
Проскурнін О.А.	д-р техн. наук, ст. наук. співробітник, Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9774-9306 , e-mail: proskurnin_o@ukr.net

Проблема захисту повітряного басейну від викидів підприємств коксохімічного виробництва є актуальною, оскільки у викидах містяться токсичні вуглеводні, такі як фенол, бензол, нафталін та інші. Для знешкодження відхідних газів коксохімічного виробництва доцільним є застосування каталітичного методу. Суттєво знизити забруднення атмосферного повітря можна шляхом використання інтерметалідних залізо-алюмінієвих каталізаторів із добавками перехідних металів. У статті визначено оптимальний склад та параметри експлуатації каталізатора, що забезпечують його максимальну ефективність: частку Al у суміші Al/Fe, кількість лежучої добавки Mn та робочу температуру. З цією метою за експериментальними даними побудовано регресійну залежність ефективності очищення газів від зазначених параметрів. Шляхом розв'язання оптимізаційної задачі отримано такі оптимальні значення робочої температури, частки Al у суміші Al/Fe та кількості добавки марганцю: $T = 299,16^{\circ}\text{C}$, $p = 50,51\%$, $f = 10,14\%$ відповідно. Математичне очікування ефективності очищення газів при цьому становитиме 96,18%. Впровадження інтерметалідних каталізаторів на підприємстві ПрАТ «Запоріжжестокс» дозволить модернізувати виробництво за європейськими екологічними стандартами. Високий ступінь очищення (понад 96%) при достатньо низькій температурі очищення газів (близько 300°C) дозволяють зробити інтерметалідний каталізатор конкурентоспроможним порівняно з дорогими аналогами на основі благородних металів. Результати проведених досліджень можуть бути використані в період післявоєнного відновлення України з метою забезпечення екологічної безпеки підприємств коксохімічного виробництва.

Ключові слова: забруднення атмосфери; органічні речовини; коксохімічне виробництво; вуглеводні; інтерметалідний каталізатор; перехідні метали; ефективність очищення; оптимізація; робоча температура.

Постановка проблеми

Проблема охорони навколишнього середовища протягом останніх років є актуальною для всіх промислово розвинутих регіонів. [1]. Зокрема джерелом інтенсивного забруднення повітря робочих зон і оточуючого середовища пилом та шкідливими газами є коксохімічне виробництво.

Токсичні органічні речовини, що утворюються в процесі коксохімічного виробництва, являють собою складну суміш із високим рівнем перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), частина яких має яскраво виражені канцерогенні та мутагенні властивості, викликають лейкемію, вроджені вади тощо. Канцерогенні властивості речовин посилюються іншими продуктами – сажею, смолами, олівами [2].

Питомі викиди в середньому по коксохімічних заводах становлять 4,48 кг/т коксу. Цей показник є

досить високим порівняно з європейським, де питомі викиди становлять 2-3 кг/т коксу [3].

При існуючій технології виробництва, вловлювання та переробки хімічних продуктів коксування джерела викидів коксохімічних заводів є різноманітними як за обсягом викидів, так і за складом хімічних забруднень, і кожен із них потребує окремих технічних рішень та значних вкладень коштів для поліпшення екологічної ситуації [4].

Підвищена екологічна небезпека викидів токсичних органічних речовин визначає важливість робіт із впровадження технологій їхнього знешкодження [5].

Найбільш суттєвий вплив на стан повітряного середовища під час виготовлення коксу чинять ділянки підготовки шихти, блоки нагріву печей, а також вузли завантаження сировини та вивантаження готового продукту. Крім того, значна емісія спостерігається на етапах охолодження, сортування та на коксових рампах. Кожна стадія циклу характеризується специфічним переліком імпактних сполук, проте комплексна очистка

багатокомпонентних викидів коксохімії наразі залишається нерозв'язаною технічною проблемою.

Пошук ефективних способів дезактивації кожного окремого виду емісій у коксохімії виступає фундаментальним завданням сучасної інженерної екології. Це зумовлено необхідністю впровадження державних програм з охорони атмосфери та вдосконалення стандартів безпеки праці на великих індустріальних об'єктах. Створення систем поетапного очищення відхідних газів є ключем до сталого розвитку галузі, що гарантує підвищення якості життя населення та створення ергономічного й безпечного простору на робочих місцях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Вибір методу очищення газових викидів насамперед залежить від концентрації забруднюючих речовин і можливості утилізації вловлюваних продуктів. На сьогодні для нейтралізації аналогічних викидів застосовуються електростатичне осадження, адсорбційний та абсорбційний методи, метод термічного допалювання, а також каталітичний метод [5].

Електростатичне осадження смолистих речовин є найпоширенішим способом знешкодження газів, що містять ПАВ. До переваг способу можна віднести його нескладність, відносно дешевизну, простоту в обслуговуванні. Однак залишкова концентрація токсичних органічних речовин у очищених газах, що викидаються в атмосферу, залишається значною, що не відповідає існуючим санітарним нормам.

Адсорбційний метод очищення є одним із найпоширеніших засобів захисту навколишнього середовища. Його суть полягає в поглинанні твердими, переважно пористими тілами шкідливих домішок. Цей метод дозволяє повернути у виробництво низку цінних сполук. Проте невелика швидкість очищення, відсутність можливості очищення запиленних газів, а також висока енергомісткість є вагомими недоліками зазначеного методу.

Абсорбційний метод очищення застосовують для викидів, забруднювальні речовини яких добре розчиняються в абсорбенті, при цьому концентрація забруднювальної речовини в газовому потоці має бути більшою за 1,0% [6]. Абсорбцію застосовують для очищення викидів від сірководню, інших сірчистих сполук, парів сульфатної та хлоридної кислот, ціаністих сполук, органічних речовин (фенолу, формальдегіду тощо) [7]. Найчастіше абсорбентом слугує вода, також застосовуються розчини лугу, сульфату натрію, сечовини та інші органічні рідини. Недоліками цього методу є висока вартість очищення, додаткові витрати на регенерацію абсорбенту, необхідність виділення значних виробничих площ для організації процесу газоочищення.

У роботі [8] для боротьби з бензапіреном використовують спосіб опромінення його газових молекул ультрафіолетовим випромінюванням електричного

розряду в інтервалі довжин хвиль 340-410 нм з середньою щільністю світлової енергії 10^{-3} - $3 \cdot 10^{-1}$ Дж/см² при робочих температурах від -20°C до + 80°C. При цьому ефективність нейтралізації досягає 35%.

Очищення газових емісій методом термічного допалювання передбачає термічне розкладання шкідливих агентів (передусім вуглеводнів) до мінімально небезпечних метаболітів. Реалізація даного підходу за температурного регламенту 750-1200°C дозволяє радикально знизити концентрацію забруднювальних речовин у викидах [5]. Висока результативність такої нейтралізації робить цей метод одним із найбільш надійних рішень для досягнення жорстких екологічних нормативів очищення повітряного басейну. Також його перевагами є невеликі габарити установок і простота їх експлуатації. Недоліками термічного допалювання відхідних газів є утворення оксидів азоту в процесі високо-температурного горіння та значна витрата палива.

Застосування гетерогенних каталізаторів у системах газоочистки характеризується високою адаптивністю до складу емісій [9]. Ця технологія забезпечує ефективну конверсію сполук сірки, азоту, а також вуглеводнів та оксиду вуглецю (CO) у термодинамічно стійкі та екологічно нейтральні продукти [10]. Важливою перевагою каталітичного методу є можливість селективної обробки розбавлених газових потоків без генерування побічних токсикантів у безперервному циклі. Втім, широке впровадження таких систем часто стримується дефіцитом доступних каталітичних композицій, які б поєднували низьку собівартість із високою стійкістю до дезактивації протягом тривалого часу. Тому є актуальною розробка відносно дешевих та ефективних способів очистки викидних газів підприємств коксохімічного виробництва.

Мета статті

Метою роботи є розробка інтерметалідного каталізатора для знешкодження токсичних викидів коксохімічного виробництва, оптимізація його складу та параметрів експлуатації (на прикладі підприємства ПрАТ «Запоріжжкокс»).

Виклад основного матеріалу

Підприємство ПрАТ «Запоріжжкокс» спеціалізується на випуску коксу 6% вологості та пековому коксу.

Супутньою продукцією є коксовий газ і продукти його очищення та переробки – смола кам'яновугільна, кам'яновугільні оливи, сульфат амонію, бензол та газова сірка.

У своєму складі підприємство ПАТ «Запоріжжкокс» має наступні цехи: залізничний, вуглепідготовчий, коксовий, уловлювання, смолоперегонного виробництва, сіркоочищення, ремонтно-механічний, енергоцех, безрейкового транспорту.

Технологічна схема коксохімічного виробництва представлена на рис. 1.

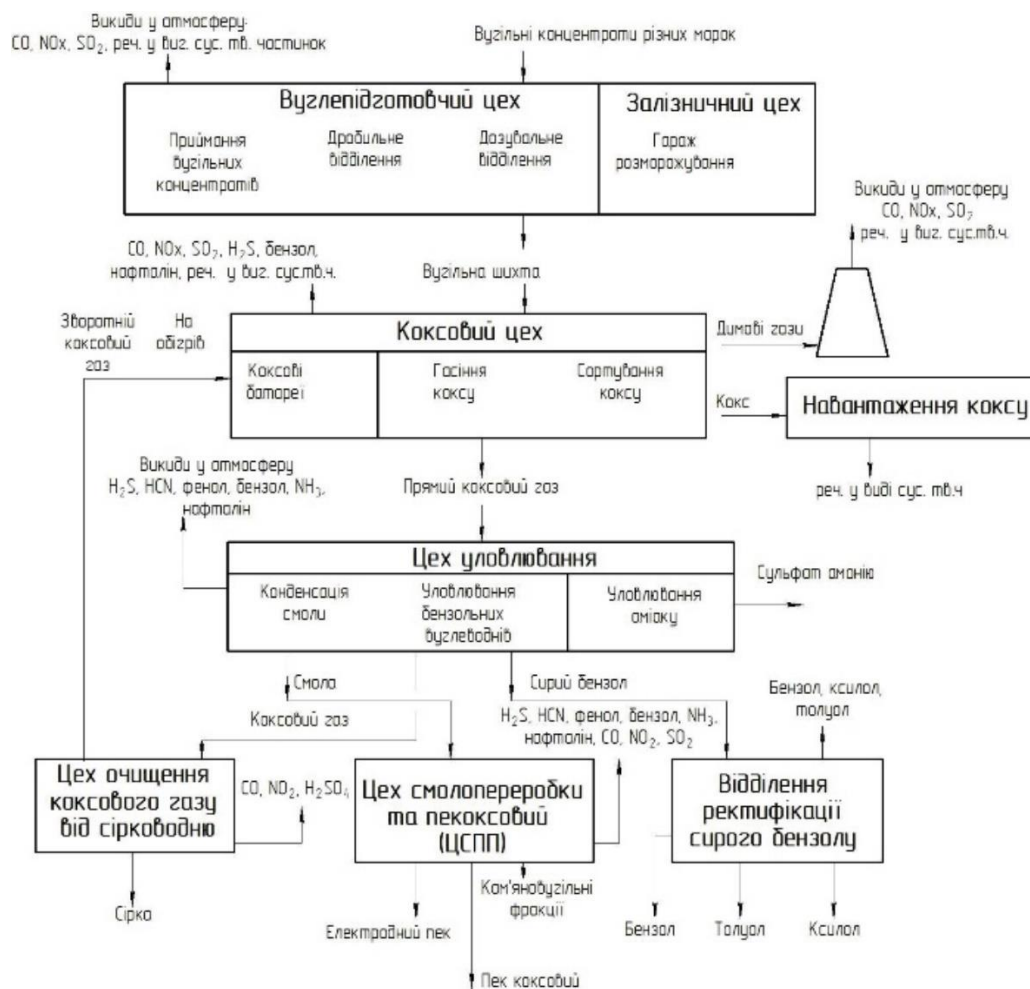


Рис. 1 – Технологічна схема коксохімічного виробництва ПрАТ «Запоріжжкокс»

Основним завданням цеху смолоперегонного виробництва є переробка кам'яновугільної смоли з метою виділення з неї компонентів, доведення їх до якісних показників готової продукції та виробництво електродного пеку.

До складу цеху входять такі підрозділи: склад смоли, відділення дистиляції смоли, установки по отриманню електродного пеку, склад масел; відділення мийки масел і склад реактивів, біохімічного очищення [5].

Початковою сировиною для цеху є кам'яновугільна смола – продукт коксування вугілля. Оскільки смола має перебувати у в'язкому стані, резервуари постійно підігріваються, переважно парою. Температура підтримання смоли у придатному для переробки стані становить від 70 до 80°C. При такій температурі відбувається виділення летких компонентів смоли, які є токсичними речовинами, які потребують знешкодження перед викидом в атмосферу. Усереднений склад викидів складу смоли представлено в табл. 1. При аналізі наведених даних, враховуючи токсичність викидів,

особливу увагу слід приділити знешкодженню фенолу, бензолу та нафталіну.

Каталітичний метод в умовах ПрАТ «Запоріжжкокс» на дільниці складу смоли реалізовано наступним чином. Установка каталітичного знешкодження газових викидів складу смоли включає два каталітичні апарати (реактори), які підключені паралельно, та тягодутьовий пристрій. Схема установки представлена на рис. 2.

Попередньо очищені на абсорбційних установках викиди надходять у каталітичний реактор (рис. 3), проходять через трубчастий теплообмінник, де їхня температура підвищується до 200-250°C (з використанням тепла очищених газів). Після теплообмінника газ спрямовується в зону електронагрівальних елементів, де нагрівається до температури 300-450°C. Ця температура є достатньою для швидкого перебігу хімічних реакцій окиснення ароматичних вуглеводнів за допомогою інтерметалідних залізо-алюмінієвих каталізаторів. У шарі каталізатора відбувається реакція окиснення вуглеводнів газоповітряної суміші до практично нешкідливих діоксиду вуглецю та води.

Таблиця 1

Склад основних викидів дільниці зберігання смоли ПрАТ «Запоріжжкокс»

Найменування речовини, хімічна формула	Концентрація речовини, мг/м ³	ГДК, мг/м ³	Клас небезпеки	Вплив на здоров'я людини
Сірководень, H ₂ S	20,26	0,008	2	Токсичний газ із запахом тухлих яєць, порушує обмін речовин та викликає сильні головні болі, нудоту і набряк легень при гострому отруєнні.
Ціанід водню, HCN	20	0,01	2	Дуже сильна отрута, викликає кисневе голодування тканин (гіпоксію), що найперше вражає центральну нервову систему та серце.
Фенол, C ₆ H ₅ OH	11,83	0,003	2	Високотоксична сполука, подразнює слизові оболонки. Вражає нирки, печінку та органи дихання.
Бензол, C ₆ H ₆	123	0,8	2	Тривалий вплив призводить до ураження кісткового мозку, порушення кровотворення (анемія, лейкемія).
Нафталин, C ₁₀ H ₈	373	0,003	4	Летка сполука з характерним запахом, токсична при вдиханні. Викликає руйнування еритроцитів (гемоліз), що призводить до пожовтіння шкіри та пошкодження нирок.

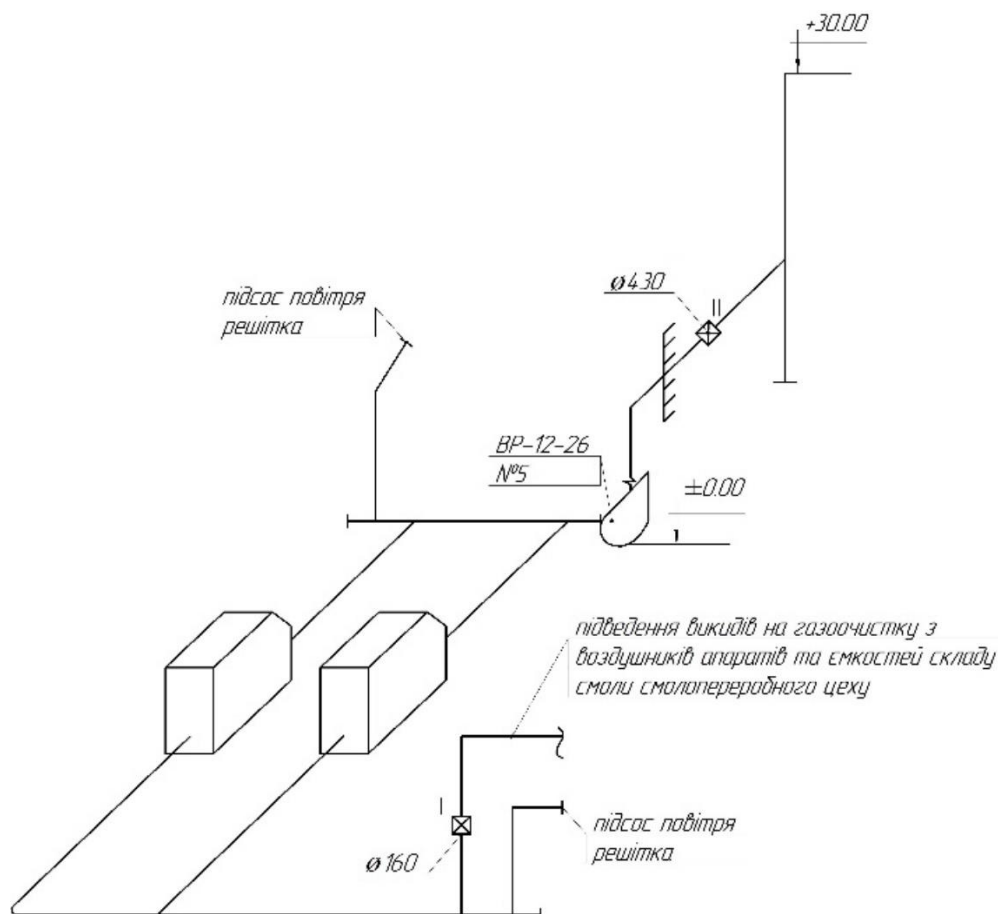


Рис. 2 – Схема утворення та відведення забруднюючих речовин від технологічного обладнання складу смоли смолопереробного цеху

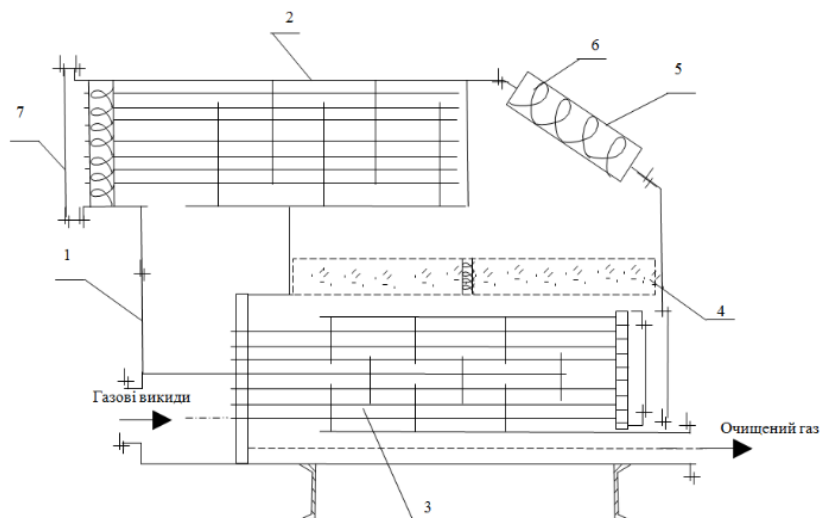


Рис. 3 – Будова термокаталітичного реактора: 1 – корпус; 2 – трубчастий електронагрівач; 3 – труба теплообмінна; 4 – елемент з каталізатором; 5 – корпус електронагрівача, 6 – нагрівальний елемент (ТЕН або спіраль), 7 – кришка

Очищений у термокаталітичному реакторі гарячий газ спрямовують у теплообмінник, у якому його теплом підігрівають забруднений газ, що надходить на очищення. Охолоджений у теплообміннику очищений газ за допомогою димососа через димову трубу викидається в атмосферу.

Альтернативною коштовним каталізаторам у сфері екологічної безпеки стали розроблені марганецьвмісні інтерметаліди на основі заліза та алюмінію. Вибір компонентів обумовлений їхньою здатністю забезпечувати глибоке окиснення токсичних домішок у промислових викидах, поєднуючи це з відмінною термостійкістю та структурною цілісністю контактів. У зв'язку з цим було вирішено розробляти каталізатори на основі інтерметалідів Fe-Al стехіометричного складу FeAl_3 , які синтезовані методом теплового самозаймання [11]. Для збільшення каталітичних властивостей отримані зразки піддавали легуванню перехідними металами в різних концентраціях.

Процедура виготовлення каталітичних систем базувалася на послідовному виконанні операцій з дозування та гомогенізації вихідних компонентів, після чого здійснювалося формування циліндричних пресовок. Використовувалися порошкові фракції з розміром частинок 100-150 мкм, а питоме навантаження при пресуванні варіювалося в межах 30-100 кН. Підготовлену заготовку піддавали контрольованому нагріву в інертній атмосфері всередині матриці для гарячого пресування до моменту ініціювання екзотермічної реакції. Завдяки ефекту теплового самозаймання забезпечувався миттєвий підйом температури по всьому масиву зразка. Завершальний етап включав ізотермічну витримку при 390-460°C протягом 30-60 хвилин із паралельним механічним допресовуванням синтезованого продукту.

Синтезовані сплави піддавали механічному подрібненню з подальшим розсівом для виділення

робочої фракції зернистістю 0,1-0,3 мм. Ключовим етапом формування активної структури була хімічна модифікація поверхні (лужна активація) [12]. Формування скелетного типу каталізатора здійснювали через селективне вилюговування алюмінієвої фази з інтерметаліду за допомогою 20%-го водного розчину гідроксиду натрію або калію. Для безпеки та стабілізації системи надлишковий водень нейтралізували пероксидом водню. Завершальний цикл підготовки включав демінералізовану промивку на фільтрувальних установках до досягнення нейтрального показника середовища та подальшу дегідратацію зразків у термостаті при 120°C.

Ефективність інтерметалідного залізо-алюмінієвого (Fe-Al) каталізатора з добавками перехідних металів (мідь, марганець, кобальт, нікель та інші) у каталітичному очищенні газів залежить від складної взаємодії декількох ключових факторів, пов'язаних як із самим матеріалом, так і з умовами проведення реакції. Головними з них є склад і структура каталізатора, метод його синтезу та параметри процесу.

Ідеальне співвідношення Fe:Al та вибір промотора перехідного металу залежатимуть від конкретного застосування, будь то гідрування, метанування чи очищення газу, оскільки кожен з них вимагає різних властивостей для максимальної ефективності та стабільності.

Як добавку до складу каталізатора розглядали марганець, який відіграє роль промотора – змінює фізико-хімічні властивості каталізатора. Добавка марганцю запобігає спіканню (злипанню) активних частинок каталізатора при робочих температурах, знижує температуру початку реакції окислення, саме тому можна досягти високої ефективності очищення газових викидів при відносно низькій температурі.

Вихідний матеріал зазвичай має вміст алюмінію від 50% до 70% за вагою. Цей діапазон є гарною відповідною точкою для досягнення високопористої

структури після вилугування. Кількість додаткових перехідних металів зазвичай варіюється від 1% до 20% від загальної ваги сплаву, залежно від конкретного металу та бажаної каталітичної властивості (наприклад, підвищеної активності, нижчої робочої температури або покращеної стійкості до отруєнь). Невелика кількість добавки може значно підвищити активність і стабільність, діючи як промотор. Однак надмірна концентрація часто призводить до агломерації (спікання) частинок добавки, блокування активних центрів і зниження загальної ефективності.

Для пошуку оптимальних параметрів каталізатора були проведені експериментальні випробування, де систематично змінюються пропорції кожного компонента з подальшою метою знайти найкращий баланс між активністю, стабільністю та економічною ефективністю для певного застосування.

Таким чином, оптимізованими змінними є: робоча температура очищення газів (T), частка Al у суміші Al/Fe (p) та кількість добавки (f).

Оптимізаційна задача розв'язувалася класичним методом математичного програмування. Функція мети, яка максимізується, E являє собою ефективність очищення газових викидів.

Обмеження визначаються технічними можливостями виробництва та експлуатації каталізаторів.

Для розв'язання поставленої задачі виконуються такі дії:

1. Проводиться ряд експериментів із визначення ефективності очищення газових викидів (e) при різних значеннях оптимізованих змінних.

2. За вибіркою $\{T_i, p_i, f_i, e_i\}^N$ будується функція регресії [13]:

$$E = E(T, p, f). \quad (1)$$

Визначення параметрів регресії проводилося за допомогою відповідної функції Excel. Рівень значущості було обрано 95%.

3. Робиться висновок про статистичну значущість розрахованих параметрів регресії на основі перевірки нульової гіпотези – гіпотези про рівність нулю

відповідного параметра за всією генеральною сукупністю можливих комбінацій розглянутих випадкових величин [14]. Згідно з [15], нульова гіпотеза відхиляється (і, таким чином, параметр регресії вважається статистично значущим) за умови виконання наступної нерівності:

$$0 \notin [\gamma - t_{\alpha, N-m-1} \cdot \sigma_\gamma], \quad (2)$$

де γ – параметр регресії; N – обсяг вибірки; α – прийнятий рівень значущості; m – кількість незалежних змінних моделі (регресорів); $t_{\alpha/2, N-m-1}$ – квантиль розподілу Стюдента порядку $\alpha/2$ при кількості ступенів вільності $N-m-1$; σ_γ – середньоквадратичне відхилення величини γ .

4. Перевіряється адекватність моделі вихідним даним за допомогою критерію Фішера, який полягає у порівнянні розрахункової величини:

$$F_{\text{розрах}} = F_{m, N-m-1} = \frac{(N-m-1) \cdot \sum_{i=1}^N (E_i - e_{\text{ср}})^2}{m \cdot \sum_{i=1}^N (E_i - e_i)^2}, \quad (3)$$

де $e_{\text{ср}}$ – вибіркове середнє величини e , з критичним значенням $F_{\text{крит}}$, що дорівнює квантилі F -розподілу для прийнятого рівня значущості α та кількості ступенів вільності m і $N-m-1$ [16].

Якщо $F_{\text{крит}} < F_{\text{розрах}}$, то отриману регресійну модель можна вважати адекватною вихідним даним із рівнем надійності $P = 1 - \alpha$.

5. За допомогою функції Excel «Пошук розв'язання» визначаються оптимальні значення змінних T , p , f , що забезпечують максимум функції мети (1) при заданих обмеженнях.

Значення варійованих змінних та величина ефективності очищення газових викидів наведені в табл. 1.

Шукана функція регресії визначалася у вигляді такої функції другого порядку [17]:

$$E = a_{00} + a_{11} \cdot T + a_{12} \cdot p + a_{13} \cdot f + a_{31} \cdot p \cdot f + a_{21} \cdot T^2 + a_{22} \cdot p^2 + a_{23} \cdot f^2 \quad (4)$$

Таблиця 1

Значення варійованих змінних та величина ефективності очищення

Температура, T , °C	Частка Al у суміші Al та Fe, p , %	Кількість добавки, f , %	Ефективність очищення, E , %
100	30	5	36,42
100	30	10	36,45
100	30	15	36,28
100	50	5	77,60
100	50	10	78,78
100	50	15	79,65
100	70	5	37,70
100	70	10	42,06
100	70	15	42,57

Продовження табл. 1

Температура, T , °C	Частка Al у суміші Al та Fe, p , %	Кількість добавки, f , %	Ефективність очищення, E , %
300	30	5	55,46
300	30	10	57,22
300	30	15	57,30
300	50	5	97,05
300	50	10	99,05
300	50	15	100,04
300	70	5	57,87
300	70	10	60,29
300	70	15	62,57
400	30	5	51,31
400	30	10	51,51
400	30	15	51,55
400	50	5	90,93
400	50	10	94,34
400	50	15	94,85
400	70	5	52,11
400	70	10	56,27
400	70	15	58,02

Наявність доданка $a_{31} \cdot p \cdot f$ пояснюється можливою взаємозалежністю кількості добавки та частки алюмінію у складі каталізатора. У табл. 2 наведено

результати оцінки параметрів регресії та межі довірчого інтервалу.

Таблиця 2

Розрахунок параметрів регресії

Параметр регресії	Розрахункове значення	Межі довірчого інтервалу		Висновок про статистичну значущість параметра
		нижня	верхня	
a_{00}	-201,548	-205,254	-197,842	значущий
a_{11}	0,301	0,289	0,312	значущий
a_{12}	10,009	9,888	10,130	значущий
a_{13}	0,291	-0,117	0,699	незначущий
a_{31}	0,011	0,008	0,015	значущий
a_{21}	-0,001	-0,001	-0,001	значущий
a_{22}	-0,100	-0,101	-0,099	значущий
a_{23}	-0,028	-0,047	-0,010	значущий

Як видно з таблиці, взаємозв'язок різних факторів у проведеному експерименті виявився незначущим.

Таким чином, функція регресії, що є одночасно цільовою функцією в межах оптимізаційної задачі [13, 18, 19], має такий вигляд:

$$E = -201.548 + 0.301 \cdot T + 10.009 \cdot p + 0.291 \cdot f - 0.001 \cdot T^2 - 0.100 \cdot p^2 - 0.028 \cdot f^2 \quad (5)$$

Адекватність моделі (5) була перевірена за допомогою критерію Фішера. Рівень значущості обрано 0,05. Розрахункова та критична величини дорівнюють відповідно: $F_{розр} = 1004,60$, $F_{крит} = 8,64$. Оскільки $F_{крит} < F_{розр}$, то отриману регресійну модель можна вважати адекватною вихідним даним із рівнем надійності 95%.

Обмеження оптимізаційної задачі зумовлені технологічними причинами (табл. 3).

Таблиця 3

Обмеження оптимізаційної задачі

Температура, T , °C		Частка Al у суміші Al та Fe, p , %		Кількість добавки, f , %	
min	max	min	max	min	max
100	400	30	70	5	15

Розв'язуючи оптимізаційну задачу за допомогою функції Excel «Пошук розв'язання», були отримані такі оптимальні значення параметрів, що забезпечують максимальну ефективність каталізатора: $T = 299,16^{\circ}\text{C}$, $p = 50,51\%$, $f = 10,14\%$. Підставляючи значення оптимальних параметрів у (5), отримуємо математичне очікування максимальної ефективності очищення: $E = 96,18\%$.

Висновки

Функціонування коксохімічних підприємств супроводжується масивною емісією токсикантів у приземний шар атмосфери. Основну загрозу становлять багатокомпонентні асоціації поліциклічних ароматичних вуглеводнів, що генеруються під час термічної переробки вугілля. Дані сполуки характеризуються високою біологічною активністю, проявляючи кумулятивні канцерогенні та генотоксичні ефекти. Тривалий вплив таких аерозолів корелює з ризиками виникнення онкогематологічних захворювань, серйозними порушеннями ембріогенезу та стійкими мутаційними змінами в організмі людини.

Для знешкодження відхідних газів коксохімічного виробництва доцільним є застосування каталітичного методу. Суттєво знизити забруднення атмосферного повітря можна шляхом використання інтерметалідних залізо-алюмінієвих каталізаторів із добавками перехідних металів, що синтезовані методом теплового самозаймання. Каталізатор одержували шляхом вилуговування отриманого інтерметаліду лугом з подальшим видаленням залишкового водню розчином перекису водню. Каталізатори, які отримані з інтерметалідних прекурсорів на основі заліза та алюмінію, виявили досить високу каталітичну активність.

Впровадження розробленого інтерметалідного залізо-алюмінієвого каталізатора з добавкою Mn в системах газоочищення на підприємстві ПрАТ «Запоріжжя-кокс» дозволить модернізувати виробництво за європейськими екологічними стандартами. Високий ступінь знешкодження (понад 96%) при порівняно низькій температурі очищення газів (близько 300°C) дозволяють зробити інтерметалідний каталізатор конкурентоспроможним порівняно з дорогими аналогами на основі благородних металів. Результати проведених досліджень можуть бути використані в період післявоєнного відновлення України з метою забезпечення екологічної безпеки підприємств коксохімічного виробництва.

Перелік використаних джерел

- [1] Белокоп К. В., Тулушев С. О. Аналіз впливу технологій промислових підприємств та автотранспорту на стан екологічної безпеки атмосферного повітря (на прикладі м. Запоріжжя) : монографія. Запоріжжя : ВД «Гельветика», 2020. 230 с.
- [2] Health risk assessment of hazardous VOCs and its associations with exposure duration and protection measures for coking industry workers / L. Cheng et al. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 379. Article 134919. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134919>.
- [3] Assessment of ultralow emission standards and emission abatement potential of China's coking industry via real-time monitoring data / L. Tang et al. *Energy*. 2026. Vol. 344. Article 139818. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139818>.
- [4] Greenhouse Gas Emissions by the Chinese Coking Industry / X. Ge et al. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016. Vol. 25(2). Pp. 593–598. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/61065>.
- [5] Ecological aspects of the neutralization of gas emissions leaving from the resin storehouse of Joint-stock company «Zaporozhkoks» / V. Rumiantsev et al. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 4. Pp. 105–109.
- [6] Energy, safety, and absorption efficiency evaluation of a pilot-scale H₂S abatement process using MDEA solution in a coke-oven gas / J. Park et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. Article 105037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105037>.
- [7] Removal of hydrogen sulfide from coke oven gas by catalytic oxidative absorption in a rotating packed bed / H. Zou et al. *Fuel*. 2017. Vol. 204. P. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.017>.
- [8] Тишук В. Ю. Вплив коксохімічних процесів на забруднення повітря робочих зон і розробка засобів його очищення і покращення умов праці. *Збірник наукових праць НГУ*. 2017. № 51. С. 226–233.
- [9] Черненко Я. М., Волошин М. Д., Ларичева Л. П. Каталізатори та сорбенти : навч. посібник. Кам'янське : ДДТУ, 2017. 317 с.
- [10] Constructing active copper species in Cu-zeolites for coal-gas-SCR and elucidating the synergistic catalytic function of CuO and Cu²⁺ ion species / J. Cheng et al. *Environmental Science: Nano*. 2022. Vol. 9. Pp. 2372–2387. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2en00269h>.
- [11] Жаромічний інтерметалідний сплав : пат. 107101 Україна : МПК C22C 1/05 (2006.01), C22C 19/03 (2006.01). № у 2015 10428 ; заявл. 26.10.2015 ; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.
- [12] Белокоп К. В. Розробка інтерметалідних каталізаторів для знешкодження вуглецевмісних компонентів газових викидів в атмосферу : монографія. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2019. 174 с.
- [13] Малайчук В., Клименко С., Астахов Д. Комп'ютерна обробка вимірювань в задачах спостереження за станом технічних об'єктів. *Вісник Дніпровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка*. 2023. Вип. 30(4). С. 99–106. DOI: <https://doi.org/10.15421/452213>.
- [14] Федоренко О. Д., Клим В. Ю., Клименко С. В. Непараметрична статистика випадкових величин з

невідомими функціями розподілу ймовірності. *Системні технології*. 2025. Вип. 5(160). С. 101–111. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-11>.

- [15] Турчин В. М. Теорія ймовірностей і математична статистика : підручник. Дніпропетровськ : ІМА-прес, 2014. 556 с.
- [16] Fisher's Linear Discriminant. URL: https://dafriedman97.github.io/mlbook/content/c3/s1/fisher_discriminant.html (дата звернення: 05.11.2025).
- [17] Godliuk V. Mathematical Models for Management Information Systems on Digital Platforms: from

Resource Management to Demand Forecasting. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2025. Vol. 2. Рр. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.25.2.3>.

- [18] Димченко А. В., Панфілов О. Г., Клименко С. В. Система оптичної обробки даних. *Вісник Дніпровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка*. 2024. Вип. 33(4). С. 98–107. DOI: <https://doi.org/10.15421/452431>.
- [19] Buktynov V. Computational Optimization: Success in Practice. Chapman and Hall/CRC, New York, 2023. 414 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003275169>.

IMPROVING THE ENVIRONMENTAL SAFETY LEVEL OF COKE-CHEMICAL ENTERPRISES THROUGH CATALYTIC EMISSION NEUTRALIZATION ON INTERMETALLIC FE-AL CATALYSTS

Belokon K.V.	PhD (Engineering), associate professor, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2000-4052 , e-mail: ky.belokon@gmail.com ;
Malovanyy M.S.	D.Sc. (Engineering), professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3868-1070 , e-mail: myroslav.mal@gmail.com ;
Proskurnin O.A.	D.Sc. (Engineering), senior researcher, Research Institution «Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems», Kharkiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9774-9306 , e-mail: proskurnin_o@ukr.net

Protection of the air basin from emissions produced by coke-chemical plants is a critical issue, as these emissions contain toxic hydrocarbons such as phenol, benzene, naphthalene, and others. To neutralize the waste gases of coke-chemical production, the application of the catalytic method is most appropriate. Atmospheric air pollution can be significantly reduced by using intermetallic iron-aluminum catalysts with transition metal additives. This article determines the optimal composition and operational parameters of the catalyst that ensure maximum efficiency: the fraction of Al in the Al/Fe mixture, the amount of the Mn alloying additive, and the operating temperature. To this end, a regression dependence of gas cleaning efficiency on the specified parameters was constructed based on experimental data. By solving the optimization problem, the following optimal values for the operating temperature, the Al fraction in the Al/Fe mixture, and the amount of manganese additive were obtained: $T = 299.16^{\circ}\text{C}$, $p = 50.51\%$, and $f = 10.14\%$, respectively. Under these conditions, the mathematical expectation of gas cleaning efficiency is 96.18%. The implementation of intermetallic catalysts at the Private Joint-Stock Company «Zaporizhkoks» plant will allow for the modernization of production in accordance with European environmental standards. The high degree of purification (over 96%) at a relatively low cleaning temperature (approximately 300°C) makes the intermetallic catalyst competitive compared to expensive analogs based on noble metals. The research results can be utilized during the post-war recovery of Ukraine to ensure the ecological safety of coke-chemical production enterprises.

Keywords: air pollution; organic substances; coke-chemical production; hydrocarbons; intermetallic catalyst; transition metals; purification efficiency; optimization; operating temperature.

References

- [1] K. V. Belokon, and Ye. O. Tulushev, *Analiz vplyvu tekhnolohii promyslovykh pidpriemstv ta avtotransportu na stan ekolohichnoi bezpeky atmosferneho povitria (na prykladi m. Zaporizhzhia): monohrafiia* [Analysis of the impact of industrial enterprise technologies and motor transport on the state of environmental safety of atmospheric air (on the example of Zaporizhzhia): a monograph]. Zaporizhzhia, Ukraine: VD «Helvetyka», 2020. (Ukr.)
- [2] L. Cheng et al., “Health risk assessment of hazardous VOCs and its associations with exposure duration and protection measures for coking industry workers,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 379, article 134919, 2022. doi: [10.1016/j.jclepro.2022.134919](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134919).
- [3] L. Tang et al., “Assessment of ultralow emission standards and emission abatement potential of China's coking industry via real-time monitoring data,” *Energy*, vol. 344, article 139818, 2026. doi: [10.1016/j.energy.2025.139818](https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139818).

- [4] X. Ge, L. Chang, J. Yuan, J. Ma, X. Su, and H. Ji, "Greenhouse Gas Emissions by the Chinese Coking Industry," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 25, no. 2, pp. 593–598, 2016. doi: [10.15244/pjoes/61065](https://doi.org/10.15244/pjoes/61065).
- [5] V. Rumiantsev, N. Yakubin, K. Belokon, E. Matukhno, and C. Leventsova, "Ecological aspects of the neutralization of gas emissions leaving from the resin storehouse of Joint-stock company «Zaporozhkoks»,» *Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 105–109, 2015.
- [6] J. Park, S. Lee, J. Kim, W. Um, I. Lee, and C. Yoo, "Energy, safety, and absorption efficiency evaluation of a pilot-scale H₂S abatement process using MDEA solution in a coke-oven gas," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, article 105037, 2021. doi: [10.1016/j.jece.2021.105037](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105037).
- [7] H. Zou et al., "Removal of hydrogen sulfide from coke oven gas by catalytic oxidative absorption in a rotating packed bed," *Fuel*, vol. 204, pp. 47–53, 2017. doi: [10.1016/j.fuel.2017.05.017](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.017).
- [8] V. Yu. Tyshchuk, "Vplyv koksohimichnykh protsesiv na zabrudnennia povitria robochykh zon i rozrobka zasobiv yoho ochyshchennia i pokrashchennia umov pratsi" ["Influence of coke-chemical processes on air pollution in working areas and development of means for its purification and improvement of working conditions"], *Zbirnyk naukovykh prats NHU – Collection of Scientific Papers of the NGU*, no. 51, pp. 226–233, 2017. (Ukr.)
- [9] Ya. M. Chernenko, M. D. Voloshyn, and L. P. Larycheva, *Katalizatory ta sorbenty: navch. posibnyk* [Catalysts and sorbents: a study guide]. Kamianske, Ukraine: DDTU, 2017. (Ukr.)
- [10] J. Cheng et al., "Constructing active copper species in Cu-zeolites for coal-gas-SCR and elucidating the synergistic catalytic function of CuO and Cu²⁺ ion species," *Environmental Science: Nano*, vol. 9, pp. 2372–2387, 2022. doi: [10.1039/d2en00269h](https://doi.org/10.1039/d2en00269h).
- [11] Yu. O. Belokon and K. V. Belokon, "Zharomitsnyi intermetalidnyi splav" ["Heat-resistant intermetallic alloy"], UA Patent 107101 Appl. u201510428, May 25, 2016. (Ukr.)
- [12] K. V. Belokon, *Rozrobka intermetalidnykh katalizatoriv dlia zneshkodzhennia vuhletsevmisnykh komponentiv hazovykh vykydiv v atmosferu: monohrafiia* [Development of intermetallic catalysts for the neutralization of carbon-containing components of gas emissions into the atmosphere: a monograph]. Kherison, Ukraine: Helvetyka, 2019. (Ukr.)
- [13] V. Malaichuk, S. Klymenko, and D. Astakhov, "Kompiuterna obrobka vymyruvan v zadachakh sposterezhenia za stanom tekhnichnykh ob'ektiv" ["Computer processing of measurements in problems of observation of the condition of technical objects"], *Visnyk Dniprovskoho universytetu. Seriya: Raketno-kosmichna tekhnika – Journal of Rocket-Space Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 99–106, 2023. doi: [10.15421/452213](https://doi.org/10.15421/452213). (Ukr.)
- [14] O. D. Fedorenko, V. Yu. Klym, and S. V. Klymenko, «Neparametrychna statystyka vypadkovykh velychyn z nevidomymy funktsiiami rozpodilu imovirnosti» [«Non-parametric statistics of random variables with unknown probability distribution functions»], *Systemni tekhnologii – System technologies*, vol. 5, no. 160, pp. 101–111, 2025. doi: [10.34185/1562-9945-5-160-2025-11](https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-11). (Ukr.)
- [15] V. M. Turchyn, *Teoriia imovirnostei i matematychna statystyka* [Probability theory and mathematical statistics]. Dnipropetrovsk, Ukraine: IMA-press, 2014.
- [16] D. Friedman, *Fisher's Linear Discriminant, Machine Learning from Scratch*. [Online]. Available: https://dafriedman97.github.io/mlbook/content/c3/s1/fisher_discriminant.html. Accessed on: Mar. 5, 2026.
- [17] V. Godliuk, "Mathematical Models for Management Information Systems on Digital Platforms: from Resource Management to Demand Forecasting," *Cybernetics and Computer Technologies*, vol. 2, pp. 37–46, 2025. doi: [10.34229/2707-451X.25.2.3](https://doi.org/10.34229/2707-451X.25.2.3).
- [18] A. V. Dymchenko, O. H. Panfilov, and S. V. Klymenko, "Systema optychnoi obrobky danykh" ["Optical data processing system"], *Visnyk Dniprovskoho universytetu. Seriya: Raketno-kosmichna tekhnika – Journal of Rocket-Space Technology*, vol. 33, no. 4, pp. 98–107, 2024. doi: [10.15421/452431](https://doi.org/10.15421/452431). (Ukr.)
- [19] V. Bukshtynov, *Computational Optimization Success in Practice*, 1st Ed., Chapman and Hall/CRC, New York, 2023. doi: [10.1201/9781003275169](https://doi.org/10.1201/9781003275169).

Стаття надійшла 30.12.2026

Стаття прийнята 28.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Белоконов К. В., Мальований М. С., Проскурнін О. А. Підвищення рівня екологічної безпеки коксохімічних підприємств шляхом каталітичного знешкодження викидів на інтерметалідних Fe-Al каталізаторах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 100–109. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359939>.

УМОВИ ПОДОЛАННЯ ПРИНЦИПУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ДВОЄДИНОСТІ, ЯК
МЕХАНІЗМУ СТВОРЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ

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: vsvlshn52@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

На підставі попередніх досліджень в галузі мінімізації промислових відходів, а саме, знань про механізми існування принципу термодинамічної двоєдності в технологічному процесі, як основи створення відходів, показано, що така мінімізація в середині самого технологічного процесу спирається на два показники – відношення компонентів сировини до термодинамічної нерівноважності стосовно використаного джерела енергії, а також від спроможності енергії певної якості та кількості впливати на всі компоненти сировинної бази технологічного процесу. Розроблено методику дослідження стану технологічного процесу від основних його показників, що впливають на процеси відходоутворення. Враховуючи, що особливості будь-якого технологічного процесу мають бути неспівставними відносно основних показників поза межами нормального розподілу, запропоновано оцінювати їх за допомогою непараметричного U-критерія Манна-Уїтні, у вигляді єдиної вибірки для порівнюваних залежностей. Дослідженню, за загальною методою, підлягало майже 200 сучасних технологічних процесів та їх модифікацій, що надало можливостей аналізувати певний узагальнений технологічний процес відносно його відходоутворювальних можливостей. В якості критерія для аналізу спроможності технологічного процесу створювати умови для цілеспрямованої переробки сировинної бази технологічного процесу прийнятий умовний термодинамічний показник, що відображає відношення сумарної роботи відносно переробки всіх компонентів сировини в товарну продукцію до базового значення енергії, що використовується в цьому технологічному процесі. Розрахунково-експериментальні дані показали, що для створення можливостей для подолання принципу термодинамічної двоєдності потрібні умови для додаткового джерела енергії певної якості в кількості не менш 62% від базової енергії. При цьому різке перевищення цієї межі веде до відходу від області термодинамічної нерівноважності, незапланованих спонтанних процесів парної, а потім і множинної парної біфуркації та подальшого термодинамічного хаосу відносно цілеспрямованої переробки не тільки самого потенційного відходу, а й планової товарної продукції. Показані певні обмеження для можливостей виробничої системи щодо її переведення повністю у стан термодинамічної нерівноважності в межах заявленого показника від 0,7 до 4,06. Поза межами цих значень виробнича система не спроможна до будь-якої мінімізації відходів в самому технологічному процесі.

Ключові слова: промислові відходи, структура сировини, термодинамічні обмеження, ентропія, біфуркація, хаос.

Постановка проблеми

Одним з сучасних методів мінімізації відходів поступово стає керований процес впливу на сировинну базу технологічного процесу з метою зменшення кількості відходів в межах самого технологічного процесу. Такі методи стикаються з проблемами приведення всієї сировинної бази до стану термодинамічної нерівноважності відносно енергії, що впливає на них. Як правило, додаткові джерела енергії в будь-якому технологічному процесі здібні вивести цей процес з стійкого стану, що завадить виконанню основного завдання цієї системи – отримання товарної продукції. Потрібні знання про параметричні межі існування такого втручання в виробничу систему.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У дослідженнях накопичено достатній досвід, що ілюструє принцип термодинамічної двоєдності як основи механізмів утворення відходів у технологічних процесах [1-3]. Показано, що мінімізація відходів у самому джерелі їх виникнення – технологічному процесі

– залежить, перш за все, від стану термодинамічної нерівноважності компонентів сировини по відношенню до джерела енергії, що використовується в технологічному процесі. При певних умовах щодо використання зовнішньої енергії, виробнича система здатна переходити не тільки з рівноважного стану в нерівноважний, але і випробує стан невизначеності і навіть хаосу щодо мінливих енергетичних умов технологічного процесу [4]. Механізм переходу виробничої системи з додатковими джерелами енергії, спрямованими на мінімізацію відходів всередині самої системи, зі стану парної біфуркації і відповідного їй стану термодинамічної нерівноважності в стан біфуркаційної парної множинності і далі до хаосу, стає тим самим теоретичним обмеженням технологічного процесу, що перешкоджає подоланню принципу термодинамічної подвійності.

Мета статті

На підставі системних досліджень термодинамічних характеристик технологічних процесів запропонувати параметричні обмеження, що лімітують

реалізацію принципу термодинамічної двоєдності та надають виробничим системам максимально унеможливити появу промислових відходів в межах самого технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу

Для обґрунтування таких висновків у статті наведено результати розрахунково-експериментальних даних, отриманих під час вивчення репрезентативної вибірки існуючих технологічних процесів.

Методика дослідження.

Запишемо рівняння Л. Онсагера для обчислення зміни ентропії в слабонерівноважних системах для наших цілей у такому вигляді: $\Delta S/E_0 = r\lambda(1 - \lambda)$, де: $\lambda = \frac{X_p}{X_p + X_w}$ – певний феноменологічний коефіцієнт, що визначає співвідношення термодинамічних сил, що беруть участь у виробництві товарної продукції X_p і в появленні відхода X_w [2]; $r = (J_0 X_0 + J_w X_w)/E_0$ – термодинамічний показник, що відображає співвідношення сумарної роботи по перетворенню всієї сировини $(J_0 + J_w)$ в товарну продукцію до базового значення енергії E_0 .

Методика досліджень включала виявлення значень коефіцієнтів r у послідовності технологій, що визначаються величиною ΔS_{max} на феноменологічних кривих Л. Онсагера. Ці точки зазначені в координатах « $\Delta S/E_0 - \lambda$ » для технологічних процесів, що підлягали аналізу, у галузях гірничодобувної, металургійної, машинобудівної, енергетичної промисловості та інших виробництвах. Усього досліджено 90 технологічних процесів та 103 їх модифікації, включаючи експериментальні технології. Вихідними даними для кожного з розглянутих технологічних процесів є статистична звітність про:

- величину зовнішньої енергії E_0 , що надходить у конкретний 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;

- величину додаткової зовнішньої енергії $E_w \leq 0,62E_0$ обраної якості, яка може дозволити вивести матеріальний потік E_0 зі стану, близького до термодинамічної рівноваги, до нерівноважного стану;

- значення термодинамічного параметра $0 < r \leq 4,6$ залежно від розрахункових значень зміни ентропії на кожному n -му етапі ітерації.

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 максимально можливої корисної продукції;

- 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;

- зміна наведеної ентропії системи $\Delta S/E_0$ залежно від феноменологічного коефіцієнта $\lambda = \frac{X_w}{X_0 + X_w}$ з подальшим виявленням параметра r на кожному наступному n -му етапі ітерації.

Статистична обробка результатів дослідження виконана за допомогою *програмного пакету Statistica 6.0. (StatSoft, Inc., США)*. Достовірність розрізняваності однойменних показників в незалежних вибірках показників в умовах відсутності нормального розподілу оцінювалась за допомогою непараметричного *U-критерію Манна-Уїтні* [5], у вигляді єдиної вибірки для порівнюваних залежностей $U_1 = R_1 - 0,5n_1(1 + n_1) \leftrightarrow U_2 = R_2 - 0,5n_2(1 + n_2)$, таким чином, що тільки $U_{1,2} = \min$ показує на їх непорівнянність. Тут: $R_{1,2}$ – сума рангів для відповідної виборки; $n_{1,2}$ – розмір кожної з вибірок.

Підсумки дослідження залежності типу $\frac{\Delta S}{E_0} = f(r)$

для різних технологій представлені на рис. 1 у вигляді окремих точок початкових значень зміни ентропії (у вигляді відповідних *U-критерію Манна-Уїтні* і середньоквадратичної похибки $\pm \sigma_{\Delta S}$ її математичного очікування $M_{\Delta S}$). З урахуванням похибок, отриманих при обробці експериментальних даних (в залежності від потужності, типу технічної системи, її продуктивності, якості сировини і кількості кінцевих відходів виробництва), цифри на графіку в області подвоєння результатів можуть бути приблизно порівнянні з закономірностями, викладеними в роботі [6].

Значення показника r у послідовності технологій опосередковано визначаються розміром ΔS_{max} при $\lambda \approx 0,5$ на феноменологічних кривих Л. Онсагера. Ці точки відзначені в координатах «зміна ентропії – ваговий коефіцієнт λ » для досліджуваних технологічних процесів та їх модифікацій, наприклад, як показано в [2]. У переважній більшості технологій присутня базова або модифікована *теплова* енергія (69%), з дуже малою тепловою ефективністю і високою ентропією процесу. У 14% досліджуваних технологічних процесів використовується *електрична* енергія, але тільки 5% з них це чисто електричні та електролітичні процеси, а решта – їх електротермічні модифікації, ККД яких також вкрай низький при високих значеннях ентропії. Трохи більше 15% від загальної вибірки технологічних процесів пов'язані з використанням інших типів енергії (механічної, пневматичної та гідравлічної та ін.).

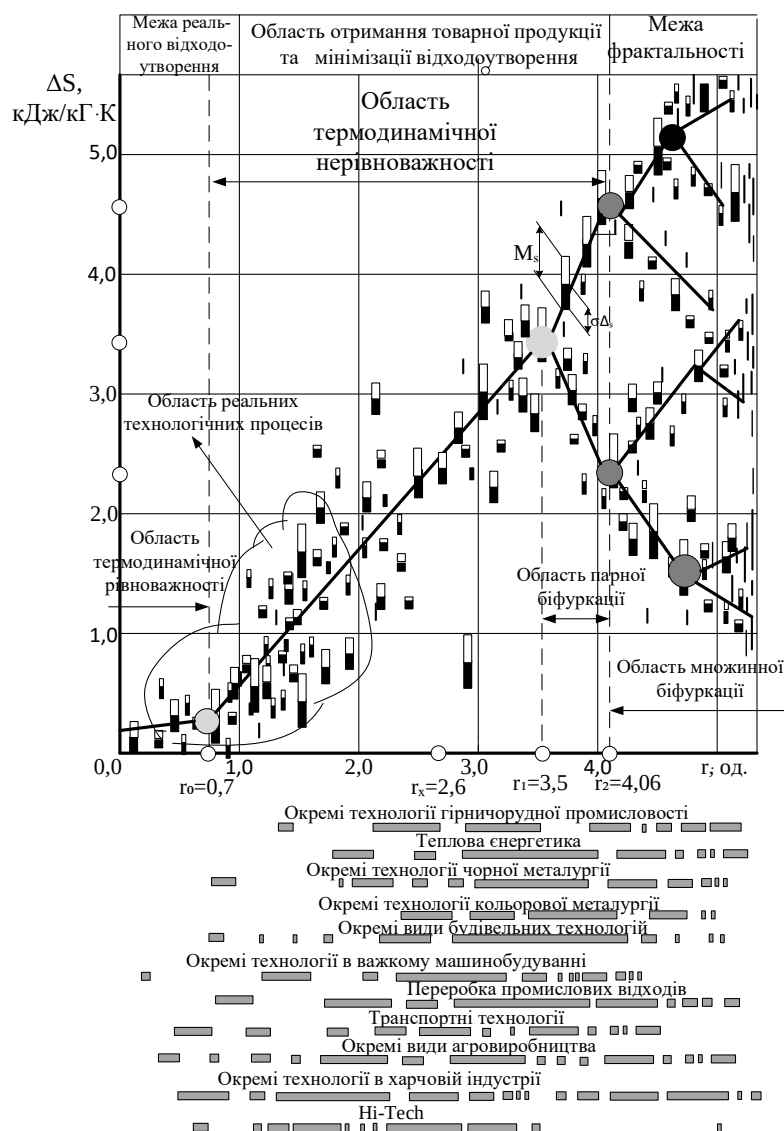


Рис. 1 – Розрахункові дані для оцінки межі термодинамічної нерівноважності та хаосу для різних технологічних процесів (окремо виділена область для реальних технологічних процесів та область гіпотетичних розрахункових даних)

Для мети цієї роботи важливими є інтервали, в яких відображається відношення параметрів системи до стану термодинамічної рівноваги. Вони досить чітко відрізняють чотири акцентні області (див. рис. 1).

1. Умова, коли $0 \leq r < 0,7$, відображає область термодинамічної рівноваги для всієї виробничої системи. Усі траєкторії системи прагнуть нуля. Як правило, тут виконується умова $J_w X_w = 0$ або $A_w = 0$, коли технологічний процес взагалі пов'язаний з цілеспрямованим утворенням потенційних відходів (w). Або коли нерівнозначні термодинамічні сили, що спрямовані на виробництво товарної продукції (p) та відходу (w), розділені і перебувають у стані термодинамічної двоєдиності [2].

2. Умова перетину системи з рівноважного стану до стану слабкої термодинамічної нерівноважності

відноситься до області з $r \geq 0,7$ (див. рис. 1). У такому стані система прагне фіксованої точки значення ΔS і знаходить здатність до реалізації принципу термодинамічної двоєдиності по відношенню до різних частин J_0 і J_w матеріального потоку (сировини). При цьому лише умови $J_0 X_0 \geq 0$ явно замало для цілеспрямованого перетворення другої частини матеріальних потоків J_w , які довільним чином переходять у відходи. Виникає необхідність у деякому $X_w \neq 0$, що, в свою чергу, накладає обмеження на об'єми сумарної зовнішньої енергії.

3. Цікава умова $r \leq 3,5$, при якій розрахункові $J_w X_w \sim 0,62 E_0$. Вона співвідноситься з тією часткою додаткової зовнішньої енергії, якої буде достатньо, щоб термодинамічні сили X_w , що реалізуються в сильно нерівноважній системі, були здатні до перетворення матеріального потоку J_w у напрямку його суттєво інших

якостей, наприклад, споживчої цінності. Підкреслимо гіпотетичний характер цієї залежності.

4. В той же час, при первинній недостатності додаткової зовнішньої енергії, за умовою $J_w \cdot X_w < 0,62E_0$ відбувається перехід системи до періодичної поведінки щодо параметра r . Зокрема, при дотриманні умови термодинамічної нерівноважності в системі, наприклад, при $r > 3,5$ коли існують розрахункові $J_w X_w \leq 0,56E_0$, вона може стати об'єктом парної біфуркації, тобто невизначеності, а при $r \approx 4,06$ – виявляти ознаки вже множинності парних біфуркацій, тобто сильної невизначеності, яка ставить під сумнів можливість енергетичного впливу на J_w .

5. Далі, за умови розрахункових $r \geq 4,06$ та відповідних вже $J_w X_w \leq 0,39E_0$, тобто за подальшої недостатності енергії, що вводиться (оцінково менше 39% від початкової, необхідної для забезпечення основного технологічного процесу), система переходить у стан повного хаосу, з відсутністю чутливості до початкових умов щодо можливостей не тільки для переробки потенційних відходів (w), але і для реалізації основної мети системи – продукції (p). Тут біфуркаційне множення періодів робить виробничу систему з додатковою, але недостатньою, зовнішньою енергією E_w енергетично некерованою в найближчому діапазоні зміни термодинамічного параметра r .

З викладеного слідує висновок у тому, що умовою мінімізації відходів усередині джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є *достатність* та одночасна *не перебільшеність* додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості, для того, щоб вивести ту частину сировини, якої зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан слабкої нерівноважності.

Порівняємо ці дослідження з прикладними результатами для існуючих технологій в області однієї з найбільш забруднюючих галузей – металургії. Наукою і практикою накопичено достатній досвід в технологіях виробництва сталі, одного з найбільш технологічних матеріалів сучасності. Загальне щорічне виробництво сталі у світі становить 1,888 млрд тонн. А загальна кількість сталі, що міститься в самих різних предметах, створених людиною і в самих різних галузях і спорудах, досягає 35 млрд тонн переробленого металу, в тому числі і сталі, що знаходиться на стадії переробки (брухту) [7, 8]. Всього за всю історію сталеплавильного виробництва було створено кілька десятків технологічних процесів, деякі, що знайшли практичне застосування, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Загальна характеристика основних технологічних процесів отримання сталі та її відходів, зведених до одиниці товарної продукції

№№ п/п	Найменування технології	Короткий опис технологічного процесу та його відходи	Кількість відходів, т/т
Технології прямого напрямку			
I	Томасівський процес	Він полягає в продуванні розплавленого чавуну повітрям через дно конвертера, який видаляє домішки, такі як фосфор. Метод був економічним і підходив для переробки залізної руди з високим вмістом фосфору. Відходи: шлак, пил, металобрухт	0,3–0,5
II	Бессемерівський процес	Передбачає продування збагаченого повітря через розплавлений чавун в конвертері. Процес дуже швидкий, але чутливий до складу металу, що подається, зокрема вмісту фосфору та сірки. Відходи: шлак, пил	0,15–0,3
III	Мартенівський процес	Заснований на нагріванні рідкого чавуну і металобрухту у великому агрегаті регенеративної мартенівської печі. Перевагами методу є можливість використання різних видів сировини і ретельний контроль хімічного складу сталі. Відходи: шлак, пила, металобрухт, шлам	0,2–0,4
IV	Киснево-конвертерний процес	Заснований на продуванні рідкого заліза чистим киснем, що забезпечує більш швидке і ефективне видалення домішок. Технологія є однією з найпоширеніших у сучасному сталеплавильному виробництві завдяки своїй енергоефективності. Відходи: шлак, пила, окалина	0,1–0,2
V	Технологія прямого відновлення заліза	Відновлення залізної руди до стану залізного напівфабрикату в твердому стані з використанням природного газу або вугілля при температурі 800–1200°C. Залізо може використовуватися в електропечах для виробництва сталі. Відходи: металічна окалина, пил, залишки вуглецевих матеріалів.	0,05–0,15
VI	Електросталеплавильний процес	Використовується електрична енергія для розплаву металічного брухту та залізрудних матеріалів. Метод надає високу якість сталі та широко використовується для спеціальних сталей. Відходи: шлак, пил, відпрацьована цегла, металічний брухт	0,1–0,25

Кожен з цих технологічних процесів пов'язаний з джерелами енергії різної потужності і якості, кожен має свій певний асортимент відходів. І одно з головних завдань, яке в них вирішується, полягає в отриманні максимальної кількості якісної товарної продукції. А ми затребуємо водночас ще й максимально мінімізувати відходи в самому технологічному процесі. Це вимагає, як мінімум, динаміка втрат від утворення відходів за кожною технологією в міру її енергетичного насичення і коливання специфіки сировини. Причому кількість відходів, що виносяться на одиницю одержуваного товарного продукту, в залежності від кількості і якості базової зовнішньої енергії E_0 , специфіки самого технологічного процесу (умов фізико-хімічних реакцій), дає умовну лінію зміни наведеної ентропії $\Delta S/E_0$ в залежності від заданих значень термодинамічних коефіцієнтів r і λ і поведінки самої системи (рис. 2).

Два показника, що впливають на мінімізацію відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі, це термодинамічна нерівноважність, як залежність від запропонованого термодинамічного показника r , і енергетична насиченість технологічного процесу, що забезпечує переробку не тільки основного потоку сировини J_0 в корисні продукти, але і тієї частини сировини J_w , яка в звичайній системі відправляється у відходи. Для цього на графіках (див. рис. 2) показана крива зміни ентропії, що приведена до базової енергії системи E_0 . Її аналіз дає уявлення про існування (чи ні) суттєвого резерву для мінімізації відходів у таких технологічних процесах, наближаючи їх до теоретично

обґрунтованого рівня. Наприклад, додаткова енергія E_w для високовідходного мартенівського процесу (точка «а») здібна змінювати параметр r_a більш, ніж втричі: $r_a = 1,8 \div 5,5$, у порівнянні з класичною технологією, виводячи його умовну сумісну роботу $(J_0 X_0 + J_w X_w)$ за межі спроможності самого технологічного процесу ($E_0 + E_w \gg 1,62$ від базової енергії), чим здатна привести систему в явно нестійкий і, навіть, хаотичний стан, в якому немає бути специфічної термодинамічної нерівноважності. І, в той же час, технології прямого відновлення заліза і електродугового переплаву (див. точки «b» і «c» відповідно) дають діапазон зміни параметру в декілька процентів: $r_b = 2,1 \div 2,5$ і $r_c = 1,95 \div 2,23$, тобто показують на досяжність стійкості системи і стану термодинамічної нерівноважності в таких технологіях, коли на них подається додаткова енергія іншої якості з розрахунку $E_0 + E_w \sim 1,62$ від базової енергії. У другому та третьому випадках системи не переходять в стан множинних біфуркацій і подальшого хаосу, який перешкоджає якісному впливу на потенційну відходоутворюючу сировину (див. рис. 2).

Такий аналіз може бути виконаний і для інших технологічних процесів шляхом вказівки конкретних енергетичних параметрів з подальшим розрахунком відновленої ентропії і визначенням термодинамічного коефіцієнта. Отримані результати можуть бути використані при прогнозуванні розвитку сучасних технологій, а також в якості подальших досліджень.

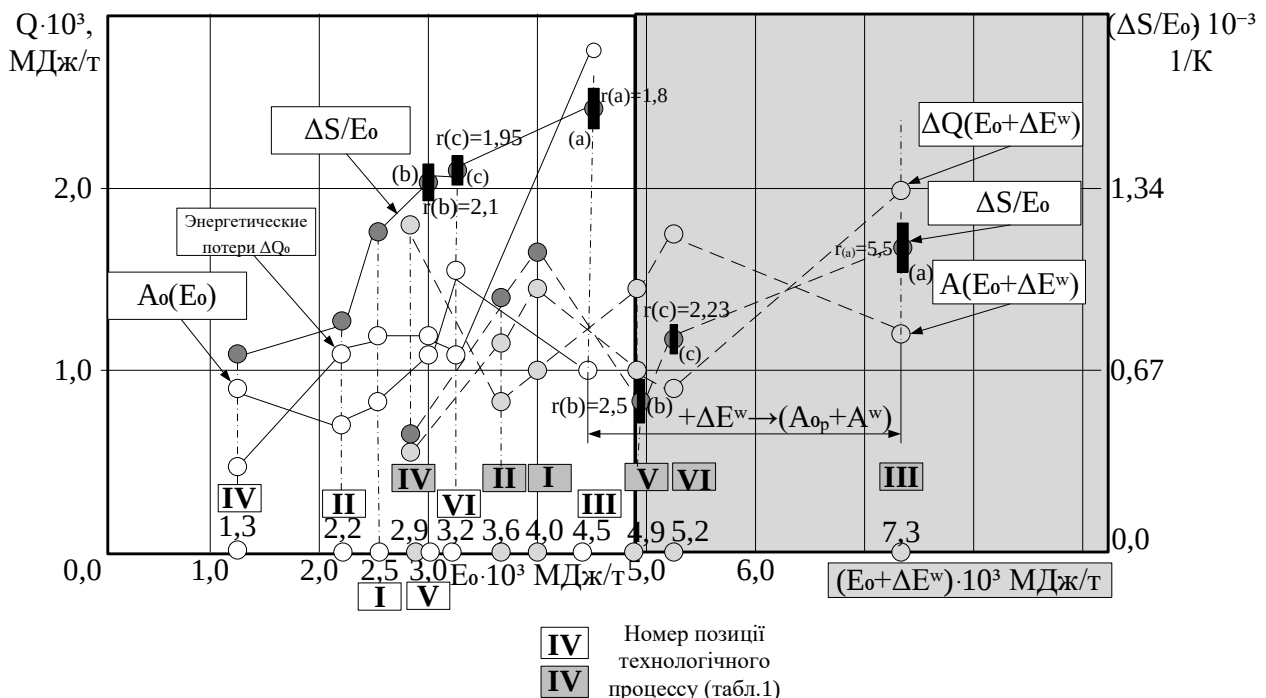


Рис. 2 – Енергоентропійні залежності для визначення області термодинамічної нерівноважності як показника досяжності теоретичного мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва сталі

Висновки

1. Умовою мінімізації відходів в межах джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є достатність додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості.

2. Для того, щоб вивести частину сировини, з якої зазвичай отримують відходи зі стану термодинамічної рівноважності, і перевести її в стан слабкої нерівноважності, необхідно ввести в систему додаткову енергію в розрахунковому обсязі не менше 62% від енергії, що використовується в технологічному процесі.

3. Вхідження термодинамічної системи в зону парної біфуркації за параметрами феноменологічного рівняння не зменшує можливостей для технологічного процесу щодо досягнення розрахункового теоретичного мінімуму утворення відходів.

4. Механізм переходу виробничої системи з додатковими джерелами енергії зі стану парної біфуркації і відповідного стану термодинамічної нерівноважності в стан парної біфуркаційної множинності, а далі і до хаосу, є тим розрахунковим обмеженням для технологічного процесу, що лімітує досягнення заявленого теоретичного мінімуму утворення відходів.

Перелік використаних джерел

[1] Волошин В. С. Відходи та їх природа. К. : СПД Самченко, 2024. 630 с.

- [2] Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. К. : СПД Самченко, 2024. 80 с.
- [3] Волошин В. С. Щодо питання про методологію мінімізації відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі. *Екологічні науки*. 2024. № 2(53). С. 114-122. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.17>.
- [4] Волошин В. С. Чи варто шукати «золоті пропорції» Фібоначчі в процесах утворення відходів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. Вип. 44. С. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.32782/2225-6733.44.2022.6>.
- [5] Mann H. B., Whitney D. R. On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger Than the Other. *Annals of Mathematical Statistics*. 1947. № 18(1). Pp. 50-60. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>.
- [6] May R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*. 1976. Vol. 261(5560). Pp. 459-467. DOI: <https://doi.org/10.1038/261459a0>.
- [7] World Steel in Figures 2023. Brussels : World Steel Association, 2023. 36 p.
- [8] The Global Steel Industry in Figures. OECD Publishing. Paris, 2022. 72 p.

CONDITIONS FOR OVERCOMING THE PRINCIPLE OF THERMODYNAMIC DUALITY AS A MECHANISM FOR CREATING INDUSTRIAL WASTE

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

On the basis of previous studies in the field of industrial waste minimization, namely, knowledge about the mechanisms of the existence of the principle of thermodynamic duality in the technological process as the basis for waste creation, it is shown that such minimization in the middle of the technological process itself is based on two indicators – the ratio of raw material components to the thermodynamic imbalance in relation to the energy source used, as well as on the ability of energy of a certain quality and quantity to affect all components of the raw material base of the technological process. A methodology for studying the state of the technological process from its main indicators affecting the processes of waste generation has been developed. Taking into account that the features of any technological process should be incomparable with respect to the main indicators outside the normal distribution, it is proposed to evaluate them using the nonparametric Mann-Whitney U-test, in the form of a single sample for the compared dependencies. According to the general method, almost 200 modern technological processes and their modifications were subject to research, which made it possible to analyze a certain generalized technological process relative to its waste-generating capabilities. As a criterion for analyzing the ability of the technological process to create conditions for purposeful processing of the raw material base of the technological process, a conditional thermodynamic indicator is adopted, reflecting the ratio of the total work regarding the processing of all components of raw materials into marketable products to the basic value of energy used in this technological process. Computational and experimental data have shown that in order to create opportunities to overcome the principle of thermodynamic duality, conditions are needed for an additional energy source of a certain quality in the amount of at least 62% of the base energy. At the same time, a sharp excess of this limit leads to a departure from the area of thermodynamic disequilibrium, unplanned spontaneous processes of paired and then multiple pairwise bifurcation and subsequent thermodynamic chaos regarding the purposeful processing of not only the potential waste

itself, but also planned marketable products. Certain limitations on the declared indicator for the capabilities of the production system, regarding its transfer completely into a state of thermodynamic disequilibrium within the declared indicator from 0.7 to 4.06 are shown. Beyond these values, the production system is not capable of any minimization of waste in the technological process itself.

Keywords: industrial waste; structure of raw materials; thermodynamic constraints; entropy; bifurcation; chaos.

References

- [1] V. Voloshyn, *Vidkhody ta yikh pryroda* [Waste and its nature]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [2] V. Voloshyn, *Vidkhody ta termodynamika* [Waste and thermodynamics]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [3] V.S. Voloshyn, «Shchodo pytannia pro metodolohiiu minimizatsii vidkhodiv u dzhhereli yikh vynyknennia - tekhnolohichnomu protsesi» [«On the question of the methodology of waste minimization at the source of occurrence»], *Ekolohichni nauky – Ecological Sciences*, № 2(53), pp. 114-122, 2024. doi: **10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.17**.
- [4] V.S. Voloshyn, «Chy varto shukaty «zoloti proportionsi» Fibonachchi v protsesakh utvorennia vidkhodiv» [«Should we look for Fibonacci's «golden ratio» in the processes of waste formation»], *Visnyk Pryazovs'koho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriia: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 44, pp. 43-53, 2022. doi: **10.32782/2225-6733.44.2022.6**.
- [5] H.B. Mann, and D.R. Whitney, «On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger Than the Other», *Annals of Mathematical Statistics*, № 18(1), pp. 50-60, 1947. doi: **10.1214/aoms/1177730491**.
- [6] R.M. May, «Simple mathematical models with very complicated dynamics», *Nature*, vol. 261(5560), pp. 459-467, 1976. doi: **10.1038/261459a0**.
- [7] *World Steel in Figures 2023*. Brussels : World Steel Association, 2023.
- [8] *The Global Steel Industry in Figures*. OECD Publishing. Paris, 2022.

Стаття надійшла 23.01.2026

Стаття прийнята 25.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Волошин В.С., Азархов О.Ю. Ентропійний фактор у прояві властивостей органічних і неорганічних систем на межі співіснування людини та навколишнього середовища. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 110–116. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359940>.

**БІОСТАВКИ ЯК НЕОБХІДНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ
ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД У ВИПАДКАХ ЇХ СКИДАННЯ
В ЕКОЛОГІЧНО ЧУТЛИВІ ВОДНІ ОБ'ЄКТИ****Копаниця О.Б.**

провідний судовий експерт Лабораторії досліджень об'єктів навколишнього середовища та екологічних досліджень, Київський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України; аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8939-2919>, e-mail: ecology.expert.2020@gmail.com

Проблема очищення стічних вод у сучасних умовах загострюється через зростання антропогенного навантаження на водні об'єкти, зношеність очисних споруд та підвищення вимог природоохоронного законодавства. Особливо вразливими є малі річки та інші екологічно чутливі водойми, які характеризуються обмеженою асиміляційною здатністю та низьким потенціалом самоочищення. У таких умовах навіть формальне дотримання нормативів гранично допустимих скидів не гарантує екологічної безпеки. Однією з ключових технологічних проблем біологічного очищення є винос активного мулу з вторинних відстійників, що зумовлюється «спуханням» мулу, гідравлічним перевантаженням споруд, нестабільністю складу стічних вод, наявністю токсичних компонентів та порушенням режимів експлуатації. Винос мулу призводить до погіршення якості очищених стічних вод, зростання концентрацій завислих речовин, органічних сполук і біогенних елементів, а також до надходження у водні об'єкти мікробної біомаси та накопичення у мулі токсичних речовин. У статті обґрунтовується необхідність використання біоставків як додаткового технологічного елементу систем очищення стічних вод у випадках їх скидання в екологічно чутливі водойми. Біоставки розглядаються як технологічний бар'єр між очисними спорудами та природним водним об'єктом, здатний забезпечити стабілізацію якості стічних вод, затримання винесеного активного мулу, зниження концентрацій органічних речовин і біогенних елементів, а також зменшення токсичності скидів. Проаналізовано основні показники якості стічних вод (БСК, ХСК, завислі речовини, сполуки азоту та фосфору, токсичність), а також екологічні ризики скидання недостатньо очищених стоків у малі річки. На прикладі діяльності очисних споруд КП «Броваритепловодоенергія» показано, що робота споруд у режимі, близькому до граничних нормативів, створює передумови для нестабільності процесів очищення та підвищує ризик негативного впливу на водні екосистеми. Зроблено висновок, що для очисних споруд, які здійснюють скид у малі річки та інші екологічно чутливі водойми, біоставки мають розглядатися не як факультативний елемент, а як обов'язкова складова технологічної схеми очищення. Сформульовані висновки та рекомендації також можуть бути застосовані до систем очищення стічних вод підприємств целюлозно-паперової промисловості.

Ключові слова: біоставки; активний мул; вторинні відстійники; екологічно чутливі водойми; біотестування; стічні води; екосистеми.

Постановка проблеми

Біологічне очищення стічних вод із використанням активного мулу залишається основною технологією, що застосовується на більшості очисних споруд у світі. Водночас практика експлуатації таких систем свідчить про їхню нестабільність у разі зміни гідравлічних навантажень, складу стічних вод або порушення режимів роботи. Одним із найбільш поширених наслідків цих порушень є погіршення осаджувальних властивостей активного мулу та його винесення з вторинних відстійників разом з очищеними стічними водами. Сучасні дослідження показують, що порушення структури та властивостей активного мулу зумовлюється комплексом мікробіологічних і технологічних чинників, серед яких зміни складу мікробних угруповань, дефіцит поживних речовин, коливання концентрації розчиненого кисню, токсичний вплив домішок та гідравлічні перевантаження очисних споруд. У результаті формується мул із низькою здатністю до осідання, що призводить до зростання концентрацій завислих

речовин і органічних сполук у скидах та погіршення їхньої якості [1, 2].

Дослідження останніх років підтверджують, що нестабільність процесів біологічного очищення має системний характер і проявляється навіть на очисних спорудах, які формально відповідають нормативним вимогам. Зокрема, показано, що зміни мікробної структури активного мулу та накопичення позаклітинних полімерних речовин істотно впливають на його осаджувальні властивості та сприяють винесенню біомаси зі вторинних відстійників [3, 4].

Окремою проблемою є скид очищених стічних вод у малі річки та інші екологічно вразливі водні об'єкти. Для таких водойм характерна обмежена здатність до самоочищення та низька асиміляційна спроможність, унаслідок чого навіть незначне погіршення якості скидів може призводити до порушення гідрохімічного режиму, розвитку процесів евтрофікації та деградації водних екосистем. Дослідження європейських авторів показують, що очисні споруди часто не

забезпечують достатнього рівня захисту малих водотоків, навіть за дотримання нормативів скиду [5].

Таким чином, традиційна схема очищення стічних вод, яка завершується вторинними відстійниками, не завжди гарантує екологічну безпеку скидів у вразливі водні об'єкти. У випадку скиду стічних вод у малі річки традиційна схема очищення, що завершується вторинними відстійниками, є технологічно недостатньою, а біоставки мають розглядатися як обов'язковий елемент системи очищення. Це зумовлює необхідність пошуку та впровадження додаткових технологічних рішень, здатних стабілізувати якість очищених стічних вод і зменшити ризик винесення активного мулу у природні водойми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Біологічне очищення стічних вод із використанням активного мулу розглядається сучасною наукою як складна система, стабільність якої визначається сукупністю мікробіологічних, фізико-хімічних і технологічних чинників. Дослідження останніх років показують, що порушення структури мулових флокул і зміни властивостей біомаси безпосередньо впливають на ефективність осадження активного мулу у вторинних відстійниках та якість очищених стічних вод [4, 6].

У наукових публікаціях доведено, що позаклітинні полімерні речовини відіграють визначальну роль у формуванні структури активного мулу та його осаджувальних характеристик. Зміна співвідношення білкових і полісахаридних компонентів цих речовин призводить до формування агрегатів із пониженою щільністю та стабільністю, що ускладнює процес відокремлення мулу від очищеної води у вторинних відстійниках [4, 6].

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із впливом технологічних режимів роботи очисних споруд на стабільність процесів активного мулу. Показано, що скорочення часу перебування біомаси в системі, зміна навантаження органічними речовинами та коливання концентрації активної біомаси можуть призводити до нестабільності процесів очищення і погіршення осаджувальних властивостей мулу [7, 8].

Проблема винесення активного мулу набуває особливої значущості у контексті впливу очищених стічних вод на природні водні об'єкти. Дослідження екологічного стану річкових систем показують, що навіть за дотримання нормативних показників очищення скид стічних вод може призводити до деградації екосистем, особливо у випадку малих водотоків, де частка очищених стічних вод у загальному водному балансі є значною [5].

Разом із цим сучасні роботи засвідчують, що нестабільність роботи біологічної стадії очищення має системний характер і проявляється не лише у погіршенні фізико-хімічних показників стічних вод, а й у зміні мікробіологічної структури біомаси та її

функціональних властивостей, що ускладнює прогнозування поведінки систем активного мулу [9].

У літературі також розглядаються можливості підвищення надійності систем очищення шляхом упровадження додаткових стадій доочищення. Показано, що використання природоорієнтованих технологій, зокрема систем ставків стабілізації та полірувальних водойм, дозволяє згладжувати коливання якості стічних вод і зменшувати негативні наслідки нестабільної роботи біологічної стадії очищення [10].

Водночас аналіз наукових публікацій свідчить, що питання взаємозв'язку між винесенням активного мулу зі вторинних відстійників і екологічним станом малих річок залишаються недостатньо систематизованими. Обмеженою є також кількість досліджень, у яких біоставки розглядаються не як допоміжний етап очищення, а як самостійний технологічний бар'єр між очисними спорудами та природним водним об'єктом. Це зумовлює необхідність подальшого аналізу їх ролі у стабілізації якості стічних вод та зменшенні екологічного навантаження на вразливі водні екосистеми.

Мета статті

Метою статті є аналіз причин винесення активного мулу зі вторинних відстійників та обґрунтування ролі біоставків як технологічного елементу, що забезпечує стабілізацію якості очищених стічних вод і зменшення екологічного навантаження на малі водні об'єкти.

Виклад основного матеріалу

Дослідження останніх років продемонстрували критичну роль екстрацелюлярних полімерних речовин у механізмах спухання мулу.

Комплексний аналіз на основі протеомічних методів виявив, що під час спухання вміст екстрацелюлярних полімерних речовин поступово зменшується від 210,23 мг/г летких завислих речовин до 131,34 мг/г [5]. Особливо значущим є зниження вмісту білків від 173,33 мг/г до 95,42 мг/г при одночасному збільшенні полісахаридів.

Ключовим механізмом погіршення седиментації виявилось електростатичне відштовхування між бактеріальними клітинами. Надмірний розвиток нитчастих бактерій суттєво впливає на молекулярні функції екстрацелюлярних білків та метаболічні шляхи екстрацелюлярних полімерних речовин. Зокрема, відбувається зменшення синтезу гідрофобних амінокислот та збільшення синтезу гідрофільних, що призводить до формування пухкої структури пластівців з поганою здатністю до осадження [5].

Додаткові дослідження 2023 року підтвердили, що зміни у співвідношенні полісахариди/білки в екстрацелюлярних полімерних речовинах можуть індукувати нефіламентозне спухання мулу навіть за відсутності масового розвитку нитчастих бактерій [11]. Це розширює спухання активного мулу є однією з найбільш

поширених проблем у системах біологічного очищення стічних вод і пов'язане з погіршенням осаджувальних властивостей біомаси внаслідок змін її мікробіологічної структури. Значення мулового індексу в межах 80–120 мл/г відповідають задовільним осаджувальним властивостям активного мулу, тоді як значення понад 150–200 мл/г свідчать про нестабільність процесу осадження. Нитчасті бактерії, які відіграють роль структурного каркасу флокул активного мулу, при їх надмірному розвитку призводять до формування міжфлокулярних зв'язків, що ускладнює ущільнення флокул і їх осадження у вторинних відстійниках. Серед чинників, які сприяють розвитку нитчастих мікроорганізмів, виділяють низьку концентрацію розчиненого кисню (< 2 мг/л), низьке навантаження на мул, дефіцит біогенних елементів та коливання фізико-хімічних параметрів середовища [1, 2, 12].

Поряд з мікробіологічними факторами спухання мулу, до виносу біомаси зі вторинних відстійників призводять також технологічні порушення, насамперед гідравлічне перевантаження споруд. Перевищення проєктних гідравлічних навантажень очисних споруд призводить до скорочення часу перебування стічних вод у вторинних відстійниках, зростання висхідної швидкості потоку та порушення умов осадження активного мулу. У результаті відбувається винесення біомаси разом з очищеними стічними водами. Дослідження показують, що гідравлічне перевантаження очисних споруд є поширеною проблемою, яка істотно впливає на ефективність відокремлення активного мулу та стабільність роботи біологічних систем очищення [13, 14].

Наявність у стічних водах токсичних речовин, зокрема важких металів, органічних розчинників, поверхнево-активних речовин та фармацевтичних сполук, призводить до пригнічення активності мікроорганізмів активного мулу та порушення процесів біологічного очищення. Пригнічення або загибель мікроорганізмів супроводжується порушенням флокулоутворення, зростанням кількості дисперсного мулу та погіршенням якості очищених стічних вод [15].

До додаткових причин винесення активного мулу належать процеси денітрифікації у вторинних відстійниках, температурні коливання, раптові зміни складу стічних вод та конструктивні особливості відстійників [16, 17].

З огляду на множинність чинників, які можуть призводити до виносу активного мулу, особливо актуальним є питання захисту водних об'єктів від нестабільності якості скидів. Біоставки (ставки стабілізації/доочищення, у т.ч. полірувальні ставки) є природоорієнтованим технологічним бар'єром між біологічною стадією очищення (аеротенки + вторинні відстійники) та водним об'єктом-приймачем. Їх ключова функція полягає у «згладжуванні» коливань якості скиду та додатковому вилученні завислих речовин і залишкової органіки, включно з частинками активного мулу, які можуть виноситися зі вторинних відстійників за

нестабільних режимів роботи. Практика та оглядові дослідження підтверджують, що ставкові системи здатні працювати як третинна стадія технологічного процесу очищення і як буфер, що підвищує надійність дотримання екологічних вимог до скиду [18, 19].

Механізми доочищення у біоставках мають комплексний характер: гравітаційне осадження дрібнодисперсних завислих речовин (у т.ч. біомаси), біодеградація органічних сполук у водній товщі та донних відкладах, асиміляція біогенних елементів водоростями й бактеріями, а також природне знезараження (сонячна радіація/УФ, підвищення рН у денні години, конкуренція та хижацтво у мікробіоценозі). Узагальнення сучасної літератури для WSP/лагунних систем показує, що ефективність залежить від типу ставка (анаеробний/факультативний/матураційний), гідравлічного режиму та клімато-сезонних чинників [18–20].

Експлуатаційно біоставки доцільно розглядати не як «пасивну водойму», а як споруду, що потребує керування ключовими параметрами, насамперед гідравлічним часом утримання та гідродинамікою потоку. Саме гідравлічна неефективність (короткі замикання потоку, «мертві зони») є типовою причиною зниження якості доочищення. Для мінімізації коротких замикань у практиці застосовують перегородки/бафли, які покращують гідравліку й можуть додатково створювати поверхню для прикріпленого росту біоплівки; моделювання й експериментальні дані показують, що внесок саме покращеної гідравліки часто є визначальним у зростанні ефективності [20, 21].

Окремий блок вимог стосується контролю внутрішнього навантаження та сезонної мінливості. Дослідження пост-очищення після ставків стабілізації демонструють, що за аварійних/нештатних ситуацій (наприклад, потрапляння активного мулу та осадженого фосфору у ставкову лінію) можливе формування явища внутрішнього забруднення і погіршення показників на виході з біоставки перед скиданням у водойму, що означає необхідність регламенту експлуатації саме «на випадок виносу мулу». Сезонність (температура, фотоперіод) впливає на розчинений кисень, рН, амоній/фосфати та загальну стабільність показників, що підтверджено натурними спостереженнями для ставкових систем у різних кліматичних умовах [19, 22].

Важливою експлуатаційною особливістю біоставків є потенційно висока частка водоростевої біомаси у вихідних показниках ХСК/завислих речовин: у натурному обстеженні серії ставків стабілізації показано, що перевищення за сумарним ХСК може формуватися саме через водорості (високі фракції часткового ХСК), а досягнення вимог до якості інколи потребує додаткових заходів (перед- або пост-очищення). Це означає, що біоставок як «полірувальний» бар'єр потрібно проєктувати/експлуатувати так, щоби він затримував завислі речовини (включно з активним мулом), але не погіршував скидання за рахунок вторинного «цвітіння» та виносу водоростей залежно від цільових нормативів та чутливості водоприймача [23].

Як практичні елементи експлуатації, які прямо підвищують надійність біоставків у контексті вносу активного мулу, доцільно передбачати: (i) гідравлічні рішення проти коротких замикань (перегородки/секціонування, правильні вузли входу/виходу); (ii) регулярний контроль донних відкладів та мулу (накопичення знижує об'єм і гідравлічний час утримання); (iii) моніторинг добової та сезонної динаміки розчиненого кисню і рН як індикаторів працездатності біоценозу; (iv) експлуатаційний протокол на випадок залпових надходжень/виносу мулу (обмеження пікових витрат, тимчасове перенаправлення/вирівнювання, контроль фосфору/органіки). Узагальнені практичні рекомендації щодо оптимізації ставків (зокрема, бафли для утримання розрахункового часу гідравлічного перебування, інтеграція з іншими природоорієнтованими рішеннями) систематизовані у сучасному огляді для ставкових систем [20].

Окремо слід враховувати, що завершальні ставки доочищення можуть бути точкою накопичення мікроорганізмів у біоплівках на твердих субстратах (в т.ч. пластиках). У зв'язку з цим важливим є санітарний контроль, управління біоплівками та запобігання вторинним ризикам для водоприймача в екологічно чутливих умовах скиду [24].

Якість очищених стічних вод, що скидаються у водні об'єкти, регламентується низкою показників, які відображають: органічне навантаження, винос біомаси/завислих речовин (в т.ч. залишків активного мулу), біогенні елементи (N, P), токсикологічно значущі домішки (важкі метали та ін.), а також інтегральну токсичність як сумарний біологічний ефект суміші забруднювачів.

БСК (найчастіше БСК₅) – індикатор біологічно окиснюваної органіки. При виносі активного мулу БСК може зростати через надходження біомаси та сорбованих на ній органічних речовин [25, 26].

ХСК – показник сумарної окиснюваності (включає біорозкладну і частину небіорозкладної органіки), чутливий до промислових домішок [27].

Практично: комбінація БСК + ХСК дає уявлення про біорозкладність і про ризик наявності стійкої/токсичної органіки, яка може не вилучатися біологічним очищенням.

Завислі речовини (TSS) – основний «операційний» показник проблеми: саме вони відображають винос флокул активного мулу зі вторинних відстійників [28].

Порушення нітрифікації/денітрифікації (наприклад, через токсичні домішки або перевантаження) проявляється в підвищенні мінеральних форм азоту та/або загального азоту. Для екологічно чутливих водойм N і P є «керуючими» показниками ризику евтрофікації, дефіциту кисню та вторинного цвітіння [29, 30]. Важкі метали (Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, Cd, Hg тощо) небезпечні двома механізмами: інгібування/пригнічення активного мулу (погіршення нітрифікації та осаджуваності) та пряма токсичність для гідробіонтів у

приймаючій водоймі, зокрема в сумішах [31]. Фізико-хімічні показники якості стічних вод не завжди дозволяють адекватно оцінити їх екологічну небезпечність. Навіть нормативні значення БСК/ХСК/TSS/N/P/металів не гарантують відсутність токсичного ефекту, оскільки токсичність формується сумарною дією комплексу речовин, включаючи мікрозабруднювачі (фармацевтичні речовини, ПАР, пестициди, інгібітори нітрифікації), продукти трансформації органічних сполук та їх синергічні або антагоністичні взаємодії. Ці ефекти не відображаються окремими хімічними показниками і можуть проявлятися на різних трофічних рівнях. [32-34]. У зв'язку з цим у сучасній практиці екологічного контролю дедалі більшого значення набуває біотестування як інтегральний метод оцінки токсичності стічних вод. Біотестування базується на визначенні реакції живих організмів різних трофічних рівнів на дію досліджуваних водних середовищ і дозволяє оцінити сумарний біологічний ефект суміші забруднювачів [35, 36].

Одним із найбільш поширених тест-організмів у системах екологічного моніторингу є ракоподібні *Daphnia magna* та *Ceriodaphnia affinis*, які характеризуються високою чутливістю до широкого спектра токсичних речовин і коротким життєвим циклом [37, 38].

Критерієм токсичності є рівень смертності або інгібування рухливості тест-організмів у досліджуваних пробах порівняно з контролем. За результатами біотестування визначають показники LC₅₀ або EC₅₀, які відображають концентрацію досліджуваного середовища, що спричиняє загибель або пригнічення життєдіяльності 50% тест-організмів. Отримані дані дозволяють класифікувати стічні води за рівнем токсичності та оцінити їх потенційний вплив на водні екосистеми [35, 36].

Особливу актуальність біотестування набуває у випадках виносу активного мулу зі вторинних відстійників. Частинки мулу можуть сорбувати токсичні речовини, зокрема важкі метали та органічні мікрозабруднювачі, що призводить до зростання токсичності скидів навіть за формального дотримання нормативів за окремими хімічними показниками. Таким чином, біотестування виступає необхідним доповненням до традиційного фізико-хімічного контролю якості очищених стічних вод [32-34].

Проблема токсичності скидів набуває особливої гостроти у випадку їх надходження у малі водні об'єкти з обмеженою асиміляційною здатністю. Малі річки та струмки (низькі порядки річкової мережі) є найбільш вразливими приймачами скидів очищених стічних вод через обмежену розбавляючу здатність, швидку реакцію біоценозів на зміни гідрохімічного режиму та високу частку точкових впливів у загальному балансі навантаження. Сучасні дослідження свідчать, що погіршення екологічного стану малих потоків статистично узгоджується зі зростанням частки міських стічних вод у стоку; при цьому залежність є істотно вираженою саме для малих водотоків, тоді як для

більших річок вона слабша або відсутня, що прямо вказує на роль низької асиміляційної спроможності малих річок [5]. Навіть за коректно організованого очищення, скиди можуть залишатися екологічно значущим фактором ризику для малих водотоків, оскільки стічні води містять суміші забруднювачів (у т.ч. мікрозабруднювачі та трансформаційні продукти), а також можуть викликати багатофакторний стрес (органічне навантаження, біогенні елементи, токсичні ефекти). Узагальнення на великому масиві даних по очисних спорудах стічних вод демонструє зміни складу угруповань водних безхребетних нижче випусків, що відображає екосистемні втрати від навіть очищених скидів [39].

Для оцінки реальної небезпеки скидів у малих річках особливо важливий ефект-орієнтований підходи, які дозволяють фіксувати сумарну токсичність сумішей там, де традиційний контроль «по окремих речовинах» не пояснює екологічних наслідків. Практично це означає, що для малих водотоків одного лише дотримання окремих фізико-хімічних показників може бути недостатньо для гарантування екологічної безпеки; потрібне доповнення контролю біоаналітичними/біотестовими інструментами. Окремо слід враховувати, що винос активного мулу зі вторинних відстійників збільшує навантаження завислими речовинами й органічною біомасою, а також призводить до надходження у водойму сорбованих на мулі токсичних домішок. Для малих річок це критично, оскільки залпові надходження біомаси/завислих речовин швидко трансформуються у дефіцит кисню, локальну деградацію середовища та біотичні ефекти, що виявляються, зокрема, через біомоніторинг і методи оцінки біологічних ефектів [5, 40, 41].

З огляду на це, екологічно чутливі водойми (передусім малі річки) доцільно розглядати як водні об'єкти з низькою толерантністю до коливань якості очищених стічних вод. Відповідно, для зменшення ризиків необхідні технологічні рішення, які стабілізують якість скиду та знімають пікові ефекти, зокрема, посилені стадії доочищення/пост-очищення, ефект-орієнтований контроль і біотестування. [42-44].

Особливої уваги потребують випадки скиду очищених стічних вод у малі річки, які характеризуються обмеженою асиміляційною здатністю та підвищеною чутливістю до антропогенного навантаження. У таких умовах навіть незначні коливання якості стічних вод можуть призводити до порушення гідрохімічного режиму та деградації водних екосистем. Показовим прикладом подібної ситуації є функціонування очисних споруд КП «Броваритепловодоенергія», скид очищених стічних вод яких здійснюється у річку Красилівка після проходження біологічної очистки та вторинних відстійників. Контроль якості води здійснюється у трьох характерних точках: у фоновому створі річки (вище скиду), у контрольному створі (нижче скиду) та у випуску стічних вод. Слід зазначити, що річка Красилівка належить до малих річок, які характеризуються обмеженою асиміляційною здатністю та

підвищеною екологічною вразливістю до антропогенного навантаження. Основні показники якості стічних вод після очищення та води річки Красилівка характеризуються такими значеннями [45]:

- органічне навантаження. Концентрація біохімічного споживання кисню (БСК₅) у стічних водах після очищення становить 14,6 мг/дм³, тоді як у контрольному створі річки – 13,0 мг/дм³, а у випуску – 14,3 мг/дм³. Аналогічна тенденція спостерігається для хімічного споживання кисню (ХСК): після очищення – 78,2 мг/дм³, у контрольному створі – 69,4 мг/дм³, у випуску – 76,0 мг/дм³.

Ці дані свідчать про суттєвий внесок скиду стічних вод у формування органічного навантаження річки Красилівка навіть за умов функціонування біологічної очистки.

- завислі речовини як індикатор виносу активного мулу. Концентрація завислих речовин після очищення становить 14,5 мг/дм³, тоді як у фоновому створі річки – 30,7 мг/дм³, а у контрольному створі – 23,1 мг/дм³.

Завислі речовини у стічних водах після біологічного очищення значною мірою представлені частинками активного мулу. Їх надходження у водний об'єкт свідчить про нестабільність процесів осадження біомаси у вторинних відстійниках та підтверджує наявність ризику виносу активного мулу разом зі скидом.

- біогенні елементи. Вміст амонійного азоту у стічних водах після очищення становить 6,45 мг/дм³, у контрольному створі річки – 6,65 мг/дм³, у випуску – 6,51 мг/дм³. Концентрація фосфатів після очищення дорівнює 6,09 мг/дм³, тоді як у контрольному створі – 4,65 мг/дм³.

Підвищені концентрації сполук азоту та фосфору у зоні впливу скиду свідчать про надходження біогенних елементів у річку Красилівка, що створює передумови для розвитку процесів евтрофікації та погіршення екологічного стану водойми.

- інші компоненти забруднення. У стічних водах і воді річки Красилівка також зафіксовано наявність нітратів, нітритів, сульфатів, хлоридів, заліза та поверхнево-активних речовин, що підтверджує багатокомпонентний характер антропогенного навантаження на водний об'єкт.

Аналіз наведених даних свідчить, що очищені стічні води КП «Броваритепловодоенергія» формують помітний вплив на гідрохімічний режим річки Красилівка. Навіть за умов наближення показників до нормативних значень, скид стічних вод у малу річку супроводжується:

- підвищенням концентрацій органічних речовин;
- надходженням біогенних елементів;
- збільшенням концентрації завислих речовин, у тому числі частинок активного мулу;
- формуванням потенційних токсичних ефектів суміші забруднювачів.

Технологічною схемою очищення стічних вод передбачено відведення освітленої води після вторинних відстійників у річку Красилівка, при цьому

стабільність показників якості скиду визначається ефективністю процесів біологічного очищення та осадження активного мулу. Таким чином, ситуація на очисних спорудах КП «Броваритепловодоенергія» може розглядатися як типова для багатьох біологічних систем очищення стічних вод, у яких технологічна схема завершується вторинними відстійниками без додаткових стадій доочищення. У випадку малих річок, таких як Красилівка, це призводить до підвищених екологічних ризиків і обґрунтовує необхідність застосування додаткових технологічних бар'єрів, зокрема біоствавків, як елементів стабілізації якості скидів і зменшення негативного впливу на водні екосистеми.

Аналіз показників якості стічних вод та стану річки Красилівка в зоні впливу скиду свідчить, що технологічна схема очищення, яка завершується вторинними відстійниками, не завжди забезпечує достатній рівень стабільності показників якості скидів, особливо у випадку малих річок. Навіть за умов функціонування біологічної очистки та наближення показників до нормативних значень, у водний об'єкт надходить комплекс органічних, біогенних і потенційно токсичних компонентів, що формує додаткове антропогенне навантаження на екосистему.

Винос активного мулу зі вторинних відстійників у таких умовах виступає не лише технологічною, але й екологічною проблемою, оскільки частинки мулу виконують роль носіїв органічних речовин, біогенних елементів і токсичних домішок. Для малих річок, які характеризуються обмеженою асиміляційною здатністю, навіть незначне підвищення концентрації завислих речовин може призводити до порушення гідрохімічного режиму та деградації водних екосистем.

Отримані результати свідчать, що забезпечення екологічної безпеки скидів потребує не лише оптимізації режимів роботи біологічної стадії очищення, але й впровадження додаткових технологічних елементів, здатних стабілізувати якість стічних вод перед їх надходженням у природні водні об'єкти. Одним із таких елементів можуть бути біоствавки, які виконують функції третинного очищення та буферної зони між очисними спорудами і природною водоймою.

Використання біоствавків дозволяє зменшити концентрацію завислих речовин за рахунок додаткового осадження частинок активного мулу, підвищити ступінь окиснення органічних речовин, знизити концентрацію біогенних елементів і токсичних компонентів, а також стабілізувати показники якості скидів. Таким чином, біоствавки можуть розглядатися не як допоміжний елемент, а як важлива складова системи очищення стічних вод, особливо у випадку скиду у малі річки.

З огляду на викладене, доцільність впровадження біоствавків у технологічні схеми очищення стічних вод має системний характер і може бути обґрунтована не лише для очисних споруд КП «Броваритепловодоенергія», але й для інших комунальних і промислових підприємств, зокрема підприємств целюлозно-паперової промисловості, стічні води

яких характеризуються підвищеним органічним навантаженням і наявністю токсичних домішок.

Висновки

У результаті проведеного аналізу встановлено, що винос активного мулу зі вторинних відстійників є системною проблемою біологічних очисних споруд, яка формується під впливом комплексу технологічних, гідравлічних і хімічних чинників. Дане явище призводить до погіршення показників якості очищених стічних вод, зокрема зростання концентрацій завислих речовин, органічних сполук, біогенних елементів і потенційно токсичних компонентів.

Показано, що традиційна оцінка якості скидів на основі окремих фізико-хімічних показників не завжди дозволяє адекватно оцінити екологічні ризики для природних водних об'єктів. Інтегральний показник токсичності, визначений методом біотестування, є важливим доповненням до стандартного контролю та дозволяє оцінити сумарний біологічний ефект суміші забруднювачів.

На прикладі очисних споруд КП «Броваритепловодоенергія» та річки Красилівка показано, що скид очищених стічних вод у малі річки супроводжується помітним впливом на гідрохімічний режим водойм навіть за умов функціонування біологічної стадії очищення. Обмежена асиміляційна здатність малих річок зумовлює їх підвищену чутливість до коливань якості скидів, що посилює екологічні ризики виносу активного мулу.

Обґрунтовано, що технологічні схеми очищення стічних вод, які завершуються вторинними відстійниками без додаткових стадій доочищення, не забезпечують достатнього рівня стабільності показників якості скидів у випадку їх відведення у малі річки. У зв'язку з цим біоствавки доцільно розглядати як ефективний технологічний елемент третинного очищення, який виконує функції стабілізації якості стічних вод і зниження екологічних ризиків для природних водних екосистем.

Сформульовані положення мають універсальний характер і можуть бути застосовані не лише для комунальних очисних споруд, але й для підприємств целюлозно-паперової промисловості, стічні води яких характеризуються підвищеним органічним навантаженням і наявністю токсичних компонентів, що також зумовлює ризик порушення роботи біологічних систем очищення та виносу активного мулу.

Перелік використаних джерел

- [1] Strategies for controlling filamentous bulking in activated sludge wastewater treatment plants: the old and the new / Sam T., Le Roes-Hill M., Hoosain N., Welz P. J. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 20. Article 3223. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14203223>.
- [2] Causes, control, and misconceptions of filamentous bacterial bulking in the aeration tank of the SWTP /

- Mustafa G., Chappell P., Bate A., Ha K. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*. 2023. Vol. 16, no. 1. Pp. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8372342>.
- [3] Insight into sludge bulking in a full-scale wastewater treatment plant: quorum sensing, microbial community, and metabolic characteristics / S. Li et al. *Environmental Technology and Innovation*. 2024. Vol. 34. Article 103562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103562>.
- [4] A review of the role of extracellular polymeric substances (EPS) in wastewater treatment systems / L. Huanget al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, no. 19. Article 12191. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph191912191>.
- [5] Why wastewater treatment fails to protect stream ecosystems in Europe / Büttner O., Jawitz J. W., Birk S., Borchardt D. *Water Research*. Vol. 217. Article 118382. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118382>.
- [6] Costa N., Libardi N., Costa R. How can the addition of extracellular polymeric substances (EPS)-based bioflocculant affect aerobic granular sludge (AGS)? *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 310. Article 114807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114807>.
- [7] High-rate activated sludge at very short SRT: key factors for process stability and performance of COD fractions removal / J. Canals et al. *Water Research*. 2023. Vol. 231. Article 119610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119610>.
- [8] Johnson M. B., Mehrvar M. Waste activated sludge-high rate (WASHR) treatment process: a novel, economically viable, and environmentally sustainable method to co-treat high-strength wastewaters at municipal wastewater treatment plants. *Bioengineering*. 2023. Vol. 10, no. 9. Article 1017. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering10091017>.
- [9] Bulking of activated sludge in the biological treatment of municipal and industrial wastewater, due to the massive development of filamentous bacteria type 021N / Iurchenko V. O., Melnikova O. G., Sorokina K. B., Teliura N. O. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254, no. 1. Article 012086. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012086>.
- [10] Kilian S., Pawęska K., Bawiec A. Evaluation of post-treatment after wastewater stabilization ponds at municipal wastewater treatment plant. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 22257. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72995-8>.
- [11] Non-filamentous sludge bulking induced by exopolysaccharide variation in structure and properties during aerobic granulation / S. Wang et al. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 876. Article 162786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162786>.
- [12] Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery : monography / Tchobanoglous G., Stensel H. D., Tsuchihashi R., Burton F. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 1848 p.
- [13] Clarification of biologically treated wastewater in a clarifier with suspended sludge layer / Kolpakova V., Ospanov K., Kuldeyev E., Andracka D. *Water*. 2021. Vol. 13, no. 18. Article 2486. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13182486>.
- [14] Assessment in treatment efficiency of a small-scale municipal wastewater treatment plant with activated sludge / Bubalo M., Šumelj I., Herceg K., Vukojević Medvidović N. *Ochrana Prirody Slovenska/Ekologija*. 2022. Vol. 41, no. 3. Pp. 272–282. DOI: <https://doi.org/10.2478/eko-2022-0028>.
- [15] Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies / T. E. Oladimeji et al. *Heliyon*. Vol. 10, no. 23. Article e40370. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370>.
- [16] Iyer S., Deshmukh S.M., Tapre R.W. Review on removal of heavy metals from industrial effluents by adsorption. *Reviews in Inorganic Chemistry*. 2025. Vol. 45, no. 3. Pp. 479–496. DOI: <https://doi.org/10.1515/revic-2024-0079>.
- [17] Aerobic granular sludge-based sustainable wastewater treatment: process, bottlenecks, and knowledge gap through scientometric perspective / P. Vydehi et al. *Journal of Hazardous Materials Advances*. Vol. 16. Article 100462. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100462>.
- [18] Mahapatra S., Tripathy S., Dash R. R. Waste stabilization pond (WSP) for wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 318. Article 114668. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114668>.
- [19] dos Santos S. L., van Haandel A. Nutrient removal in sequential batch polishing ponds. *Water*. Vol. 13, no. 11. Article 1584. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13111584>.
- [20] Calabrò P. S., Pangallo D., Zema D. A. Wastewater treatment in lagoons: a systematic review and a meta-analysis. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 359. Article 120974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120974>.
- [21] Effect of attached growth on treatment performance in waste stabilization ponds / Y. Lian et al. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 20. Article 3245. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14203245>.
- [22] Marcantel M., Bappy M., Hayes M. Investigating seasonal water quality dynamics in humid subtropical tandem facultative wastewater stabilization ponds. *Water*. 2025. Vol. 17, no. 20. Article 2936. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17202936>.
- [23] Characterization and evaluation of waste stabilization pond systems in Namibia / Sinn J., Agrawal S., Orschler L., Lackner S. *H2Open Journal*. 2022. Vol. 5,

- no. 2. Pp. 365–378. DOI: <https://doi.org/10.2166/h2oj.2022.004>.
- [24] Advancements in high-rate algal pond technology for enhanced wastewater treatment and biomass production: a review / I. B. Magalhães et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2024. Vol. 66. Article 105929. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105929>.
- [25] ДСТУ ISO 5815-2:2009. Якість води. Визначення біохімічного споживання кисню після п діб (БСКп). Частина 2. Метод для нерозведених проб (ISO 5815-2:2003, IDT). [Чинний від 2011-07-02]. Вид. офіц. Київ: Український науково-дослідний інститут екологічних проблем (УкрНДІЕП). 12 с.
- [26] ДСТУ EN ISO 5815-1:2025. Якість води. Визначення біохімічного споживання кисню після п діб (БСКп). Частина 1. Метод розведення та висювання з додаванням алітїосечовини (EN ISO 5815-1:2019, IDT; ISO 5815-1:2019, IDT). [Чинний від 2025-11-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
- [27] ДСТУ ISO 6060:2003. Якість води. Визначання хімічної потреби в кисні (ISO 6060:1989, IDT). [Чинний від 2004-07-01]. Вид. офіц. Київ: ТК 64.
- [28] ДСТУ EN 872:2013. Якість води. Визначення вмісту завислих твердих частинок методом фільтрування через фільтри зі скловолокна (EN 872:2005, IDT). [Чинний від 2014-07-01]. Вид. офіц. Київ: ІВ-ПіМ НААН.
- [29] ДСТУ ISO 7150-1:2003. Якість води. Визначання амонію. Частина 1. Ручний спектрометричний метод (ISO 7150/1:1984, IDT). [Чинний від 2004-07-01]. Вид. офіц. Київ: ІВ-ПіМ НААН.
- [30] ДСТУ EN ISO 11905-1:2022. Якість води. Визначення азоту. Частина 1. Метод окисного зброджування пероксодисульфатом (EN ISO 11905-1:1998, IDT; ISO 11905-1:1997, IDT). [Чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
- [31] ДСТУ EN ISO 17294-2:2019. Якість води. Використання мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-МС). Частина 2. Визначення 62 елементів (EN ISO 17294-2:2016, IDT; ISO 17294-2:2016, IDT). [Чинний від 2019-09-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
- [32] Integrating biological early warning systems with high-resolution online chemical monitoring in wastewater treatment plants / A. Kizgin et al. *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58, no. 44. Pp. 23148–23159. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c07316>.
- [33] Efficient removal of toxicity associated to wastewater treatment plant effluents by enhanced soil aquifer treatment / C. Sanz et al. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 465. Article 133377. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133377>.
- [34] Mlonyeni S., Pereao O., Opeolu B. Application of biological assays to evaluate the aquatic toxicity of a wastewater treatment plant effluent. *SN Applied Sciences*. 2023. Vol. 5. Article 276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05490-w>.
- [35] *Daphnia magna* and *Ceriodaphnia dubia* have similar acute and chronic sensitivity in standard toxicity tests / K. A. Connors et al. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2022. Vol. 41, no. 8. Pp. 1972–1980. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5249>.
- [36] Acute and chronic ecotoxicity of a pharmaceutical effluent on *Daphnia magna* / El Joumani H., Berrebaan I., El Alami M., Naciri M. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2024. Vol. 22, no. 2. Pp. 1159–1170. DOI: https://doi.org/10.15666/aeer/2202_11591170.
- [37] A practical and user-friendly toxicity classification system with microbioassays for natural waters and wastewaters / G. Persoone et al. *Environmental Toxicology*. 2003. Vol. 18, no. 6. Pp. 395–402. DOI: <https://doi.org/10.1002/tox.10141>.
- [38] ДСТУ EN ISO 6341:2022. Якість води. Визначення пригнічення рухливості *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea). Випробування на гостру токсичність (EN ISO 6341:2012, IDT; ISO 6341:2012, IDT). [Чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
- [39] Flushing away the future: the effects of wastewater treatment plants on aquatic invertebrates / D. Enns et al. *Water Research*. 2023. Vol. 243. Article 120388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120388>.
- [40] Delgado C. T., Dombrowski A., Oehlmann J. Assessing the impact of two conventional wastewater treatment plants on small streams with effect-based methods. *PeerJ*. 2024. Vol. 12. Article e17326. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.17326>.
- [41] Temporal and spatial variations in the effect-based ecotoxicological assessment of streams / D. Hof et al. *Environmental Sciences Europe*. 2024. Vol. 36. Article 992. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00992-9>.
- [42] Effect-based trigger values are essential for the uptake of effect-based methods in water safety planning / P. A. Neale. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2023. Vol. 42, no. 4. Pp. 817–826. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5544>.
- [43] Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant with ozonation and different post-treatments using a broad range of in vitro and in vivo bioassays / C. Kienle et al. *Water Research*. 2022. Vol. 212. Article 118084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118084>.
- [44] Application of biological early warning systems in wastewater treatment plants: introducing a promising approach to monitor changing wastewater composition / A. Kizgin et al. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 347. Article 119001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119001>.
- [45] Реконструкція каналізаційних очисних споруд зі збільшенням пропускної потужності на земельній ділянці з кадастровим номером 3221284400:03:001:0027 в адміністративних межах Калинівської територіальної громади

Броварського району Київської області : звіт з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності.
2024.

POLISHING PONDS AS A NECESSARY TECHNOLOGICAL ELEMENT OF WASTEWATER TREATMENT IN THE CASE OF DISCHARGE INTO ENVIRONMENTALLY SENSITIVE WATER BODIES

Kopanytsia O.B.

leading forensic expert of the Laboratory of environmental and ecological research, Kyiv Research institute of forensic expertise of the Ministry of justice of Ukraine; postgraduate student, State scientific institution «Institute of ecological restoration and development of Ukraine», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8939-2919>, e-mail: ecology.expert.2020@gmail.com

The problem of wastewater treatment under modern conditions is becoming increasingly acute due to growing anthropogenic pressure on water bodies, deterioration of wastewater treatment facilities, and stricter environmental regulations. Small rivers and other environmentally sensitive water bodies are particularly vulnerable, as they are characterized by limited assimilative capacity and low self-purification potential. Under such conditions, even formal compliance with discharge standards does not guarantee environmental safety. One of the key technological problems of biological wastewater treatment is the washout of activated sludge from secondary clarifiers. This phenomenon is caused by sludge bulking, hydraulic overloading of treatment facilities, instability of wastewater composition, presence of toxic components, and disturbances in operational regimes. The washout of activated sludge leads to deterioration of effluent quality, increased concentrations of suspended solids, organic matter and nutrients, as well as the discharge of microbial biomass and toxic substances accumulated in sludge into natural water bodies. This paper substantiates the necessity of using polishing ponds as an additional technological element of wastewater treatment systems in cases of discharge into environmentally sensitive water bodies. Polishing ponds are considered as a technological barrier between treatment facilities and natural water bodies, capable of stabilizing effluent quality, retaining washed-out activated sludge, reducing concentrations of organic substances and nutrients, and decreasing effluent toxicity. The main indicators of wastewater quality (BOD, COD, suspended solids, nitrogen and phosphorus compounds, toxicity) and environmental risks associated with the discharge of insufficiently treated wastewater into small rivers are analyzed. Using the example of the wastewater treatment facilities of the municipal enterprise «Brovaryteplovodoenergiya», it is shown that operation of treatment facilities close to regulatory limits creates prerequisites for instability of treatment processes and increases the risk of negative impacts on aquatic ecosystems. It is concluded that for wastewater treatment facilities discharging effluents into small rivers and other environmentally sensitive water bodies, polishing ponds should be considered not as an optional element, but as an integral component of the technological treatment scheme. The conclusions and recommendations formulated in the paper can also be applied to wastewater treatment systems of pulp and paper industry enterprises.

Keywords: bioponds; activated sludge; secondary settling tanks; environmentally sensitive water bodies; biotesting; wastewater; ecosystems.

References

- [1] T. Sam, M. Le Roes-Hill, N. Hoosain, and P. J. Welz, "Strategies for controlling filamentous bulking in activated sludge wastewater treatment plants: the old and the new," *Water*, vol. 14, no. 20, article 3223, 2022. doi: 10.3390/w14203223.
- [2] G. Mustafa, P. Chappell, A. Bate, and K. Ha, "Causes, control, and misconceptions of filamentous bacterial bulking in the aeration tank of the SWTP," *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, vol. 16, no. 1, pp. 21–27, 2023. doi: 10.5281/zenodo.8372342.
- [3] S. Li, L. Wang, B. Liu, L. Wang, X. Zhang, and X. Fei, "Insight into sludge bulking in a full-scale wastewater treatment plant: quorum sensing, microbial community, and metabolic characteristics," *Environmental Technology and Innovation*, vol. 34, article 103562, 2024. doi: 10.1016/j.eti.2024.103562.
- [4] L. Huang et al., "A review of the role of extracellular polymeric substances (EPS) in wastewater treatment systems," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 19, article 12191, 2022. doi: 10.3390/ijerph191912191.
- [5] O. Büttner, J. W. Jawitz, S. Birk, D. Borchardt, "Why wastewater treatment fails to protect stream ecosystems in Europe," *Water Research*, vol. 217, article 118382, 2022. doi: 10.1016/j.watres.2022.118382.
- [6] N. Costa, N. Libardi, and R. Costa, "How can the addition of extracellular polymeric substances (EPS)-based bioflocculant affect aerobic granular sludge (AGS)?," *Journal of Environmental Management*,

- vol. 310, article 114807, 2022. doi: [10.1016/j.jenvman.2022.114807](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114807).
- [7] J. Canals et al., “High-rate activated sludge at very short SRT: key factors for process stability and performance of COD fractions removal,” *Water Research*, vol. 231, article 119610, 2023. doi: [10.1016/j.watres.2023.119610](https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119610).
- [8] M. B. Johnson, and M. Mehrvar, “Waste activated sludge-high rate (WASHR) treatment process: a novel, economically viable, and environmentally sustainable method to co-treat high-strength wastewaters at municipal wastewater treatment plants,” *Bioengineering*, vol. 10, no. 9, article 1017, 2023. doi: [10.3390/bioengineering10091017](https://doi.org/10.3390/bioengineering10091017).
- [9] V. O. Iurchenko, O. H. Melnikova, K. B. Sorokina, N. O. Teliura, “Bulking of activated sludge in the biological treatment of municipal and industrial wastewater, due to the massive development of filamentous bacteria type 021N,” *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, vol. 1254, no. 1, article 012086, 2023. doi: [10.1088/1755-1315/1254/1/012086](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012086).
- [10] S. Kilian, K. Pawęska, and A. Bawiec, “Evaluation of post-treatment after wastewater stabilization ponds at municipal wastewater treatment plant,” *Scientific Reports*, vol. 14, article 22257, 2024. doi: [10.1038/s41598-024-72995-8](https://doi.org/10.1038/s41598-024-72995-8).
- [11] S. Wang, G. Wang, P. Yan, Y. Chen, F. Fang, and J. Guo, “Non-filamentous sludge bulking induced by exopolysaccharide variation in structure and properties during aerobic granulation,” *Science of the Total Environment*, vol. 876, article 162786, 2023. doi: [10.1016/j.scitotenv.2023.162786](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162786).
- [12] G. Tchobanoglous, H. D. Stensel, R. Tsuchihashi, and F. Burton, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery : monograph*, 5th ed., New York : McGraw-Hill Education, 2014. 1848 p.
- [13] V. Kolpakova, K. Ospanov, E. Kuldeyev, and D. Andraha, “Clarification of biologically treated wastewater in a clarifier with suspended sludge layer,” *Water*, vol. 13, no. 18, article 2486, 2021. doi: [10.3390/w13182486](https://doi.org/10.3390/w13182486).
- [14] M. Bubalo, I. Šumelj, K. Herceg, and N. Vukojević Medvidović, “Assessment in treatment efficiency of a small-scale municipal wastewater treatment plant with activated sludge,” *Ochrana Prirody Slovenska/Ekologija*, vol. 41, no. 3, pp. 272–282, 2022. doi: [10.2478/eko-2022-0028](https://doi.org/10.2478/eko-2022-0028).
- [15] T. E. Oladimeji, M. Oyedemi, M. E. Emetere, O. Agboola, J. B. Adeoye, and O. A. Odunlami, “Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies,” *Heliyon*, vol. 10, no. 23, article e40370, 2024. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e40370](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370).
- [16] S. Iyer, S. M. Deshmukh, and R. W. Tapre, “Review on removal of heavy metals from industrial effluents by adsorption,” *Reviews in Inorganic Chemistry*, vol. 45, no. 3, pp. 479–496, 2025. doi: [10.1515/revic-2024-0079](https://doi.org/10.1515/revic-2024-0079).
- [17] P. Vydehi et al. “Aerobic granular sludge-based sustainable wastewater treatment: process, bottlenecks, and knowledge gap through scientometric perspective,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 16, article 100462, 2024. doi: [10.1016/j.hazadv.2024.100462](https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100462).
- [18] S. Mahapatra, S. Tripathy, and R. R. Dash, “Waste stabilization pond (WSP) for wastewater treatment,” *Journal of Environmental Management*, vol. 318, article 114668, 2022. doi: [10.1016/j.jenvman.2022.114668](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114668).
- [19] S. L. dos Santos, and A. van Haandel, “Nutrient removal in sequential batch polishing ponds,” *Water*, vol. 13, no. 11, article 1584, 2021. doi: [10.3390/w13111584](https://doi.org/10.3390/w13111584).
- [20] P. S. Calabrò, D. Pangallo, and D. A. Zema, “Wastewater treatment in lagoons: a systematic review and a meta-analysis,” *Journal of Environmental Management*, vol. 359, article 120974, 2024. doi: [10.1016/j.jenvman.2024.120974](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120974).
- [21] Y. Lian, L. X. Coggins, J. Hay, A. van de Ven, and A. Ghadouani, “Effect of attached growth on treatment performance in waste stabilization ponds,” *Water*, vol. 14, no. 20, article 3245, 2022. doi: [10.3390/w14203245](https://doi.org/10.3390/w14203245).
- [22] M. Marcantel, M. Bappy, and M. Hayes, “Investigating seasonal water quality dynamics in humid subtropical tandem facultative wastewater stabilization ponds,” *Water*, vol. 17, no. 20, article 2936, 2025. doi: [10.3390/w17202936](https://doi.org/10.3390/w17202936).
- [23] J. Sinn, S. Agrawal, L. Orschler, and S. Lackner, “Characterization and evaluation of waste stabilization pond systems in Namibia,” *H2Open Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 365–378, 2022. doi: [10.2166/h2oj.2022.004](https://doi.org/10.2166/h2oj.2022.004).
- [24] I. B. Magalhães et al., “Advancements in high-rate algal pond technology for enhanced wastewater treatment and biomass production: a review,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 66, article 105929, 2024. doi: [10.1016/j.jwpe.2024.105929](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105929).
- [25] *Yakist vody. Vyznachennia biokhimichnoho spozhyvannia kysniu pislia n dib (BSKn). Chastyna 2. Metod dlia nerozvedenykh prob* [Water quality. Determination of biochemical oxygen demand after n days (BODn). Part 2. Method for undiluted samples], DSTU ISO 5815-2:2009, Ukrainian Research Institute of Ecological Problems (UkrNIIEP), Kyiv, Ukraine, July 2011. (Ukr.)
- [26] *Yakist vody. Vyznachennia biokhimichnoho spozhyvannia kysniu pislia n dib (BSKn). Chastyna 1. Metod rozvedenia ta vysuiuvannia z dodavanniam alitiiosechovyny* [Water quality. Determination of biochemical oxygen demand after n days (BODn). Part 1. Dilution and inoculation method with the addition of allylthiourea], State Enterprise «Ukrainian Research and Training Center for Standardization,

- Certification and Quality», Kyiv, Ukraine, Nov. 2025. (Ukr.)
- [27] *Yakist vody. Vyznachannia khimichnoi potreby v kysni* [Water quality. Determination of chemical oxygen demand], DSTU ISO 6060:2003, Technical Committee TC 64, Kyiv, Ukraine, July 2004. (Ukr.)
- [28] *Yakist vody. Vyznachennia vmistu zavyslenykh tverdykh chastynok metodom filtruvannia cherez filtry zi sklovolokna* [Water quality. Determination of suspended solids by filtration through glass fiber filters], DSTU EN 872:2013, Institute of Water Problems and Land Reclamation of the NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, July 2014. (Ukr.)
- [29] *Yakist vody. Vyznachannia amoniiu. Chastyna 1. Ruchnyi spektrometrychnyi metod* [Water quality. Determination of ammonium. Part 1. Manual spectrometric method], DSTU ISO 7150-1:2003, Institute of Water Problems and Land Reclamation of the NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, July 2004. (Ukr.)
- [30] *Yakist vody. Vyznachennia azotu. Chastyna 1. Metod okysnoho zbrodzhuvannia peroksodysulfatom* [Water quality. Determination of nitrogen. Part 1. Peroxodisulfate oxidative fermentation method], DSTU EN ISO 11905-1:2022, State Enterprise «Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality», Kyiv, Ukraine, Dec. 2023. (Ukr.)
- [31] *Yakist vody. Vykorystannia mas-spektrometrii z induktyvno-zv'язanoiu plazmoiu (IZP-MS). Chastyna 2. Vyznachennia 62 elementiv* [Water quality. Use of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Part 2. Determination of 62 elements], DSTU EN ISO 17294-2:2019, State Enterprise «Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality», Kyiv, Ukraine, Sept. 2019. (Ukr.)
- [32] A. Kizgin et al., "Integrating biological early warning systems with high-resolution online chemical monitoring in wastewater treatment plants," *Environmental Science & Technology*, vol. 58, no. 44, pp. 23148–23159, 2024. doi: 10.1021/acs.est.4c07316.
- [33] C. Sanz et al., "Efficient removal of toxicity associated to wastewater treatment plant effluents by enhanced soil aquifer treatment", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 465, article 133377, 2024. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.133377.
- [34] S. Mlonyeni, O. Pereao, and B. Opeolu, "Application of biological assays to evaluate the aquatic toxicity of a wastewater treatment plant effluent," *SN Applied Sciences*, vol. 5, article 276, 2023. doi: 10.1007/s42452-023-05490-w.
- [35] K. A. Connors, J. L. Brill, T. Norberg-King, M. G. Barron, G. Carr, and S. E. Belanger, "Daphnia magna and Ceriodaphnia dubia have similar acute and chronic sensitivity in standard toxicity tests," *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 41, no. 8, pp. 1972–1980, 2022. doi: 10.1002/etc.5249.
- [36] H. El Joumani, I. Berrebaan, M. El Alami, and M. Naciri, "Acute and chronic ecotoxicity of a pharmaceutical effluent on Daphnia magna," *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 22, no. 2, pp. 1159–1170, 2024. doi: 10.15666/aeer/2202_11591170.
- [37] G. Persoone et al., "A practical and user-friendly toxicity classification system with microbiotests for natural waters and wastewaters," *Environmental Toxicology*, vol. 18, no. 6, pp. 395–402, 2003. doi: 10.1002/tox.10141.
- [38] *Yakist vody. Vyznachennia pryhnychennia rukhlyvosti Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea). Vyprobuvannia na hostru toksychnist* [Water quality. Determination of motility inhibition of Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea). Acute toxicity test], DSTU EN ISO 6341:2022, State Enterprise «Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality», Kyiv, Ukraine, Dec. 2023. (Ukr.)
- [39] D. Enns, S. Cunze, N. J. Baker, J. Oehlmann, and J. Jourdan, "Flushing away the future: the effects of wastewater treatment plants on aquatic invertebrates," *Water Research*, vol. 243, article 120388, 2023. doi: 10.1016/j.watres.2023.120388.
- [40] C. T. Delgado, A. Dombrowski, and J. Oehlmann, "Assessing the impact of two conventional wastewater treatment plants on small streams with effect-based methods," *PeerJ*, vol. 12, article e17326, 2024. doi: 10.7717/peerj.17326.
- [41] D. Hof, T. Bing, S. Heß, J. Mayer, J. Oehlmann, and M. Oetken, "Temporal and spatial variations in the effect-based ecotoxicological assessment of streams," *Environmental Sciences Europe*, vol. 36, article 992, 2024. doi: 10.1186/s12302-024-00992-9.
- [42] P. A. Neale, B. I. Escher, M. L. de Baat, J. Enault, and F. D. L. Leusch, "Effect-based trigger values are essential for the uptake of effect-based methods in water safety planning," *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 42, no. 4, pp. 817–826, 2023. doi: 10.1002/etc.5544.
- [43] C. Kienle et al., "Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant with ozonation and different post-treatments using a broad range of in vitro and in vivo bioassays," *Water Research*, vol. 212, article 118084, 2022. doi: 10.1016/j.watres.2022.118084.
- [44] A. Kizgin et al., "Application of biological early warning systems in wastewater treatment plants: introducing a promising approach to monitor changing wastewater composition," *Journal of Environmental Management*, vol. 347, article 119001, 2023. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119001.
- [45] "Rekonstruktsiia kanalizatsiinykh ochysnykh sporud zi zbilshenniam propusknoi potuzhnosti na zemelnii diliantsi z kadaстровым номером 3221284400:03:001:0027 v administratyvnykh mezhakh Kalynivskoi terytorialnoi hromady Brovarskoho raionu Kyivskoi oblasti : zvit z otsinky vplyvu na

dovkillia planovannoi diialnosti” [“Reconstruction of sewage treatment facilities with increased throughput on a land plot with cadastral number 3221284400:03:001:0027 within the administrative boundaries of the Kalynivska territorial community of the Brovary district of the Kyiv region: report on the

assessment of the environmental impact of the planned activity”]. 2024. (Ukr.)

Стаття надійшла 15.01.2026

Стаття прийнята 13.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Копаниця О. Б. Біоставки як необхідний технологічний елемент очищення стічних вод у випадках їх скидання в екологічно чутливі водні об’єкти. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2026. Вип. 53, том 2. С. 117–128. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359942>.

МОДЕЛЬ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ІНТЕГРОВАНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПІДПРИЄМСТВА
(СЕКТОРА) НА ЗАСАДАХ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

Цюман Є.С.	канд. екон. наук, доцент, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9677-4411 , e-mail: y.tsiuman@ntu.edu.ua ;
Глухонець А.О.	канд. техн. наук, доцент, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1183-6722 , e-mail: a.hlukhonets@ntu.edu.ua ;
Цюман С.М.	студент, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1385-6779 , e-mail: mechanicc270108@gmail.com

У статті представлено науково обґрунтовану модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства на засадах циркулярної економіки та сформовано інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу (IDPT). Для оцінки декарбонізаційного потенціалу інтегрованого транспортного підприємства застосовано комбінований підхід, що включає матеріально-потоковий аналіз (MFA), оцінювання життєвого циклу (LCA) та індексні методи. Розрахунки виконуються з урахуванням енергоспоживання, викидів CO₂, замикання ресурсних потоків та технічних параметрів електромобілів, а також глобального енергетичного міксу та екологічних ризиків. Це дозволяє сформуванню інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу (IDPT), що поєднує скорочення викидів, рівень циркулярності та енергоефективність, і забезпечує комплексну оцінку ефективності циркулярної трансформації підприємства. Запропоновано інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу транспортного підприємства, який враховує базові та циркулярні викиди, коефіцієнт ресурсного замикання та показники енергоефективності. Розроблено алгоритм переходу від лінійної до циркулярної моделі функціонування. Модельні розрахунки засвідчили можливість скорочення прямих і непрямих викидів CO₂ на 28–35% за умов часткової електрифікації автопарку та впровадження системи замкненого управління ресурсами. Вперше сформовано комплексну модель кількісного оцінювання декарбонізаційного потенціалу інтегрованого транспортного підприємства, що поєднує показники вуглецевої інтенсивності, циркулярності матеріальних потоків та енергоефективності в єдину систему оцінювання. Результати можуть бути використані транспортними підприємствами для стратегічного планування екологічної трансформації, розроблення програм скорочення викидів та підготовки нефінансової звітності відповідно до європейських вимог сталого розвитку.

Ключові слова: декарбонізаційний потенціал; інтегроване транспортне підприємство; матеріально-потоковий аналіз; вуглецева інтенсивність; замикання ресурсів; екологічна трансформація; електрифікація транспорту.

Постановка проблеми

Глобальна кліматична трансформація зумовлює необхідність системного перегляду підходів до функціонування виробничих і транспортних систем. Транспортний сектор залишається одним із найбільших джерел антропогенних викидів парникових газів, формуючи значну частку вуглецевого навантаження в структурі національних економік. В умовах імплементації положень Європейського зеленого курсу та посилення вимог до нефінансової звітності підприємств питання декарбонізації транспортної діяльності набуває стратегічного значення.

Інтегровані транспортні підприємства змішаного типу (вантажні та пасажирські перевезення, ремонтні підрозділи, склади паливно-мастильних матеріалів, сервісні служби) характеризуються складною структурою матеріальних та енергетичних потоків. Традиційна лінійна модель їх функціонування передбачає високий рівень споживання викопного палива, утворення відходів та значні прямі і непрямі викиди CO₂.

Перехід до циркулярної економіки відкриває можливості для зниження екологічного навантаження шляхом замикання ресурсних потоків, підвищення енергоефективності та електрифікації автопарку. Проте в існуючих дослідженнях недостатньо

розроблені кількісні інструменти комплексного оцінювання декарбонізаційного потенціалу інтегрованих транспортних систем з урахуванням одночасного впливу факторів енергоспоживання, вуглецевої інтенсивності та циркулярності матеріальних ресурсів.

Відсутність інтегрованого показника, який би дозволяв об'єктивно оцінити ефективність екологічної трансформації транспортного підприємства, ускладнює стратегічне планування та впровадження технологій захисту навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблематика декарбонізації транспортного сектору активно досліджується міжнародними науковими школами [1–3]. Значна кількість праць присвячена оцінюванню життєвого циклу транспортних засобів та визначенню вуглецевого сліду перевезень [1, 2, 4]. У роботах обґрунтовано переваги електрифікації автопарків з позицій зменшення прямих викидів CO₂ [5–8]. Разом із тим дослідники наголошують на необхідності врахування енергетичного міксу країни при розрахунках непрямих викидів [6, 9, 10].

Питання циркулярної економіки в транспортній галузі розглядаються в контексті повторного використання компонентів транспортних засобів, рециклінгу

шин та акумуляторів, оптимізації логістичних ланцюгів [11, 12]. У дослідженнях запропоновано показники оцінювання циркулярності матеріальних потоків [13–15], проте вони не інтегруються з показниками вуглецевої інтенсивності [4].

Матеріально-потоковий аналіз (MFA) та оцінювання життєвого циклу (LCA) широко застосовуються для аналізу екологічного впливу виробничих систем [1, 4]. Водночас у транспортному секторі ці методи переважно використовуються ізольовано, без формування інтегрованих індексних моделей [1, 2].

У працях досліджено взаємозв'язок енергоефективності та рівня викидів, що підтверджує необхідність комплексного підходу до оцінювання екологічної ефективності підприємств [16, 17]. Автори наголошують на важливості інтеграції показників сталого розвитку в систему стратегічного управління підприємствами [18–20].

Незважаючи на значну кількість досліджень, більшість із них: зосереджені на окремих видах транспорту; аналізують лише технологічний або лише управлінський аспект; не враховують одночасно циркулярність, енергоефективність та вуглецеву інтенсивність; не формують єдиного кількісного показника декарбонізаційного потенціалу [1, 11, 13, 16, 20].

Аналіз наукових публікацій засвідчив відсутність: універсальної моделі оцінювання декарбонізаційного потенціалу інтегрованого транспортного підприємства; методики інтеграції показників матеріально-потокового аналізу з оцінкою вуглецевої інтенсивності; кількісного алгоритму переходу від лінійної до циркулярної моделі функціонування; інтегрованого індексу, що дозволяє оцінити ефект екологічної трансформації у відсотковому вираженні. Саме ці аспекти потребують подальшого наукового опрацювання.

Мета статті

Розроблення науково обґрунтованої моделі декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства на засадах циркулярної економіки та формування інтегрованого індексу декарбонізаційного потенціалу (IDPT), який забезпечує кількісне оцінювання ефективності екологічної трансформації підприємства.

Матеріали та методи

Для оцінки декарбонізаційного потенціалу інтегрованого транспортного підприємства застосовано комбінований підхід, що включає матеріально-потоковий аналіз (MFA), оцінювання життєвого циклу (LCA) та індексні методи. Розрахунки виконуються з урахуванням енергоспоживання, викидів CO₂, замикання ресурсних потоків та технічних параметрів електромобілів, а також глобального енергетичного міксу та екологічних ризиків. Це дозволяє сформувати інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу (IDPT), що поєднує скорочення викидів, рівень циркулярності та енергоефективність, і забезпечує комплексну оцінку

ефективності циркулярної трансформації підприємства.

Об'єкт дослідження: екологічні процеси функціонування інтегрованого транспортного підприємства змішаного типу, що включає вантажні та пасажирські перевезення, ремонтно-сервісну інфраструктуру, складські підрозділи паливно-мастильних матеріалів та систему поводження з відходами.

Предмет: методичні та кількісні підходи до оцінювання декарбонізаційного потенціалу підприємства, включно з розрахунком базових та скоригованих викидів CO₂, коефіцієнту замикання ресурсів, енергоефективності та формуванням інтегрованого індексу IDPT для оцінки ефективності циркулярної трансформації.

Виклад основного матеріалу

Для забезпечення відтворюваності дослідження сформовано типову модель інтегрованого транспортного підприємства. Параметри зазначено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри, вихідні дані

Назва	Одиниця вимірювання	Показник
вантажні ТЗ (дизельні)	од.	150
автобуси (дизельні)	од.	80
електробуси	од.	10
річний пробіг	млн км	12
споживання дизельного палива	млн л/рік	4,2
споживання електроенергії	ГВт·год/рік	1,8
утворення відпрацьованих мастил	т/рік	180
утворення відпрацьованих шин	т/рік	320
використані акумулятори	т/рік	95

Необхідно зауважити, що базовий період аналізу – 1 рік, для зменшення впливу випадкових коливань використано усереднені нормативні коефіцієнти викидів відповідно до міжнародних методик розрахунку парникових газів.

Для розрахунку загальних базових викидів (E_{base}) використовуємо формулу:

$$E_{base} = Es1 + Es2, \quad (1)$$

де: Es – обсяг викидів CO₂ відповідно до спожитих ресурсів, які використовувалися енергоустановками на обраних транспортних засобах:

$$Es = Fr \times EF_r, \quad (2)$$

де: Fr – обсяг спожитого ресурсу (F_d – дизельне паливо або F_e – електроенергії), л, кВт*год.

EF_r – коефіцієнт викидів CO₂ відповідно використаному ресурсу, кг CO₂ /л або кг CO₂ /кВт*год.

При виконанні матеріально-потокового аналізу запропоновано здійснювати оцінювання ресурсної циркулярності відповідно до балансу матеріальних потоків (I):

$$I = P + W + \Delta S, \quad (3)$$

де: I – загальний вхід ресурсів; P – продуктивне використання; W – відходи;

ΔS – зміна запасів.

Окрім того, доречним є розрахунок коефіцієнт замикавання ресурсів (Cr):

$$Cr = \frac{R}{W}, \quad (4)$$

де, відповідно, R – обсяг повторно використаних (вторинні ресурси) ресурсів; W – загальний обсяг відходів.

Моделлю циркулярної трансформації передбачено, що відбудеться електрифікація 20% парку вантажних ТЗ та здійснено перехід 30% автобусів на гібридну модель енергоустановок. Окрім того, розглянуто можливість рециклінгу 70% шин, регенерації 60% мастил та впровадження системи повторного використання акумуляторів (50%).

Відповідно, після впровадження зазначених заходів, змін доречно визначити обсяги скоригованих викидів (E_{circ}).

Таким чином, маючи дані про обсяги загальних базових викидів, скоригованих, знаючи коефіцієнт замикавання та розрахувавши коефіцієнт енергоефективності (E_f – відношення зниження енергоємності до базового рівня), можливим стає розрахунок інтегрованого показника – Індексу декарбонізаційного потенціалу (IDPT):

$$IDPT = \frac{(E_{base} - E_{circ})}{E_{base}} \times Cr \times E_f. \quad (5)$$

Необхідно зауважити, що IDPT варіюється в межах 0–1 та характеризує рівень екологічної трансформації підприємства.

З метою забезпечення валідності дослідження використовуються нормативні коефіцієнти викидів, що застосовуються у міжнародній практиці; проведено трикратну ітерацію розрахунків для перевірки стабільності результатів; здійснено регресійний аналіз залежності між рівнем електрифікації та скороченням викидів; обчислено коефіцієнт детермінації для підтвердження статистичної достовірності та виконано аналіз чутливості моделі до зміни ключових параметрів ($\pm 10\%$).

Доречно зауважити, що запропонована модель має певні обмеження дослідження. По-перше, модель базується на типовому підприємстві, по-друге, не враховується ланцюг постачання, а також, відповідно, результати залежать від структури енергетичного міксу країни.

Отже, відповідно до зазначеної методики вхідним даним для розрахунків маємо наступні результати:

Обсяг викидів (для дизельного палива):

$$Es1 = F_d \times EF_d = 4,200 \times 2,68 = 11,256 \text{ т CO}_2/\text{рік}$$

Обсяг викидів (електроенергія):

$$Es2 = F_e \times EF_e = 1,800 \times 0,40 = 720 \text{ т CO}_2/\text{рік}$$

Відповідно, обсяги загальних базових викидів:

$$E_{base} = Es1 + Es2 = 11,256 + 720 = 11,976 \text{ т CO}_2/\text{рік}$$

Розрахунок після циркулярної трансформації,

зменшення споживання дизелю, а саме: електрифікація 20% вантажного парку, перехід на гібридну модель 30% автобусів та зменшення пробігу на 8% за рахунок оптимізації логістики. Обираємо загальне скорочення споживання дизельного пального, $\Delta F_d, 32\%$.

Отже, новий обсяг складає:

$$F_d^{circ} = 4,200 \times 0,68 = 2,856 \text{ млн.л.}$$

Відповідно, скоригований обсяг викидів:

$$F_{S1}^{circ} = 2,856 \times 2,68 = 7,651 \text{ т CO}_2/\text{рік.}$$

Результати розрахунків після зміни споживання електроенергії:

$$F_{S2}^{circ} = 2,450 \times 0,40 = 980 \text{ т CO}_2/\text{рік.}$$

Отже, обсяг загальних викидів після трансформації:

$$E_{circ} = 7,651 + 980 = 8,631 \text{ т CO}_2/\text{рік.}$$

Таким чином, загальний ефект скорочення обсягів викидів, декарбонізації (ΔE) склав майже 30%, а саме 27,9% (3,345 т CO₂) (рис. 1, табл. 2).

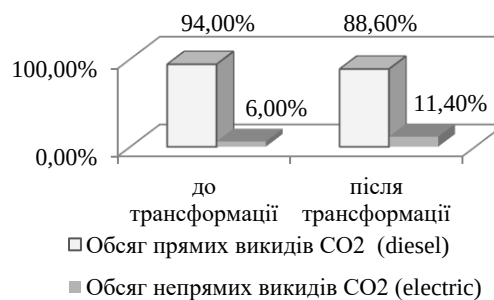


Рис. 1 – Питова вага викидів CO₂: до трансформації; після трансформації

Таблиця 2

Порівняння показників лінійно та циркулярної моделей

Назва показника	Лінійна модель	Циркулярна модель	Зміни, %
Обсяг прямих викидів CO ₂ , т	11256	7 651	-32
Обсяг непрямих викидів CO ₂ , т	720	980	+36
Обсяг загальних викидів CO ₂ , т	11976	8631	-27,9
Коефіцієнт замикавання	0,25	0,60	+140
Енергоємність	1,00	0,88	-12

При обранні коефіцієнту замикавання ресурсів враховувалось, що до впровадження трансформацій рівень рециклінгу був на рівні 25%, після – рециклінг шин збільшено до 70%, мастила – до 60%, акумуляторів – до 50%. Отже, середньозважений коефіцієнт, $Cr = 0,60$. Коефіцієнт енергоефективності (зменшення енергоємності перевезень) обираємо $E_f = 0,88$.

Маючи всі необхідні вхідні (базові) та відкориговані дані стає можливим здійснити розрахунок IDPT:

$$IDPT = \frac{(11,976 - 8,631)}{11,976} \times 0,60 \times 0,88 = 0,147.$$

Відповідно здійсненим розрахункам отримали IDPT на рівні 0,15, що відповідає середньому рівню декарбонізаційного потенціалу підприємства, засвідчивши значні резерви подальшої екологічної трансформації.

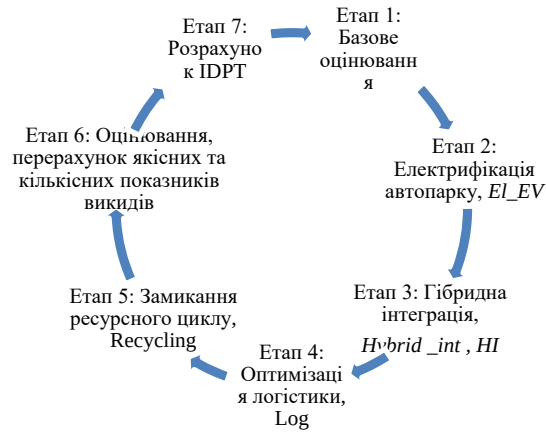


Рис. 2 – Алгоритм переходу до циркулярної моделі (для досягнення сталого розвитку)

В результаті здійсненого дослідження сформовано універсальну модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства, що поєднує матеріально-потоковий аналіз, оцінювання життєвого циклу та індексний підхід (рисунки 2 та 3). Було визначено, що базові викиди CO₂ для типової моделі автотранспортного підприємства – 11976 т CO₂ /рік, з яких 94% припадає на прямі викиди, викиди від ТЗ з дизельними енергоустановками. Обґрунтовано сценарій циркуляційної трансформації, яким передбачено електрифікацію частини автопарку та впровадження гібридних технологій, оптимізацію логістичних маршрутів та впровадження замкнених циклів, рециклінг шин, мастил, акумуляторів та ін. Розраховано коефіцієнт замикавання ресурсів, який збільшується з 0,25 до 0,60 та коефіцієнт енергоефективності 0,88. Здійснені розрахунки засвідчили, що впровадження запропонованої моделі забезпечує скорочення загальних викидів до 8 631 т CO₂/рік, зменшивши їх до 27,9% від базового, дотрансформаційного, рівня. Окрім того, доведено статистичну стабільність моделі за результатами аналізу чутливості (відхилення не перевищує ±6 % при зміні ключових параметрів на ±10 %).

Отже, в цілому, обґрунтовано доречність формування та застосування інтегрованого індексу декарбонізаційного потенціалу, який поєднує зміну обсягів викидів, рівень циркулярності та енергоефективність у єдину систему.

Результати та їх обговорення

Отримані результати узгоджуються з міжнародними дослідженнями, які демонструють потенціал

скорочення викидів у транспортному секторі на рівні 20–35% при частковій електрифікації автопарків [3–5]. На відміну від існуючих підходів, де електрифікація розглядається ізольовано [19, 20], запропонована модель інтегрує циркулярність матеріальних потоків, що підсилює екологічний ефект [6, 8].

Збільшення викидів після електрифікації підтверджує висновки досліджень щодо залежності декарбонізаційного ефекту від енергетичного міксу країни [17, 18]. Проте загальний баланс демонструє позитивну тенденцію скорочення викидів завдяки значному зменшенню прямих викидів.

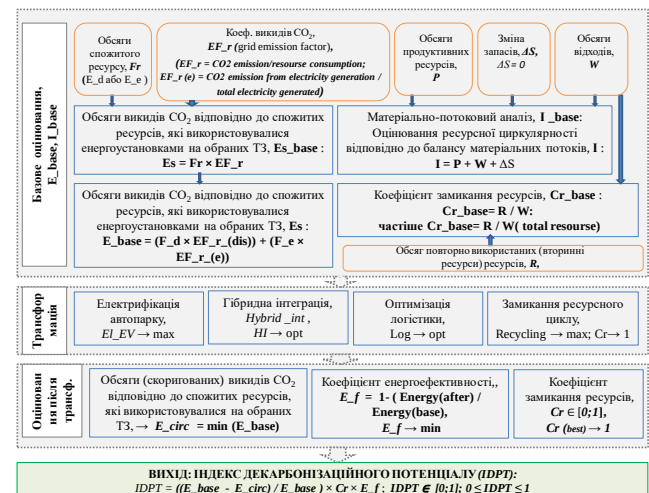


Рис. 3 – Модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства (сектора) на засадах циркулярної економіки

Отримане значення IDPT = 0,15 свідчить, що підприємство перебуває на початковому–середньому етапі декарбонізаційної трансформації. Це корелює з результатами досліджень щодо поетапного впровадження циркулярних стратегій у транспортному секторі [6, 8, 9].

Важливим є встановлення синергетичного ефекту: одночасне впровадження електрифікації, логістичної оптимізації та замикавання ресурсів забезпечує більший результат, ніж застосування окремих заходів. Такий висновок підтримує концепції інтегрованого екологічного управління підприємствами [7, 15, 16].

Таким чином, висунута в розділі постановки проблеми гіпотеза про можливість формування універсального індексу декарбонізаційного потенціалу підтверджена.

Висновки

Запропоновано модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства, що базується на принципах циркулярної економіки та поєднує матеріально-потоковий аналіз, оцінювання життєвого циклу та індексний підхід.

Визначено, що базові викиди типового підприємства становлять 11 976 т CO₂/рік, основну частку яких формують прямі викиди від споживання дизельного палива.

Обґрунтовано сценарій циркулярної трансформації, який забезпечує скорочення загальних викидів на 27,9%.

Розроблено інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу (IDPT), що дозволяє кількісно оцінювати ефективність екологічної трансформації підприємства.

Доведено, що поєднання електрифікації, підвищення енергоефективності та замикання ресурсних потоків формує синергетичний ефект зниження вуглецевого навантаження.

Запропонований підхід може використовуватися для стратегічного планування декарбонізації транспортних підприємств та формування екологічної політики.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з урахуванням викидів ланцюгів постачання, інтеграцією цифрових систем моніторингу та адаптацією моделі до різних галузевих типів транспортних систем.

Перелік використаних джерел

- [1] Systematic review of life cycle assessments on carbon emissions in the transportation system / Zhang W., Li Y., Li H., Liu S. *Environmental Impact Assessment Review*. 2024. Vol. 109. Article 107618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107618>.
- [2] Liu F., Shafique M., Luo X. Literature review on life cycle assessment of transportation alternative fuels. *Environmental Technology & Innovation*. 2023. Vol. 32. Article 103343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103343>.
- [3] Negri M., Bieker G. Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union: A 2025 update and key factors to consider. *International Council on Clean Transportation*. 2025. URL: <https://theicct.org/publication/electric-cars-life-cycle-analysis-emissions-europe-jul25/> (дата звернення: 18.10.2025).
- [4] Hauschild M. Z., Rosenbaum R. K., Olsen S. I. Life cycle assessment: Theory and practice. Springer, 2018. 1216 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>.
- [5] Bieker G. A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. *International Council on Clean Transportation*. 2022. URL: <https://theicct.org/a-global-comparison-of-life-cycle-ghg-emissions-from-passenger-cars/> (дата звернення: 18.10.2025).
- [6] Net emission reductions from electric vehicles and heat pumps in 59 world regions / F. Knobloch et al. *Nature Sustainability*. 2020. Vol. 3. Pp. 437–447. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>.
- [7] Helmers E., Marx P. Electric cars: technical characteristics and environmental impacts. *Environmental Sciences Europe*. 2021. Vol. 33. Article 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-14>.
- [8] Koniak M., Jaskowska P., Tomczuk K. Review of economic, technical and environmental aspects of electric vehicles. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16229849>.
- [9] World energy transitions outlook 2023. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2023. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2023.pdf (дата звернення: 19.10.2025).
- [10] Global EV outlook 2024: Securing the future of electric mobility. Paris : International Energy Agency, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (дата звернення: 19.10.2026).
- [11] Achieving a framework of the circular economy in urban transport infrastructure projects / X. Liu et al. *Frontiers in Sustainable Cities*. 2024. Vol. 5. Article 1475155. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1475155>.
- [12] Nagy G., Szentesi S. Collaborative logistics: An innovative strategy to address future logistics challenges. *Advanced Logistics System – Theory and Practice*. 2024. Vol. 18, no. 3. Pp. 83–95. DOI: <https://doi.org/10.32971/als.2024.031>.
- [13] A taxonomy of circular economy indicators / M. Saidani et al. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 207. Pp. 542–559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>.
- [14] Kristensen H. S., Mosgaard M. A. A review of micro-level indicators for a circular economy. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 243. Article 118531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531>.
- [15] Desing H., Braun G., Hischer R. Resource pressure – A circular design method. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 164. Article 105179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105179>.
- [16] Li J., Irfan M., Samad S. The relationship between energy consumption, CO₂ emissions, economic growth, and health indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20, no. 3. Article 2325. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20032325>.
- [17] Li R. K., Fang L., Wang Q. The impact of energy efficiency on carbon emissions. *Energy Economics*. 2022. Vol. 108. Article 105890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103880>.
- [18] Цюман Є. С. Державно-приватне партнерство як механізм забезпечення сталого розвитку для відновлення країни. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2023. № 1(490). С. 227–234. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).27](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).27).
- [19] Менеджмент організації: теоретичні основи та інноваційні підходи до управління / Ігнатюк В. В.,

Навроцька Т. А., Гончар Т. М., Цюман Є. С. *Актуальні питання економічних наук*. 2025. № 7. С. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14759520>.

Research & Social Science. 2018. Vol. 65. Article 101476. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.07.007>.

- [20] Sovacool B. K., Axsen J., Sorrell S. Promoting novelty, rigor, and style in energy social science. *Energy*

MODEL OF DECARBONIZATION OF AN INTEGRATED TRANSPORT ENTERPRISE (SECTOR) BASED ON CIRCULAR ECONOMY PRINCIPLES

Tsiuman Y.S.	PhD (Economic Sciences), associate professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9677-4411 , e-mail: y.tsiuman@ntu.edu.ua ;
Hlukhonets A.O.	PhD (Engineering), associate professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1183-6722 , e-mail: a.hlukhonets@ntu.edu.ua ;
Tsiuman S.M.	student, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1385-6779 , e-mail: mechanicc270108@gmail.com

The study aims to develop a scientifically grounded model of decarbonization of an integrated transport enterprise based on circular economy principles and to introduce an index of decarbonization potential. To assess the decarbonization potential of an integrated transport enterprise, a combined approach was applied, including material flow analysis (MFA), life cycle assessment (LCA), and index-based methods. Calculations were performed considering energy consumption, CO₂ emissions, the degree of resource loop closure, and the technical parameters of electric vehicles, as well as the global energy mix and environmental risks. This approach enables the formation of an integrated decarbonization potential index (IDPT), which combines emission reductions, circularity level, and energy efficiency, providing a comprehensive assessment of the effectiveness of the enterprise's circular transformation. An integrated index of decarbonization potential of a transport enterprise is proposed. The index combines baseline and circular emissions, resource circularity coefficient, and energy efficiency parameters. The developed transition algorithm from a linear to a circular operational model demonstrates a potential reduction of direct and indirect CO₂ emissions by 28–35 % under partial fleet electrification and closed-loop resource management implementation. For the first time, a comprehensive quantitative assessment model of decarbonization potential for an integrated transport enterprise has been developed, integrating carbon intensity, material circularity, and energy efficiency into a unified evaluation system. The results can be used by transport enterprises for environmental transformation planning, emission reduction programs, and sustainability reporting preparation in accordance with European standards.

Keywords: decarbonization potential; integrated transport enterprise; material flow analysis; carbon intensity; resource circularity; environmental transformation; fleet electrification.

References

- [1] W. Zhang, Y. Li, H. Li, and S. Liu, "Systematic review of life cycle assessments on carbon emissions in the transportation system," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 109, article 107618, 2024. doi: [10.1016/j.eiar.2024.107618](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107618).
- [2] F. Liu, M. Shafique, and X. Luo, "Literature review on life cycle assessment of transportation alternative fuels," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 32, article 103343, 2023. doi: [10.1016/j.eti.2023.103343](https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103343).
- [3] M. Negri, and G. Bieker, Life-cycle Greenhouse Gas Emissions From Passenger Cars in the European Union: A 2025 Update and Key Factors to Consider. 2025. [Online]. Available: <https://theicct.org/publication/electric-cars-life-cycle-analysis-emissions-europe-jul25/>. Accessed on: October 18, 2025.
- [4] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, and S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham, Switzerland: Springer, 2018. doi: [10.1007/978-3-319-56475-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3).
- [5] G. Bieker, A Global Comparison of the Life-cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars. 2022. [Online]. Available: <https://theicct.org/a-global-comparison-of-life-cycle-ghg-emissions-from-passenger-cars/>. Accessed on: October 18, 2025.
- [6] F. Knobloch et al., "Net emission reductions from electric vehicles and heat pumps in 59 world regions," *Nature Sustainability*, vol. 3, pp. 437–447, 2020. doi: [10.1038/s41893-020-0488-7](https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7).
- [7] E. Helmers, and P. Marx, "Electric cars: technical characteristics and environmental impacts," *Environmental Sciences Europe*, vol. 33, no. 7, 2021. doi: [10.1186/2190-4715-24-14](https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-14).
- [8] M. Koniak, P. Jaskowsks, and K. Tomczuk, "Review of economic, technical and environmental aspects of electric vehicles," *Sustainability*, vol. 16, no. 22, 2024. doi: [10.3390/su16229849](https://doi.org/10.3390/su16229849).

- [9] International Renewable Energy Agency, World Energy Transitions Outlook 2023. 2023. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2023.pdf. Accessed on: October 19, 2025.
- [10] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2024: Securing the Future of Electric Mobility*. Paris, France: IEA, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Accessed on: October 19, 2025.
- [11] X. Liu, D. Schraven, W. Ma, M. de Jong, and M. Hertogh, "Achieving a framework of the circular economy in urban transport infrastructure projects," *Frontiers in Sustainable Cities*, vol. 5, article 1475155, 2024. doi: **10.3389/frsus.2024.1475155**.
- [12] G. Nagy, and S. Szentesi, "Collaborative logistics: An innovative strategy to address future logistics challenges," *Advanced Logistics System – Theory and Practice*, vol. 18, no. 3, pp. 83–95, 2024, doi: 10.32971/als.2024.031.
- [13] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, and A. Kendall, "A taxonomy of circular economy indicators," *Journal of Cleaner Production*, vol. 207, pp. 542–559, 2019. doi: **10.1016/j.jclepro.2018.10.014**.
- [14] H. S. Kristensen, and M. A. Mosgaard, "A review of micro-level indicators for a circular economy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 243, article 118531, 2020. doi: **10.1016/j.jclepro.2019.118531**.
- [15] H. Desing, G. Braun, and R. Hischier, "Resource pressure – A circular design method," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, article 105179, 2021. doi: **10.1016/j.resconrec.2020.105179**.
- [16] J. Li, M. Irfan, and S. Samad, "The relationship between energy consumption, CO₂ emissions, economic growth, and health indicators," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 3, article 2325, 2023. doi: **10.3390/ijerph20032325**.
- [17] R. K. Li, L. Fang, and Q. Wang, "The impact of energy efficiency on carbon emissions," *Energy Economics* vol. 108, article 105890, 2022. doi: **10.1016/j.scs.2022.103880**.
- [18] Ye. S. Tsiuman, "Derzhavno-pryvatne partnerstvo yak mekhanizm zabezpechennia staloho rozvytku dlia vidnovlennia krainy" ["Public-private partnership as a mechanism providing sustainable development for the recovery of the country"], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablobuduvannia imeni admiral Makarova – Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, № 1(490), pp. 227–234, 2023. doi: **10.15589/znp2023.1(490).27**. (Ukr.)
- [19] V. Ihnatiuk, T. Navrotska, T. Honchar, and Y. Tsiuman, "Menedzhment orhanizatsii: teoretychni osnovy ta innovatsiini pidkhody do upravlinnia" ["Management of the organization: theoretical foundations and innovative approaches to management"], *Aktualni pytannia ekonomichnykh nauk – Current issues of economic sciences*, № 7, pp. 1–19, 2025. doi: **10.5281/zenodo.14759520**.
- [20] B. K. Sovacool, J. Axsen, and S. Sorrell, "Promoting novelty, rigor, and style in energy social science," *Energy Research & Social Science*, vol. 65, article 101476, 2018. doi: **10.1016/j.erss.2018.07.007**.

Стаття надійшла 12.01.2026

Стаття прийнята 18.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Цюман Є. С., Глухонець А. О., Цюман С. М. Модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства (сектора) на засадах циркулярної економіки. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 129–135. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359943>.

**ТЕХНОЛОГІЯ КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ АНТРОПОГЕННОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ
ЕКОСИСТЕМ ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕРИТОРІЙ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНДЕКСУ ФАУНІСТИЧНОЇ СХОЖОСТІ****Барабаш О.В.***д-р техн. наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-5206-2922>, e-mail: barabashelena29@gmail.com;***Тарасюк М.В.***аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID:
<https://orcid.org/0009-0005-5544-0278>, e-mail: nikolaytarasuik@gmail.com*

Метою дослідження є розроблення та апробація інтегрованої технології оцінювання екологічного стану територій природно-заповідного фонду на основі таксономічного аналізу угруповань земноводних і плазунів як індикаторних груп біоти. Запропонований підхід орієнтований на формування інструментального механізму екологічного моніторингу та обґрунтування технологічних рішень щодо захисту й відновлення природних екосистем. Об'єктом дослідження є угруповання амфібій та рептилій природоохоронної території, предметом – технологічні методи оцінювання їх структурних і просторових характеристик у контексті впливу антропогенних чинників. Методологічну основу становить комплексна технологія, що поєднує маршрутні польові обстеження, дистанційне зондування території, акустичний моніторинг періоду розмноження амфібій та статистичну обробку даних із застосуванням індексу фауністичної схожості Серенсона та кластерного аналізу. Такий підхід дозволяє здійснювати кількісну диференціацію біоценозів за ступенем трансформації, визначати порогові значення показників схожості та формувати критерії екологічної стабільності територій. Технологія передбачає послідовні етапи: збір первинних даних, цифрову обробку інформації, розрахунок індикаторних показників, класифікацію біотопів за рівнем екологічного ризику та формування рекомендацій щодо природоохоронних заходів. У результаті дослідження встановлено закономірності просторового розподілу видів амфібій і рептилій у різних типах екосистем, визначено рівень подібності угруповань та виявлено ділянки з підвищеною чутливістю до антропогенного навантаження. Отримані кількісні параметри дозволяють використовувати таксономічну структуру індикаторних груп як технологічний критерій оцінювання стану природних територій та прогнозування їх відновлювальної спроможності. Наукова новизна полягає у розробленні інтегрованої технології екологічного оцінювання природоохоронних територій із використанням індексних методів кількісного аналізу біорізноманіття, удосконаленні підходу до визначення ступеня антропогенної трансформації екосистем та встановленні порогових значень індикаторних показників для прийняття природоохоронних рішень. Практичне значення полягає у можливості впровадження запропонованої технології в систему екологічного моніторингу об'єктів природно-заповідного фонду з метою підвищення ефективності заходів із захисту та відновлення екосистем, мінімізації екологічних ризиків і забезпечення сталого функціонування природних комплексів.

Ключові слова: природно-заповідний фонд; екологічний моніторинг; екосистеми; біорізноманіття; антропогенний вплив.

Постановка проблеми

Цінним та унікальним природним екосистемним об'єктом Українських Карпат є Національний природний парк «Синьогора». Тваринні та рослинні угруповання, які населяють його територію, відзначаються значним біологічним різноманіттям, тому їх збереження та раціональна охорона є важливим завданням. Таксономічний склад тварин, що мешкають у Парку, є одним з основних індикаторів забезпечення та підтримки екологічної рівноваги. В умовах зростаючого антропогенного навантаження виникає необхідність не лише дослідження таксономічної структури угруповань, а й розроблення ефективних технологічних підходів до оцінювання їх стану з метою своєчасного виявлення екологічних змін. Використання сучасних методів моніторингу дозволяє сформувати інструментальну основу для прийняття природоохоронних рішень та підвищення ефективності заходів із захисту екосистем. Тому дослідження таксономічного складу тваринних угруповань НПП «Синьогора» зумовлене

необхідністю удосконалення технологій моніторингу та кількісного оцінювання стану екосистем природно-заповідного фонду.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасних дослідженнях простежується чіткий перехід від суто описових біологічних обліків до інтегрованих технологій екологічного моніторингу, які поєднують інструментальні методи збору даних, цифрову обробку сигналів та зображень, а також кількісні індикатори, які забезпечують генерування вихідної інформації для кількісного оцінювання стану екосистем і визначення ступеня їх антропогенної трансформації. Дослідження свідчать, що пасивний акустичний моніторинг (РАМ) із використанням автономних реєстраторів (ARU) та автоматизованого розпізнавання сигналів, зокрема амфібій, забезпечують масштабування територій проведення обстежень та зниження трудомісткості польових робіт. Водночас, зазначається важливість перевірки отриманих даних і стандартизації

методик їх аналізу [1-3]. Значного розвитку також отримали підходи дистанційного зондування та просторового моделювання (ENM/SDM). Останні дослідження підтверджують, що такі підходи забезпечують перехід від локальних спостережень до просторового моделювання, оцінювання змін і зонування охоронних територій за рівнем екологічної вразливості. У дослідженнях гірських природоохоронних територій показано, що інтеграція часових рядів супутникових змінних із польовими даними дозволяє отримувати просторово-часові оцінки стану біорізноманіття та виявляти ділянки зі зниженням придатності середовищ існування, що є технологічно важливим для раннього попередження деградаційних процесів [4-6]. Огляди застосування технологій біомоніторингу в природоохоронних територіях, зокрема eDNA, підкреслюють її придатність для виявлення видів, порівняння ділянок і формування доказової бази для охорони біоти, одночасно акцентуючи на потребі стандартизації відбору проб та інтерпретації результатів [7-9]. У контексті обробки та узагальнення моніторингових даних дедалі ширше застосовують індексні та багатовимірні метрики для перетворення складних масивів спостережень у зрозумілі кількісні критерії, які можна використовувати в процесі порівняння стану екосистем і відстеження змін у часі [10, 11]. У сучасних роботах також звертають увагу, що показники фауністичної схожості, зокрема індекс Серенсона, для порівняння угруповань потребують коректного моделювання парних порівнянь та просторових закономірностей при інтерпретації схожості угруповань [12, 13]. Разом з тим аналіз літературних джерел свідчить, що більшість досліджень зосереджена або на фауністичних описах, або на окремих методах моніторингу, без їх комплексного поєднання в єдину систему оцінювання. Недостатню увагу приділено розробленню інтегрованих підходів, які б поєднували інструментальні методи збору інформації з кількісними критеріями аналізу та дозволяли здійснювати диференціацію територій за ступенем екологічної стабільності. Особливо це стосується природоохоронних територій гірських регіонів, де екосистеми характеризуються високою чутливістю до антропогенних впливів. Таким чином, актуальним є формування комплексного підходу до оцінювання таксономічної структури угруповань із використанням сучасних технологій моніторингу та кількісних індикаторів, що дозволить підвищити об'єктивність оцінювання стану екосистем та обґрунтувати природоохоронні заходи.

Мета статті

Метою статті є аналіз поширення просторової диференціації та ступеня схожості угруповань земноводних і плазунів НПП «Синьогора» з використанням інтегрованих методів моніторингу для кількісного оцінювання стану екосистем природоохоронної території.

Виклад основного матеріалу

Таксономічний склад тварин є важливим індикатором стану екосистеми. Зміни в чисельності та різноманітті видів свідчать про екологічні зміни, які можуть бути спричинені як природними, так і антропогенними факторами [14, 15]. У НПП «Синьогора» спостерігається зростаючий тиск на природні ресурси, що викликано розвитком туризму, сільського господарства та інших видів діяльності. Тому важливо проводити регулярний моніторинг таксономічного складу тварин, щоб вчасно виявляти негативні тенденції та розробляти заходи для їх усунення.

Сучасні технології оцінювання таксономічного складу тварин стали невід'ємною частиною екологічних досліджень. Використання новітніх методів, таких як ДНК-баркодинг, дистанційне зондування, акустичний моніторинг та інші, дозволяє отримувати точні дані про видове різноманіття. Ці технології не лише підвищують ефективність збору даних, але й зменшують вплив на навколишнє середовище, що є особливо важливим у природоохоронних зонах [16].

Оптимізація моніторингових досліджень є необхідною умовою для забезпечення їхньої ефективності та результативності. Впровадження інтегрованих підходів, що поєднують різні методи оцінювання, дозволяє отримати більш повну картину стану тваринних угруповань. Крім того, важливо враховувати сезонні та місцеві фактори, які можуть впливати на результати моніторингу [17]. Регулярний аналіз отриманих даних дозволяє вчасно коригувати стратегії управління природними ресурсами.

На території Національного природного парку «Синьогора» виявлено 10 видів земноводних, які належать до 2 рядів, 4 родин і 7 родів та 7 видів плазунів, які входять до 5 родин і 7 родів (табл. 1).

Ряд *Caudata* представлений на території Парку: *S. salamandra*, *L. vulgaris*, *L. montandoni*, *I. alpestris*. Вид *S. Salamandra* належить до рідкісної фауни і занесений до Червоної книги України. Поширення виду в межах парку має типовий для Українських Карпат характер. Вид тягнє до вологих листяних лісів, вздовж потоків, із вертикальним поширенням до 1500 м, піднімається до верхньої межі лісу. У малих водоймах вздовж доріг, тимчасових малих водоймах, заболочених канавах вздовж доріг виявлені *L. vulgaris*, *L. montandoni*, *I. alpestris*. Не піднімається вище 700 м над рівнем моря *L. vulgaris*, а *L. montandoni*, *I. alpestris* більш толерантні до коливання висоти над рівнем моря. Поширення останніх двох видів в межах парку має специфічний характер: чисельність *I. alpestris* знижується із збільшенням висоти над рівнем моря, а чисельність *L. montandoni* зберігається сталою для малопротічних водойм до висоти 1600 м н.р.м.

Ряд *Anura* на території Парку представлений 6 видами. З родини *Ranidae* поширені 3 види: *R. temporaria*, *R. arvalis*, *P. esculentus*. Ці види амфібій є мешканцями переважно вологих біотопів долин річок, стоячих та

малопротічних водойм, із поодинокими знахідками в листяних вологих букових лісах. Вид *B. bufo* зустрічається поодиноким по всій території Парку, може підніматись до зони криволісся, зустрічається на полонинах. *B. bombina* поширена вздовж основного русла р.

Бистриця Солотвинська до висоти 730 м н.р.м. Вид *B. variegata*, не зважаючи на високий природоохоронний статус, зустрічається в тимчасових стоячих водоймах по всій території Парку до висоти 1650 м над рівнем моря.

Таблиця 1

Таксономічний склад земноводних та плазунів у різних типах угруповань Національного природного парку «Синьогора»

Таксономічний склад земноводних							
	Види земноводних	Ecosystem Group					
		Ліси	Луки	Агроценози (пасовища, сіножаті)	Урбоценоз (стаціонарна рекреація, господарська зона)	Водойми (озера, ставки)	Береги р.Бистриці Солотвинської та долини її приток
1	<i>Salamandra salamandra</i> *	+	—	—	—	—	++
2	<i>Lissotriton vulgaris</i>	—	—	—	—	++	—
3	<i>Lissotriton montandoni</i> *	—	—	—	—	++	—
4	<i>Ichthyosaura alpestris</i> *	—	—	—	—	++	—
5	<i>Bombina variegata</i>	+	—	—	+	++	+
6	<i>Bombina bombina</i>	—	—	—	—	+	++
7	<i>Bufo bufo</i>	+	++	++	++	—	+
8	<i>Rana temporaria</i>	++	++	—	+	—	+
9	<i>Rana arvalis</i>	++	++	+	—	—	+
10	<i>Pelophylax esculentus</i>	+	—	—	—	+++	+
	Разом видів	6	3	2	3	6	7
Таксономічний склад плазунів							
	Види плазунів	Ecosystem Group					
		Ліси	Луки	Агроценози	Урбоценози	Водойми	Береги р.Бистриці Солотвинської та долини її приток
1	<i>Anguis fragilis</i>	++	++	+	+	—	++
2	<i>Lacerta agilis</i>	+++	+++	++	++	—	++
3	<i>Zootoca vivipara</i>	+	+	—	—	—	+
4	<i>Natrix natrix</i>	++	++	+	+	—	++
5	<i>Coronella austriaca</i> *	+	—	—	+	—	—
6	<i>Zamenis longissimus</i> *	+	—	—	—	—	—
7	<i>Vipera berus</i>	++	++	+	+	—	++
	Разом видів плазунів	7	5	4	5	—	5
Умовні позначення: * - види занесені до Червоної книги України. В таблиці використано бальні оцінки відносної чисельності видів: + – вид рідкісний (реєструється звичайно лише під час окремих екскурсій та обліків); ++ – вид звичайний (реєструється регулярно, під час кожної екскурсії та обліку); +++ – вид чисельний (характерний для угруповання і реєструється під час кожного обліку)							

L. agilis та *V. berus* поширені по всій території Парку від долини р. Бистриця до кам'яних розсіпів високогір'я. *C. austriaca* та *Z. longissimus* зустрічаються рідко і тяжіють до мішаних лісів із домінуванням *Fagus sylvatica*. В свою чергу, *N. natrix*, *Z. vivipara* та *A. fragilis* приурочені до вологих стацій і найчастіше спостерігаються в долинах річок.

За домінантною структурою, в результаті спостережень маршрутним методом, найбільш поширеними плазунами Парку є *L. agilis*, *N. natrix* і *A. fragilis*. Менш поширеними видами є *V. berus* та *Z. vivipara*. Найбільш рідкісними видами Парку є *C. austriaca* і *Z. longissimus*, які реєструвались одноразово під час маршрутних спостережень.

Проаналізуємо схожість угруповань на підставі розрахунку показника фауністичної схожості Серенсона.

Цей показник дає змогу визначити часту видів, спільних для угруповань за формулою (1):

$$S = \frac{2C}{(A+B)}, \quad (1)$$

де *A* – число видів в першому угрупованні; *B* – число видів у другому угрупованні, *C* – кількість спільних видів для обох угруповань.

За умови $S > 0,5$ видове різноманіття угруповань схоже, при $S < 0,5$ – воно істотно відрізняється. Розрахунки представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Ступінь схожості угруповань земноводних та плазунів за показником схожості Серенсона

Ecosystem Group	Ліси	Луки	Агроценози	Урбоценози	Водойми	Береги р.Бистриці Солотвинської та долини її приток
Ліс	X	0,83	0,73	0,83	0,00	0,83
Луки	0,67	X	0,89	0,80	0,00	1,00
Агроценози	0,50	0,80	X	0,89	0,00	0,89
Урбоценози	0,67	0,67	0,40	X	0,00	0,80
Водойми	0,33	0,00	0,00	0,22	X	0,00
Береги р.Бистриці Солотвинської та долини її приток	0,92	0,60	0,44	0,60	0,46	X
Умовні позначення:						
– ступінь схожості угруповань земноводних;						
– ступінь схожості угруповань плазунів.						

Аналізуючи ступінь схожості угруповань земноводних дійшли висновку, що серед вивчених біоценозів найбільш схожими у видовому складі батрахофауни виявились близькі у просторовому відношенні біоценози (вологі ліси та береги р. Бистриці Солотвинської та долини її приток) як не порушені ділянки з помірим зволоженням. Угруповання плазунів характеризуються схожістю видового складу у не порушених ділянках (луки та береги р. Бистриці Солотвинської та долини її приток). Слід зазначити, що схожість видового складу плазунів також спостерігається у порушених ділянках (урбоценози – агроценози) з не порушеними (луки). Отримані результати підтверджують те, що до складу урбоценозів Парку входить комплекс біотопів, які можуть в деяких відношеннях відповідати структурі не порушених територій Парку. Окрім цього велику роль відіграють безперешкодність міграційних процесів в межах Парку, завдяки яким і зберігається батрахо- та герпетофауна.

Висновки

Таким чином, запропонований підхід дозволяє здійснювати кількісне оцінювання ступеня антропогенної трансформації екосистем НПП «Синьогора» на основі індексу фауністичної схожості та інтегрованих методів моніторингу. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення системи екологічного моніторингу природоохоронних територій та підвищення об'єктивності оцінювання їх екологічного стану.

Результати дослідження можуть стати основою для впровадження нових методів моніторингу, підвищення екологічної свідомості серед стейкхолдерів, що дасть змогу розробити практичні заходи та ефективну стратегію збереження природних ресурсів і екосистем НПП «Синьогора».

Перелік використаних джерел

- [1] Lassandro M., Bolitho L., Newell D. A systematic review of Passive Acoustic Monitoring for anuran conservation. *Bioacoustics*. 2025. Vol. 34, no. 5. Pp. 579–628. DOI: <https://doi.org/10.1080/09524622.2025.2518486>.
- [2] Software Tools for Passive Acoustic Monitoring in Aquatic and Terrestrial Bio- and Ecoacoustics: A Living Systematic Review / T. Hanf-Dressler et al. *F1000Research*. 2026. Vol. 15. Article 48. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.173495.1>.
- [3] Martins F. C., Segurado P., Marques J. T. Acoustic detection and occupancy models: A systematic review with insights for future monitoring programs. *Ecological Indicators*. 2025. Vol. 179. Article 114081. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114081>.
- [4] Аналіз сучасного стану лісових ресурсів у контексті сталого розвитку / І. Г. Пацева та ін. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2023. Vol. 4. No. 493. Pp. 205–211. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).27](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).27).
- [5] Assessing spatial and temporal trends over time in potential species richness using satellite time-series and ecological niche models / N. Garcia et al. *Biodiversity and Conservation*. 2024. Vol. 34, no. 2. Pp. 429–446. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-024-02979-7>.
- [6] Time-series niche modelling reveals declining tendencies of habitat suitability and ecological functions in a mountainous protected area / I. Freitas et al. *Environmental Management*. 2026. Vol. 76, no. 3. Article 101. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-026-02393-5>.
- [7] Pascher K., Švara V., Jungmeier M. Environmental DNA-Based Methods in Biodiversity Monitoring of Protected Areas: application range, limitations, and needs. *Diversity*. 2022. Vol. 14, no. 6. Article 463. DOI: <https://doi.org/10.3390/d14060463>.
- [8] The Realisation of Sustainable Development Goals Through the Implementation of International Environmental Projects with the Implementation of Transport Infrastructure Solutions / Barabash O., Khrutba O.,

- Pokshevnytska T., Tarasiuk M. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. Vol. 1335. Pp. 14–28. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_2.
- [9] Five recommendations to fill the blank space in indicators at local and short-term scales / K. Hébert et al. *Biological Conservation*. 2025. Vol. 302. Article 111007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111007>.
- [10] A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives / S. Chidiac et al. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2023. Vol. 22, no. 2. Pp. 349–395. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>.
- [11] Composite environmental indices – a case of rickety rankings / S.M. Stevens et al. *PeerJ*. 2023. Vol. 11. Article e16325. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.16325>.
- [12] Navigating the spatial and temporal aspects of beta diversity to clarify understanding biodiversity change / J. Heino et al. *Global Ecology and Conservation*. 2024. Vol. 56. Article e03343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03343>.
- [13] He S., Qin C., Soininen J. A flexible framework to assess patterns and drivers of beta diversity across spatial scales. *Ecography*. 2023. Vol. 46, no. 11. Article e06901. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.06901>.
- [14] Aquatic ecosystem indices, linking ecosystem health to human health risks / De Carvalho F. G., Loyau A., Kelly-Irving M., Schmeller D. S. *Biodiversity and Conservation*. 2025. Vol. 34. Pp. 723–767. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-025-03010-3>.
- [15] Insects as bioindicator: A hidden gem for environmental monitoring / S. Chowdhury et al. *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. Article 1146052. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1146052>.
- [16] A technological biodiversity monitoring toolkit for biocredits / H. V. Ford et al. *Journal of Applied Ecology*. 2024. Vol. 61, iss. 9. Pp. 2007–2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14725>.
- [17] A conceptual framework for biodiversity monitoring programs in conservation areas / D. T. Dalton et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 8. Article 6779. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15086779>.

TECHNOLOGY FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF ECOSYSTEMS IN PROTECTED AREAS USING THE FAUNISTIC SIMILARITY INDEX

Barabash O.V. D.Sc. (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5206-2922>, e-mail: barabashelena29@gmail.com;

Tarasiuk M.V. Postgraduate student, National Transport University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5544-0278>, e-mail: nikolaytarasuik@gmail.com

The purpose of the study is to develop and test an integrated technology for assessing the ecological condition of protected areas based on the taxonomic analysis of amphibian and reptile communities as indicator groups of biota. The proposed approach is aimed at creating an instrumental mechanism for environmental monitoring and substantiating technological solutions for the protection and restoration of natural ecosystems. The object of the study is the communities of amphibians and reptiles inhabiting a protected area, while the subject is the technological methods for assessing their structural and spatial characteristics in the context of anthropogenic impact. The methodological basis of the research is a comprehensive technology that combines route-based field surveys, remote sensing of the territory, acoustic monitoring of the amphibian breeding period, and statistical data processing using the Sørensen faunistic similarity index and cluster analysis. This approach enables quantitative differentiation of biocenoses according to the degree of transformation, determination of threshold values of similarity indicators, and formation of criteria for ecological stability of territories. The technology includes sequential stages: collection of primary data, digital processing of information, calculation of indicator indices, classification of biotopes according to the level of ecological risk, and development of recommendations for environmental protection measures. The results of the study reveal patterns in the spatial distribution of amphibian and reptile species across different ecosystem types, determine the level of similarity of communities, and identify areas with increased sensitivity to anthropogenic pressure. The obtained quantitative parameters make it possible to use the taxonomic structure of indicator groups as a technological criterion for assessing the condition of natural territories and predicting their restoration capacity. The scientific novelty of the research lies in the development of an integrated technology for environmental assessment of protected areas using index-based methods for quantitative biodiversity analysis, improving the approach to determining the degree of anthropogenic transformation of ecosystems, and establishing threshold values of indicator indices for environmental decision-making. The practical significance of the study lies in the possibility of implementing the proposed technology in the environmental monitoring system of protected areas in order to increase the effectiveness of ecosystem protection and restoration measures, minimize environmental risks, and ensure the sustainable functioning of natural complexes.

Keywords: protected areas; environmental monitoring; ecosystems; biodiversity; anthropogenic impact.

References

- [1] M. Lassandro, L. Bolitho, and D. Newell, "A systematic review of Passive Acoustic Monitoring for anuran conservation," *Bioacoustics*, vol. 34, no. 5, pp. 579–628, 2025. doi: [10.1080/09524622.2025.2518486](https://doi.org/10.1080/09524622.2025.2518486).
- [2] T. Hanf-Dressler, R. Nouioua, K. Thomisch, D. Cazau, S. De Selys Longchamps, and K. F. Darras, "Software Tools for Passive Acoustic Monitoring in Aquatic and Terrestrial Bio- and Ecoacoustics: A Living Systematic Review," *F1000Research*, vol. 15, article 48, 2026. doi: [10.12688/f1000research.173495.1](https://doi.org/10.12688/f1000research.173495.1).
- [3] F. C. Martins, P. Segurado, and J. T. Marques, "Acoustic detection and occupancy models: A systematic review with insights for future monitoring programs," *Ecological Indicators*, vol. 179, article 114081, 2025. doi: [10.1016/j.ecolind.2025.114081](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114081).
- [4] I. H. Patseva, O. V. Barabash, V. V. Melnyk-Shamrai, V. I. Shamrai, and I. S. Patsev, "Analiz suchasnoho stanu lisovykh resursiv u konteksti staloho rozvytku" ["Analysis of the current state of forest resources in the context of sustainable development"], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablobuduvannia imeni admiral Makarova – Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, vol. 4, no. 493, pp. 205–211, 2023. doi: [10.15589/znpp2023.4\(493\).27](https://doi.org/10.15589/znpp2023.4(493).27). (Ukr.)
- [5] N. Garcia et al., "Assessing spatial and temporal trends over time in potential species richness using satellite time-series and ecological niche models," *Biodiversity and Conservation*, vol. 34, no. 2, pp. 429–446, 2024. doi: [10.1007/s10531-024-02979-7](https://doi.org/10.1007/s10531-024-02979-7).
- [6] I. Freitas et al., "Time-series niche modelling reveals declining tendencies of habitat suitability and ecological functions in a mountainous protected area," *Environmental Management*, vol. 76, no. 3, article 101, 2026. doi: [10.1007/s00267-026-02393-5](https://doi.org/10.1007/s00267-026-02393-5).
- [7] K. Pascher, V. Švara, and M. Jungmeier, "Environmental DNA-Based Methods in Biodiversity Monitoring of Protected Areas: application range, limitations, and needs," *Diversity*, vol. 14, no. 6, article 463, 2022. doi: [10.3390/d14060463](https://doi.org/10.3390/d14060463).
- [8] O. Barabash, O. Khrutba, T. Pokshevnytska, and M. Tarasiuk, "The Realisation of Sustainable Development Goals Through the Implementation of International Environmental Projects with the Implementation of Transport Infrastructure Solutions," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1335, pp. 14–28, 2025. doi: [10.1007/978-3-031-87376-8_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_2).
- [9] K. Hébert, M. Jousse, J. Serrano, D. N. Karger, F. G. Blanchet, L. J. Pollock, "Five recommendations to fill the blank space in indicators at local and short-term scales," *Biological Conservation*, vol. 302, article 111007, 2025. doi: [10.1016/j.biocon.2025.111007](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111007).
- [10] S. Chidiac, P. El Najjar, N. Ouaini, Y. El Rayess, and D. El Azzi, "A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives," *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 349–395, 2023. doi: [10.1007/s11157-023-09650-7](https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7).
- [11] S. M. Stevens, M. K. Joy, W. Abrahamse, T. L. Milfont, and L. M. Petherick, "Composite environmental indices – a case of rickety rankings," *PeerJ*, vol. 11, article e16325, 2023. doi: [10.7717/peerj.16325](https://doi.org/10.7717/peerj.16325).
- [12] J. Heino, L. M. Bini, J. García-Girón, F. M. Lansac-Tôha, M. Lindholm, R. J. Rolls, "Navigating the spatial and temporal aspects of beta diversity to clarify understanding biodiversity change," *Global Ecology and Conservation*, vol. 56, article e03343, 2024. doi: [10.1016/j.gecco.2024.e03343](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03343).
- [13] S. He, C. Qin, and J. Soininen, "A flexible framework to assess patterns and drivers of beta diversity across spatial scales," *Ecography*, vol. 46, no. 11, article e06901, 2023. doi: [10.1111/ecog.06901](https://doi.org/10.1111/ecog.06901).
- [14] F. G. De Carvalho, A. Loyau, M. Kelly-Irving, and D. S. Schmeller, "Aquatic ecosystem indices, linking ecosystem health to human health risks," *Biodiversity and Conservation*, vol. 34, pp. 723–767, 2025. doi: [10.1007/s10531-025-03010-3](https://doi.org/10.1007/s10531-025-03010-3).
- [15] S. Chowdhury et al., "Insects as bioindicator: A hidden gem for environmental monitoring," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 11, article 1146052, 2023. doi: [10.3389/fenvs.2023.1146052](https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1146052).
- [16] H. V. Ford et al., "A technological biodiversity monitoring toolkit for biocredits," *Journal of Applied Ecology*, vol. 61, iss. 9, pp. 2007–2019, 2024. doi: [10.1111/1365-2664.14725](https://doi.org/10.1111/1365-2664.14725).
- [17] D. T. Dalton et al., "A conceptual framework for biodiversity monitoring programs in conservation areas," *Sustainability*, vol. 15, no. 8, article 6779, 2023. doi: [10.3390/su15086779](https://doi.org/10.3390/su15086779).

Стаття надійшла 02.01.2026

Стаття прийнята 05.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Барабаш О. В., Тарасюк М. В. Технологія кількісного оцінювання антропогенної трансформації екосистем природоохоронних територій із застосуванням індексу фауністичної схожості. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 136–141. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359945>.

РОЛЬ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ У ЗБЕРЕЖЕННІ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННІ СТАЛОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕКОСИСТЕМ УКРАЇНИ

Дичко А.О.

д-р техн. наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4632-3203>, e-mail: a.dychko@ntu.edu.ua;

Єрмаков В.М.

д-р техн. наук, доцент, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4548-235X>, e-mail: ntn@i.ua

У статті досліджено роль природно-заповідного фонду у збереженні та підтриманні екологічної рівноваги природних систем України. Розглянуто значення природоохоронних територій як основного інструменту охорони довкілля в умовах зростаючого антропогенного впливу та трансформації природних екосистем. Проаналізовано сучасний стан розвитку природно-заповідного фонду України та динаміку частки заповідних територій у структурі території країни у період з 2022 по 2024 роки. Встановлено, що поступове збільшення площ природоохоронних територій свідчить про розвиток національної системи збереження природних ресурсів, однак темпи розширення заповідного фонду залишаються відносно невисокими. У статті розглянуто основні структурні елементи екологічної мережі, зокрема природні ядра, екологічні коридори та буферні зони, що сприяють збереженню природних комплексів і забезпечують міграцію видів, а також значення природно-заповідного фонду, екологічної мережі та інших природоохоронних територій у забезпеченні сталого розвитку. Проаналізовано значення інтеграції природоохоронних територій України до міжнародних природоохоронних систем, зокрема Пан'європейської екологічної мережі, Смарагдової мережі та Світової мережі біосферних резерватів ЮНЕСКО. Визначено, що ефективне функціонування природно-заповідного фонду неможливе без здійснення екологічного моніторингу, який дозволяє оцінювати стан природних екосистем, виявляти негативні зміни та формувати науково обґрунтовані управлінські рішення у сфері охорони довкілля. Наголошено, що розвиток природно-заповідного фонду, формування екологічної та Смарагдової мережі, а також інтеграція України до міжнародних природоохоронних ініціатив сприяють досягненню Цілей сталого розвитку, зокрема Цілі 15 «Захист та відновлення екосистем суші», та забезпечують збереження природного середовища для майбутніх поколінь.

Ключові слова: природно-заповідний фонд; сталий розвиток; екологічний моніторинг; екосистеми; біорізноманіття; антропогенний вплив.

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується значним зростанням антропогенного впливу на природне середовище. Інтенсивне використання природних ресурсів, урбанізація, розвиток промисловості та сільського господарства призводять до деградації природних екосистем, втрати біорізноманіття та погіршення стану довкілля. У зв'язку з цим особливого значення набуває формування ефективної системи охорони природи, ключовим елементом якої є природно-заповідний фонд. Охоронювані природні території відіграють важливу роль у збереженні природних ландшафтів, підтриманні екологічної рівноваги та забезпеченні екологічної безпеки. Функціонування заповідного фонду сприяє охороні унікальних природних комплексів, збереженню рідкісних видів рослин і тварин, а також підтриманню стабільності екосистем.

Водночас ефективне управління заповідними територіями неможливе без систематичного екологічного моніторингу, який дозволяє оцінювати стан природного середовища, виявляти негативні зміни та розробляти заходи для їх запобігання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання збереження природно-заповідного фонду та ролі заповідних територій у збереженні

біорізноманіття активно досліджується в сучасній науковій літературі. Дослідження останніх років свідчать, що природоохоронні території є основним інструментом збереження природних екосистем та підтримання екологічної рівноваги. Зокрема, зазначається, що створення та ефективне управління природоохоронними територіями сприяє збереженню біорізноманіття, підтриманню екосистемних послуг та зменшенню негативного впливу антропогенних факторів [1]. У сучасних публікаціях значна увага також приділяється оцінці ефективності природоохоронних територій та їх ролі у досягненні глобальних цілей охорони природи [2].

У низці наукових праць розглядається результативність діяльності заповідних територій та їх значення для збереження природних комплексів. Дослідники відзначають, що природоохоронні території здатні суттєво зменшувати темпи деградації екосистем і втрати біорізноманіття. Водночас рівень їх природоохоронної ефективності значною мірою залежить від якості управління, належного фінансування та контролю антропогенного навантаження [3]. Крім того, сучасні дослідження підкреслюють важливість інтеграції природоохоронних територій у ширші екологічні мережі та системи сталого управління природними ресурсами [4].

Разом з тим, незважаючи на значну кількість наукових досліджень у цій сфері, окремі аспекти

функціонування природно-заповідного фонду, зокрема його роль у забезпеченні екологічної безпеки та підвищенні стійкості природних екосистем до антропогенних впливів, залишаються недостатньо вивченими. У зв'язку з цим у даній статті здійснюється аналіз ролі природно-заповідного фонду у збереженні біорізноманіття та підтриманні екологічної рівноваги природних систем.

Мета статті

Мета статті полягає у дослідженні ролі природно-заповідного фонду у збереженні біорізноманіття та підтриманні екологічної рівноваги природних систем, а також у визначенні його значення для забезпечення сталого функціонування екосистем в умовах зростаючого антропогенного навантаження.

Виклад основного матеріалу

Природно-заповідний фонд України (ПЗФ) є системою територій та об'єктів, що мають особливу природоохоронну, наукову, рекреаційну та естетичну цінність і перебувають під охороною держави. До складу

ПЗФ входять природні та біосферні заповідники, національні природні парки, заказники, пам'ятки природи, регіональні ландшафтні парки та інші категорії природоохоронних територій. Основною метою їх функціонування є збереження типових і унікальних природних комплексів, підтримання біорізноманіття та забезпечення стабільності природних екосистем.

Станом на початок 2024 року до складу ПЗФ входило 9002 території та об'єкти загальною площею близько 4,18 млн га, що становить 6,93 % площі території України. Динаміка розвитку ПЗФ свідчить про поступове збільшення частки заповідних територій: у 2021 році вона становила 6,82 %, у 2022 році – 6,91 %, у 2023 році – 6,93 %, а у 2024 році – 6,94 % території країни. Протягом 2023 року було створено 119 нових територій природно-заповідного фонду загальною площею понад 13,6 тис. га, а також розширено межі окремих існуючих об'єктів. У 2024 році було створено 88 нових об'єктів ПЗФ загальною площею близько 2937 га [5], що свідчить про прогрес формування природоохоронної мережі, хоча темпи її розширення залишаються відносно невисокими (рис. 1).

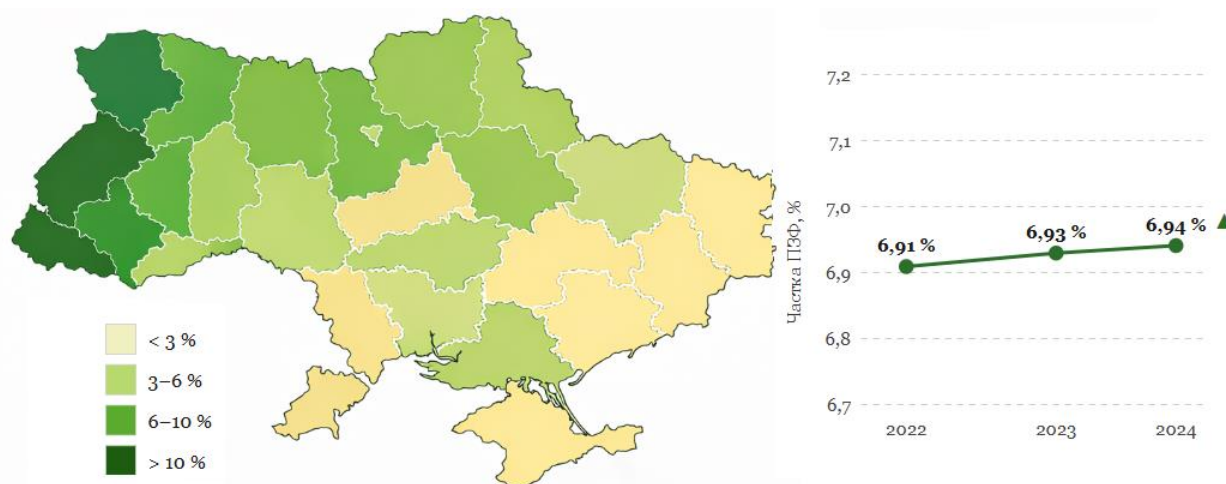


Рис. 1 – Просторовий розподіл та динаміка частки територій природно-заповідного фонду України (2022–2024 рр.)

Поряд із розвитком ПЗФ важливим інструментом збереження природних екосистем є формування екологічної мережі. В Україні екомережа формується на регіональному рівні та охоплює всі області країни, створюючи просторово пов'язану систему природних територій. Екомережа покликана забезпечити збереження біологічного та ландшафтного різноманіття, підтримання природних процесів і стабільності екосистем. Структура екологічної мережі включає ключові природні території – ядра, які представлені насамперед об'єктами ПЗФ та іншими цінними природними комплексами. Між ними формуються екологічні коридори для просторового зв'язку природних територій і

забезпечення умов для міграції видів та обміну генетичним матеріалом.

Важливим елементом також є буферні зони, які виконують захисну функцію з метою зниження рівня антропогенного впливу на природні ядра та сприяння стабільності природних екосистем. Регіональні екологічні мережі, сформовані на рівні окремих областей, у сукупності утворюють загальнодержавну екологічну мережу України. Її формування спрямоване на поєднання природних територій у єдину просторову систему для збереження біологічного та ландшафтного різноманіття, підтримання природних екологічних процесів та підвищення стійкості природних екосистем (рис. 2).

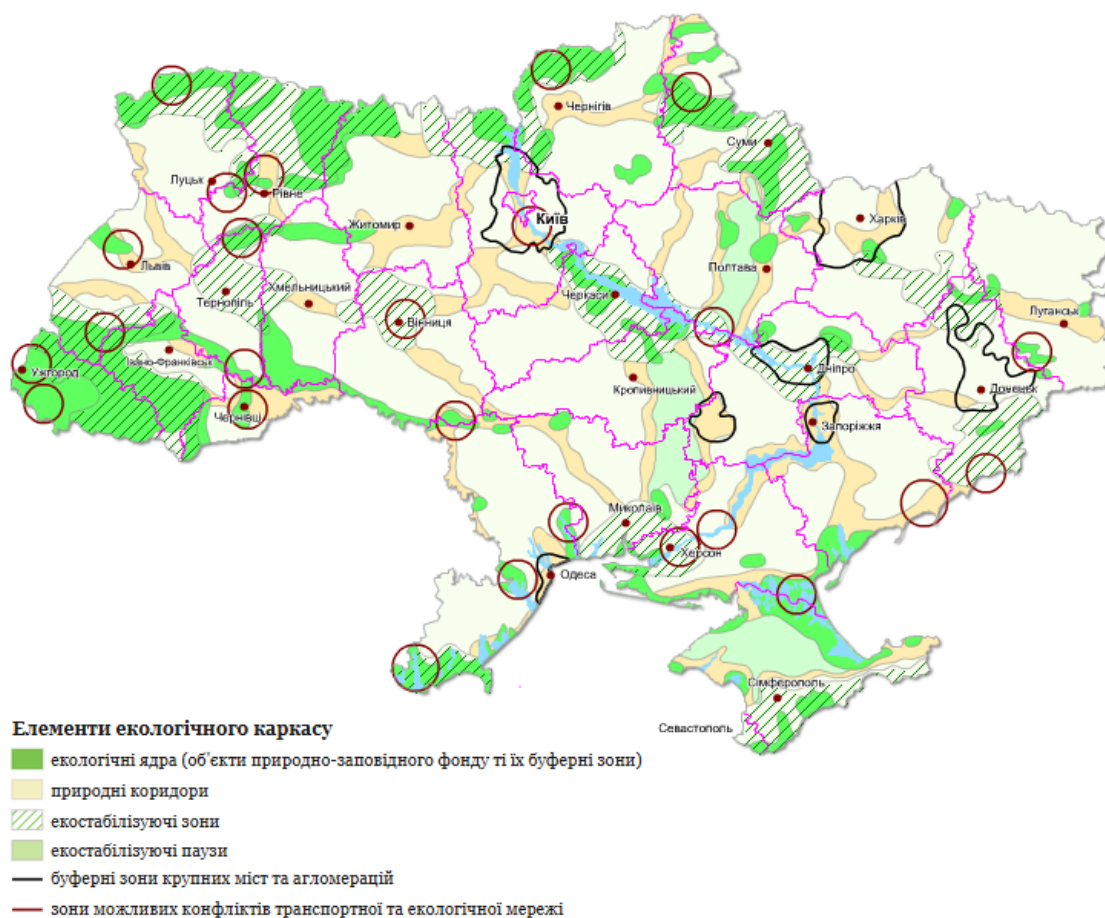


Рис. 2 – Національна екологічна мережа [7]

На національному рівні екологічна мережа України інтегрується у ширшу систему міжнародної природоохоронної співпраці, зокрема у Пан'європейську екологічну мережу, яка об'єднує природні території різних країн Європи. Така інтеграція сприяє збереженню природних комплексів у межах значних природних регіонів, забезпечує міграцію видів та підтримує екологічну цілісність природних ландшафтів на континентальному рівні [6].

Важливим елементом збереження природного різноманіття на міжнародному рівні є формування Смарагдової мережі, яка є частиною Пан'європейської екологічної мережі та охоплює території особливої природоохоронної цінності. Смарагдова мережа формується у країнах, що є сторонами Бернської конвенції, і спрямована на збереження рідкісних та зникаючих видів флори і фауни, а також природних оселищ, що мають міжнародне значення. В Україні формування Смарагдової мережі розглядається як важливий етап інтеграції національної природоохоронної системи до європейського природоохоронного простору. Території Смарагдової мережі охоплюють природні комплекси,

які відповідають критеріям Бернської конвенції та відіграють важливу роль у збереженні біорізноманіття. Значна частина таких територій збігається або частково перекривається з об'єктами ПЗФ, що підсилює їх природоохоронне значення [8].

Важливе значення для збереження природних екосистем мають території, що входять до Світової мережі біосферних резерватів ЮНЕСКО (рис. 3). Вони виконують функцію міжнародних природоохоронних територій, де поєднуються завдання охорони біорізноманіття та проведення наукових досліджень [9, 10].

Попри важливу роль природно-заповідного фонду та інших природоохоронних територій у збереженні біологічного та ландшафтного різноманіття, їх функціонування відбувається в умовах зростаючого антропогенного впливу. Інтенсивне використання природних ресурсів, розвиток промисловості, урбанізація, транспортна інфраструктура, сільськогосподарська діяльність та інші види господарської діяльності призводять до трансформації природних ландшафтів, деградації екосистем і зменшення біорізноманіття [11].

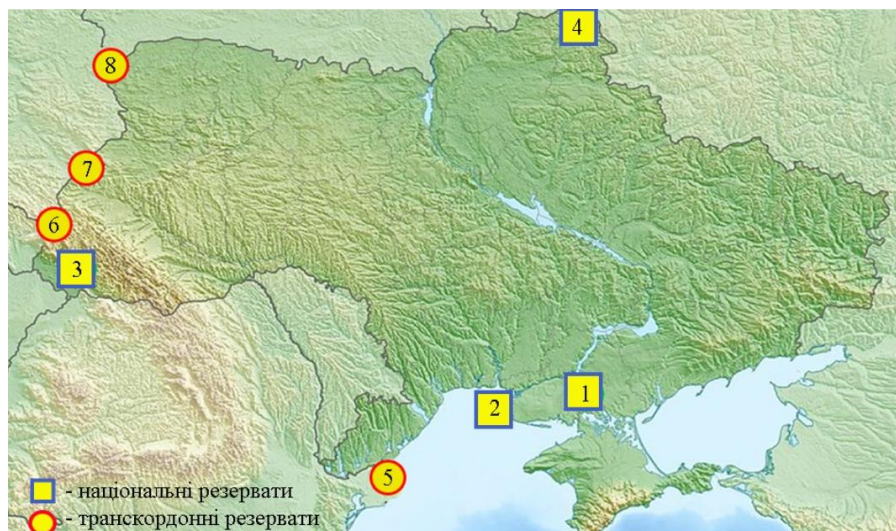


Рис. 3 – Національна мережа біосферних резерватів ЮНЕСКО України [10]

Антропогенний вплив може проявлятися у фрагментації природних територій, порушенні гідрологічного режиму, забрудненні ґрунтів, водних ресурсів і атмосферного повітря, а також у зміні структури природних угруповань [12]. Навіть у межах природоохоронних територій негативні наслідки господарської діяльності можуть проявлятися опосередковано через вплив прилеглих територій та загальні екологічні зміни у регіоні.

У зв'язку з цим особливого значення набуває систематичне спостереження за станом природних екосистем та оцінка змін, що відбуваються під впливом

природних і антропогенних факторів [13]. Саме екологічний моніторинг дозволяє оцінювати зміни у природних екосистемах, виявляти негативні впливи антропогенних факторів та своєчасно приймати управлінські рішення щодо збереження природних ресурсів. Систематичний екологічний моніторинг природоохоронних територій забезпечує отримання достовірної інформації про стан екосистем, динаміку біорізноманіття та рівень антропогенного навантаження. Це, у свою чергу, створює наукове підґрунтя для розроблення ефективних заходів щодо охорони довкілля та підтримання сталого функціонування природних систем (рис. 4).

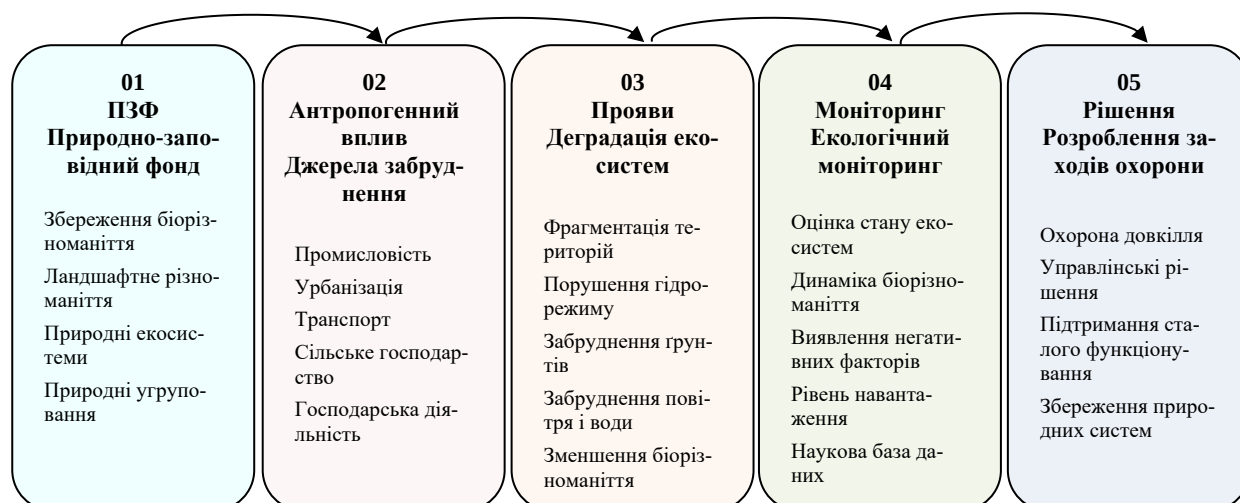


Рис. 4 – Концептуальна схема взаємозв'язку антропогенного впливу, деградації екосистем, екологічного моніторингу та природоохоронних управлінських рішень

У сукупності природно-заповідний фонд, екологічна мережа, території Смарагдової мережі та інші природоохоронні об'єкти формують основу системи збереження природного середовища в Україні. Їх

функціонування спрямоване на збереження біологічного та ландшафтного різноманіття, підтримання екологічної рівноваги та забезпечення стабільності природних екосистем. Водночас зростаючий антропогенний

вплив на природні території зумовлює необхідність постійного спостереження за станом довкілля та впровадження ефективної системи екологічного моніторингу.

Реалізація таких природоохоронних заходів безпосередньо пов'язана з досягненням Цілей сталого

розвитку [15], зокрема Цілі 15 «Захист та відновлення екосистем суші», яка передбачає збереження біорізноманіття, раціональне використання природних ресурсів та відновлення деградованих екосистем (рис. 5).



Рис. 5 – Структура системи збереження природного середовища України та її відповідність Цілі 15 сталого розвитку

Отже, розвиток природно-заповідного фонду, формування екологічної та Смарагдової мережі та інших природоохоронних територій, а також здійснення систематичного екологічного моніторингу сприяють реалізації принципів сталого розвитку та забезпечують інтеграцію природоохоронної політики України у загальноєвропейський екологічний простір.

Висновки

За результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки.

1. Природно-заповідний фонд України є важливою складовою системи охорони довкілля. Його території сприяють збереженню природних екосистем,

біологічного та ландшафтного різноманіття, а також підтриманню екологічної рівноваги.

2. Формування екологічної мережі забезпечує поєднання окремих природоохоронних територій у єдину систему. Такий підхід дозволяє зберігати природні комплекси, підтримувати природні процеси та створювати умови для переміщення і поширення видів.

3. Україна також бере участь у міжнародних природоохоронних ініціативах. Зокрема, формуються території Смарагдової мережі та функціонують біосферні резервати в межах програми ЮНЕСКО «Людина і біосфера», що сприяє включенню українських природних територій до міжнародних екологічних мереж.

4. Разом з тим природні екосистеми зазнають значного впливу господарської діяльності людини. Це

зумовлює потребу у постійному спостереженні за станом природного середовища та оцінці змін, що відбуваються у природних системах.

5. Систематичний екологічний моніторинг дозволяє отримувати інформацію про стан екосистем і своєчасно виявляти негативні зміни. Його проведення є важливим для ефективного управління природоохоронними територіями та реалізації цілей сталого розвитку.

Перелік використаних джерел

- [1] Network-based restoration strategies maximize ecosystem recovery / Bhatia U., Dubey S., Gouhier T. C., Ganguly A. R. *Communications biology*. 2023. Vol. 6. Article 1256. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05622-3>.
- [2] Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines / J. Geldmann et al. *Biological Conservation*. 2013. Vol. 161. Pp. 230–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.02.018>.
- [3] Local biodiversity is higher inside than outside terrestrial protected areas worldwide / C. L. Gray et al. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. Article 12306. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms12306>.
- [4] User's manual for the Jo-METT / S. Stolton et al. IUCN, 2025. URL: https://iucn.org/sites/default/files/2025-10/jomett_english_final_version_7oct2025.pdf (дата звернення 02.12.2025)
- [5] Державна служба статистики України. Частка площі територій та об'єктів природно-заповідного фонду в загальній території країни. Індикатори Цілей сталого розвитку. URL: <https://sdg.ukr-stat.gov.ua/uk/15-1-2/> (дата звернення: 02.01.2026).
- [6] Васильчук Л. Б., Фрідманський Р. М. Правове регулювання екологічної мережі в Україні. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2024. Вип. 2. С. 125–131. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2024.02.20>.
- [7] Національна екологічна мережа України. Екологічний стан. Геоінформаційна система України. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/ecology-11.html> (дата звернення: 02.01.2026)/
- [8] Council of Europe. Emerald Network of Areas of Special Conservation Interest. Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats (Bern Convention). URL: <https://www.coe.int/en/web/bern-convention/emerald-network> (дата звернення: 09.01.2026).
- [9] Офіційний сайт Постійного представництва України при ЮНЕСКО. Програма ЮНЕСКО «Людина і біосфера». URL: <https://unesco.mfa.gov.ua/spivrobitnictvo/programma-lyudina-ibiosfer> (дата звернення: 09.01.2026).
- [10] Національна академія наук України. Програми ЮНЕСКО «Людина і біосфера» 50 років. URL: <https://old.nas.gov.ua/UA/Messages/News/Pages/View.aspx?MessageID=8470> (дата звернення: 09.01.2026).
- [11] Оцінка впливу на довкілля при будівництві доріг в межах лісових екосистем / Барабаш О. В., Покшевніцька Т. В., Хрутьба О. В., Хрутьба, Ю. С. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. № 115. С. 264–276. DOI: <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-264-275>.
- [12] Покшевніцька Т. В. Проблеми розподілу впливу антропогенного забруднення на водні об'єкти України в контексті екологічної мілітаризації. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2024. № 6/1. С. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-09>.
- [13] Барабаш О. В., Хрутьба Ю. С., Покшевніцька Т. В. Комплексний підхід до оцінки впливу на довкілля реалізації природоохоронних проєктів. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2024. Вип. 6. С. 93–98. DOI: <https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-10>.
- [14] Сакун А. О., Єрмаков Ю. Ю. Сучасні методологічні підходи до оцінки екологічного стану рекреаційних зон. *Екологічні науки*. 2025. № 4(61). С. 34–37. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.5>.
- [15] Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 р. № 722/2019 року. URL: <https://lnk.ua/7CTE3QzhG> (дата звернення 02.02.2026 р.).

THE ROLE OF THE NATURE RESERVE FUND IN BIODIVERSITY CONSERVATION AND ENSURING THE SUSTAINABLE FUNCTIONING OF ECOSYSTEMS IN UKRAINE

Dychko A.O.

D.Sc. (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4632-3203>, e-mail: a.dychko@ntu.edu.ua;

Yermakov V.M.

D.Sc. (Engineering), associate professor, State Scientific Institution «Institute of Environmental Restoration and Development of Ukraine», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4548-235X>, e-mail: ntn@i.ua

The current state of development of Ukraine's nature reserve fund and the dynamics of the share of protected areas within the country's territorial structure during the period from 2022 to 2024 are analyzed. It is established that the gradual increase in the area of protected territories indicates the development of the national system for the conservation of natural resources; however, the pace of expansion of the nature reserve fund remains relatively low. The article examines the main structural elements of the ecological network, including natural cores, ecological corridors, and buffer zones, which contribute to the preservation of natural complexes and ensure species migration. It also highlights the significance of the nature reserve fund, the ecological network, and other protected areas in ensuring sustainable development. The importance of integrating Ukraine's protected areas into international conservation systems is analyzed, in particular the Pan-European Ecological Network, the Emerald Network, and the UNESCO World Network of Biosphere Reserves. It is determined that the effective functioning of the nature reserve fund is impossible without environmental monitoring, which allows for assessing the condition of natural ecosystems, identifying negative changes, and developing scientifically grounded management decisions in the field of environmental protection. The study emphasizes that the development of the nature reserve fund, the formation of the ecological and Emerald networks, and Ukraine's integration into international conservation initiatives contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals, particularly Goal 15 "Life on Land," and ensure the preservation of the natural environment for future generations.

Keywords: nature reserve fund; sustainable development; environmental monitoring; ecosystems; biodiversity; anthropogenic impact.

References

- [1] U. Bhatia, S. Dubey, T. C. Gouhier, and A. R. Gan-guly, "Network-based restoration strategies maximize ecosystem recovery," *Communications biology*, vol. 6, article 1256, 2023. doi: 10.1038/s42003-023-05622-3.
- [2] J. Geldmann, M. Barnes, L. Coad, I. Craigie, M. Hockings, and N. D. Burgess, "Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines," *Biological Conservation*, vol. 161, pp. 230–238, 2013. doi: 10.1016/j.biocon.2013.02.018.
- [3] C. L. Gray et al., "Local biodiversity is higher inside than outside terrestrial protected areas worldwide," *Nature Communications*, vol. 7, article 12306, 2016. doi: 10.1038/ncomms12306.
- [4] S. Stolton et al., "User's manual for the Jo-METT," IUCN, 2025. [Online]. Available: https://iucn.org/sites/default/files/2025-10/jomett_english_final_version_7oct2025.pdf. Accessed on: December 02, 2026.
- [5] Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Chastka ploshchi terytorii ta ob'ektiv pryrodno-zapovidnoho fondu v zahalnyi terytorii krainy. Indykatory Tsilei staloho rozvytku (State Statistics Service of Ukraine. Share of the area of territories and objects of the nature reserve fund in the total territory of the country. Indicators of the Sustainable Development Goals). [Online]. Available: <https://sdg.ukrstat.gov.ua/uk/15-1-2/>. Accessed on: January 02, 2026. (Ukr.)
- [6] L. Vasylychuk, and R. Fridmanskyy, "Pravove rehuliuвання ekolohichnoi merezhi v Ukraini" ["Legal regulation of the ecological network in Ukraine"], *Analitichno-porivnialne pravoznavstvo – Analytical and Comparative Jurisprudence*, vol. 2, pp. 125–131, 2024. doi: 10.24144/2788-6018.2024.02.20. (Ukr.)
- [7] Natsionalna ekolohichna merezha Ukrainy. Ekolohichniy stan. Heoinformatsiina systema Ukrainy (National Ecological Network of Ukraine. Ecological Status. Geographic Information System of Ukraine). [Online]. Available: <https://geomap.land.kiev.ua/ecology-11.html>. Accessed on: January 02, 2026. (Ukr.)
- [8] Council of Europe. Emerald Network of Areas of Special Conservation Interest. Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats (Bern Convention). [Online]. Available: <https://www.coe.int/en/web/bern-convention/emerald-network>. Accessed on: January 09, 2026.
- [9] Ofitsiynyi sait Postiinoho predstavnytstva Ukrainy pry YuNESKO. Prohrama YuNESKO «Liudyna i biosfera» (Official website of the Permanent Mission of Ukraine to UNESCO. UNESCO Programme «Man and the Biosphere»). [Online]. Available: <https://unesco.mfa.gov.ua/spivrobitnictvo/programa-lyudyna-ibiosfer>. Accessed on: January 09, 2026. (Ukr.)
- [10] Natsionalna akademiia nauk Ukrainy. Prohrami YuNESKO «Liudyna i biosfera» 50 rokiv (National Academy of Sciences of Ukraine. UNESCO Programme «Man and the Biosphere» 50 years). [Online]. Available: <https://old.nas.gov.ua/UA/Messages/News/Pages/View.aspx?MessageID=8470>. Accessed on: January 09, 2026. (Ukr.)
- [11] O. V. Barabash, T. V. Pokshevnytska, O. V. Khrutba, and Yu. S. Khrutba, "Otsinka vplyvu na dovkillia pry budivnytstvi dorih v mezhakh lisovykh ecosystem" ["Environmental impact assessment for road construction within forest ecosystems"], *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo – Automobile roads and road construction*, № 115, pp. 264–276, 2024. doi: 10.33744/0365-8171-2024-115.2-264-275. (Ukr.)
- [12] T. V. Pokshevnytska, "Problemy rozpodilu vplyvu antropohennoho zabrudnennia na vodni ob'ekty Ukrainy v konteksti ekolohichnoi militaryzatsii" ["Problems of the distribution of anthropogenic pollution impacts on water bodies of Ukraine in the context of environmental militarization"], *Ekolohichna bezpeka ta tekhnologii zakhystu dovkillia – Environmental safety and environmental protection technologies*, № 6/1, pp. 78–

- 88, 2024. DOI: **doi: 10.31073/ecobezpeka202406/1-09.** (Ukr.)
- [13] O. V. Barabash, Yu. S. Khrutba, and T. V. Pokshevnytska, “Kompleksnyi pidkhid do otsinky vplyvu na dovkillia realizatsii pryrodookhoronnykh proiektiv” [“An integrated approach to environmental impact assessment of conservation projects”], *Ekolohichna bezpeka ta tekhnolohii zakhystu dovkillia – Environmental safety and environmental protection technologies*, vol. 6, pp. 93-98, 2024. **doi: 10.31073/ecobezpeka202406-10.** (Ukr.)
- [14] A. O. Sakun, and Yu. Yu. Yermakov, “Suchasni metodolohichni pidkhody do otsinky ekolohichnoho stanu rekreatsiinykh zon” [“Modern methodological approaches to assessing the environmental condition of recreational areas”], *Ekolohichni nauky – Environmental Problems*, № 4(61), pp. 34-37, 2025. **doi: 10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.5.** (Ukr.)
- [15] *Pro Tsili staloho rozvytku Ukrainy na period do 2030 roku* [On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the Period up to 2030], Decree of the President of Ukraine no. 722/2019, Sept. 30, 2019. [Online]. Available: <https://lnk.ua/7CTE3QzhG>. Accessed on: January 02, 2026. (Ukr.)
- Стаття надійшла 14.01.2026
Стаття прийнята 23.02.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Дичко А. О., Єрмаков В. М. Роль природно-заповідного фонду у збереженні біорізноманіття та забезпеченні сталого функціонування екосистем України. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 142–149. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359946>.

263 ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 614.87:0.06:331.46:354

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359949

**АНАЛІЗ РИЗИКІВ ТА РОЗСЛІДУВАННЯ ПРИЧИН ПРОРИВУ ДАМБИ
У КУРЕНІВСЬКОМУ РАЙОНІ МІСТА КИЄВА**

Цопа В.А.	д-р техн. наук, професор, Міжнародний інститут менеджменту, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4811-3712 , e-mail: dr.tsopav@gmail.com ;
Чеберячко С.І.	д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3281-7157 , e-mail: cheberiachko.s.i@nmu.one ;
Заболотна Ю.О.	канд. техн. наук, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4360-5707 , e-mail: zabolotna.yu.o@nmu.one ;
Шуваєв П.С.	аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1768-0124 , e-mail: Shuvaev.Pav.S@nmu.one ;
Шароватова О.П.	канд. пед. наук, доцент, Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2736-2189 , e-mail: sharovatova.elen@ukr.net

У контексті зростання промислових ризиків інтеграція історичного досвіду в сучасні стандарти, аналіз небезпечних подій та розслідування їх причин сприяють підвищенню культури безпеки в організаціях через встановлення системних недоліків, що впливають на прийняття конструктивних управлінських рішень. Ретроспективний погляд на Куренівську трагедію підкреслює критичну важливість прозорості та інформаційної відкритості у кризових ситуаціях. Актуальність пропонованого матеріалу полягає у виявленні причин минулих катастроф, зокрема прориву дамби у Куренівському районі міста Києва для виявлення системних збоїв в управлінні безпекою господарських об'єктів. Мета статті полягає в аналізі ризиків прориву дамби у Куренівському районі міста Києва в контексті вимог стандарту ISO 45001, дослідженні відповідних причин, що має суттєве значення в системі розслідування аварій подібного рівня і пошуку відповідних превентивних рішень. У роботі використаний метод наукового аналізу з акцентом на системний аналіз управлінських та інженерних практик через призму вимог сучасного міжнародного стандарту ISO 45001:2018 («Системи менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці») щодо ризику прориву дамби. Встановлено, що критичними невідповідностями у контексті вимог стандарту ISO 45001 є відсутність лідерства вищого керівництва (розділ 5), поверхова ідентифікація небезпек і оцінка ризиків (розділ 6), ігнорування управління змінами (п. 8.1.3), формальний моніторинг (розділ 9) та неефективне розслідування інцидентів (розділ 10). Також до кореневих причин трагедії можна віднести підміну цінностей, де виконання виробничого плану та ідеологічні завдання ставилися вище за життя людей, а також інформаційний вакуум і відсутність участі працівників у процесі безпеки. Наукова новизна полягає в методологічному інноваційному синтезі аналізу історичної події з інструментами сучасного стандарту ISO 45001:2018, що відкриває нові перспективи для вивчення, аналізу техногенних катастроф, побудови алгоритмів розслідування подібних випадків і формування стійких систем безпеки. Практична цінність полягає у розробці моделі ризику прориву дамби та рекомендацій щодо формування політики у сфері безпеки організації, яка орієнтована на збереження життя і здоров'я людини.

Ключові слова: техногенна аварія; трагедія; оцінювання ризику; модель; система управління; розслідування причин аварії.

Постановка проблеми

У сучасному світі, де техногенні катастрофи продовжують становити значну загрозу для життя людей та інфраструктури, аналіз історичних подій (Куренівської трагедії) через призму сучасних стандартів управління безпекою набуває особливого значення. Це дозволить уникнути повторення помилок через проведення аналізу виявлених основних причин минулих катастроф для унеможливлення майбутніх. Більш того, інтеграція

історичного досвіду в сучасні стандарти влучно акцентує увагу на необхідності розвитку в системах управління організаціями: лідерства, потужної комунікації, умов для участі працівників у прийнятті рішень, мотивації для виконання відповідних встановлених вимог тощо. У контексті зростання промислових ризиків розбір подібних небезпечних подій також сприяє підвищенню культури безпеки в організаціях через встановлення системних недоліків, що впливають на прийняття відповідних управлінських рішень [1, 2].

Зокрема, ретроспективний погляд на Куренівську трагедію підкреслює критичну важливість прозорості та інформаційної відкритості у кризових ситуаціях. Радянська політика замовчування масштабів катастрофи Куренівської трагедії та її реальних причин є яскравим прикладом того, як відсутність чесної комунікації з громадськістю не лише поглиблює недовіру до владних інституцій, але й блокує можливість оперативного реагування та порятунку життів. У сучасному інформаційному суспільстві, де швидкість поширення даних є миттєвою, приховування ризиків стає неможливим і злочинним, тому вивчення наслідків ризику прориву дамби та «інформаційного вакууму» 1961 року слугує пересторогою для сучасних кризових менеджерів [3].

Актуальність даного дослідження також посилюється проблемами урбанізації та старіння інфраструктури. Куренівська трагедія стала наслідком нехтування інженерними розрахунками та халатного ставлення до розміщення небезпечних об'єктів поблизу житлових масивів. Сьогодні, коли українські міста в умовах війни стикаються з проблемою зношеності гідротехнічних споруд та комунікацій та знаходяться під обстрілами ракет, дронів тощо, цей історичний урок нагадує про неприпустимість економії на безпеці та необхідність жорсткого контролю за дотриманням будівельних норм і вимог (ДБН).

Аналіз складових ризику цієї катастрофи є важливим і у контексті зміни парадигми цінності людського життя [4, 5]. Якщо в тоталітарній системі виробничі плани ставилися вище за безпеку громадян, то сучасна Україна, яка сповідує європейські цінності, ставить людину в центр системи безпеки [6]. Дослідження причин трагедії допомагає сформулювати етичний фундамент для інженерів, управлінців та посадовців, нагадуючи, що будь-яка «технічна» помилка чи управлінський компроміс може мати фатальні гуманітарні наслідки. Таким чином, пам'ять про Куренівську трагедію трансформується з історичного факту на дієвий інструмент запобігання майбутнім катастрофам у процесі повоєнної відбудови та модернізації країни. Звідси виникає необхідність у вирішенні актуального завдання з формування стійких систем управління безпекою в сучасних умовах для запобігання подібним катастрофам у майбутньому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

За напрямом зазначених досліджень опубліковано декілька статей, які загалом зосереджуються на виявленні і розслідуванні технічних, організаційних та геологічних причин. Так, у роботі [7] автор на основі аналізу архівних документів визначає основні технічні причини – це помилки у розрахунках міцності дамби. Разом з тим, автор більше зосереджується на наслідках трагедії, оскільки на його думку відбулась їх недооцінка через цензуру. Інші автори [8] у своєму дослідженні роблять висновок про неминучість катастрофи не тільки через дефекти проекту дамби, а й через

відсутність відповідного нагляду, встановлених контрольних приладів та проведення відповідного аудиту. Про недбале планування, ігнорування зсувів, політичну мотивацію, що призвела до цієї трагедії, також говорять автори ще однієї роботи [9]. Разом з тим, у вищевказаних статтях автори не розкривають усі складові надзвичайної ситуації, а зосереджуються на одній, яку вважають основною. Вартим уваги є дослідження [10, 11], де автори вказують на геологічні причини трагедії, що полягали у зниженні міцності ґрунту та підвищенні порогового тиску, та наявності крутого схилу, що в сукупності не дозволяло забезпечити надійне зберігання пульпи. Підводячи підсумки проведеного аналізу, можна констатувати відсутність єдиної причини. Імовірініше це певна комбінація технічних помилок (проект дамби, дренаж), політичного тиску (ліквідація Бабиного Яру) та недбалості (ігнорування норм), що потребує систематизації і виявлення відповідних висновків для побудови дієвої системи управління безпекою організації.

Мета статті

Мета статті полягає в аналізі ризиків прориву дамби у Куренівському районі міста Києва в контексті вимог стандарту ISO 45001:2018.

Матеріали та методи

У роботі використаний метод наукового аналізу з акцентом на системний аналіз управлінських та інженерних практик через призму сучасного міжнародного стандарту ISO 45001:2018 («Системи менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці») [12]. В основі аналізу покладена історична техногенна катастрофа, що сталася 13 березня 1961 року в місті Києві і увійшла в історію як Куренівська трагедія. Аналіз і розслідування причин цієї катастрофи побудовано на декомпозиції подій відповідно до структури високого рівня (High Level Structure – HLS ISO), притаманній стандарту [12]:

- 1) середовище організації (розділ 4) і аналіз зовнішніх та внутрішніх чинників, що впливали на прийняття рішень, включаючи економічні обмеження;
 - 2) лідерство (розділ 5), оцінка ролі вищого керівництва, розподіл повноважень та культури безпеки;
 - 3) планування (розділ 6), аналіз ідентифікації небезпек, оцінки ризиків та дотримання законодавчих вимог;
 - 4) забезпечення та функціонування (розділи 7 та 8), оцінка компетентності персоналу, управління ресурсами, контроль операційних процесів та, що найважливіше, управління змінами;
 - 5) оцінка дієвості та поліпшення (розділи 9 та 10), аналіз моніторингу стану дамби та розслідування інциденту.
- Такий підхід дозволяє зосередитися на кореневих причинах системного управління безпекою промислових об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Застосування циклу PDCA (Plan-Do-Check-Act) до Куренівської трагедії дозволяє змодельовати, як мала б працювати система управління безпекою, щоб запобігти катастрофі або знизити її наслідки на кожному етапі розвитку надзвичайної ситуації (НС) (рис. 1).

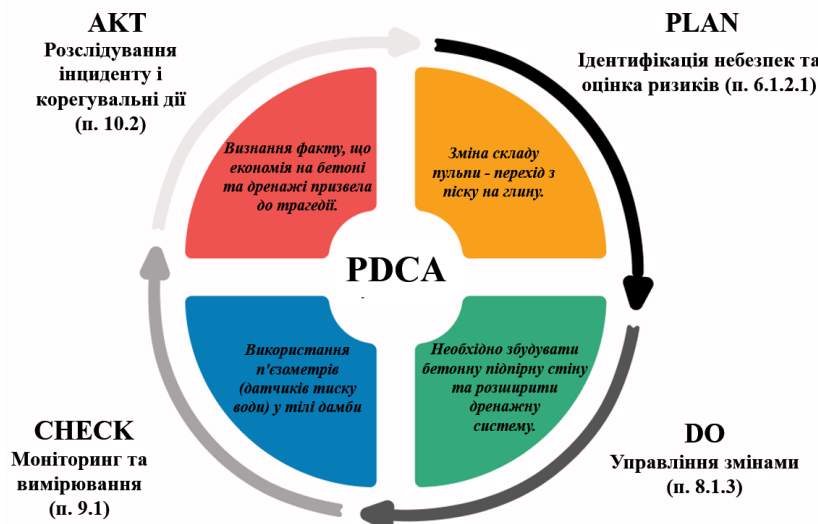


Рис. 1 – Модель PDCA Куренівської трагедії

Таблиця 1

Аналіз потреб, ставлення і наслідки управлінських дій зацікавлених сторін, які найбільше постраждали від настання небезпечної ситуації

Зацікавлена сторона	Очікування від системи управління безпекою виробничих об'єктів	Фактичне ставлення керівників підприємств до безпеки виробничих об'єктів	Наслідки ігнорування вимог безпеки
Трамвайне депо ім. Красіна	Безпечні умови праці, захист від затоплень, реагування на скарги.	Скарги на систематичне підтоплення території ігнорувалися. Працівників змушували працювати в умовах підвищеного ризику.	Повна руйнація депо, загибель близько 50 працівників на робочих місцях.
Мешканці житлового масиву Куренівка	Безпека проживання, інформування від владних органів про ризики.	Інформаційна блокада. Відсутність системи оповіщення. Дамба розглядалася як стабільний об'єкт.	Раптова загибель сотень людей у власних домівках, знищення житлового фонду.
Петрівські цегляні заводи	Безперебійне виробництво, утилізація відходів.	Технологічні регламенти порушувалися заради забезпечення безперервного циклу виробництва.	Переповнення резервуару пульпою, зміна фізичних властивостей накопиченої маси.

У даному контексті до основної небезпеки віднесли пульпу, яка огорожена земляним валом. До основних небезпечних чинників віднесли: помилки у проектуванні, що не врахували властивості ґрунтів, які знаходяться в Бабиному Яру [13]; невиконання вимог при експлуатації, зокрема, «розрідження» пульпи внаслідок її неправильного складу та надлишку глини, що підвищує в'язкість пульпи за низького вмісту води (пульпа стає «густою», пастоподібною). Крім того,

відсутність моніторингу за станом дамби та помилки при перших ознаках її прориву. Ймовірність настання трагедії – висока, через експериментальний характер технології та низьку якість будівництва дамби. Тяжкість наслідків – катастрофічна. Розташування дамби на висоті 40-60 м над густонаселеним районом (Куренівка) означало, що будь-який прорив призведе до масових жертв населення (рис. 2). У таблиці 2 наведені результати аналізу ризиків прориву дамби у

Куренівському районі міста Києва в контексті вимог стандарту ISO 45001:2018. Аналіз даних таблиці 2 демонструє, як своєчасне виконання ключових вимог стандарту ISO 45001:2018 могло б запобігти накопиченню небезпек та прориву дамби. На етапі зародження критичними були порушення в плануванні, що призвело до класифікації ризику як «Неприйнятний»

через геологічні (втрата несучої здатності ґрунтів Бабиного Яру при замочуванні), гідрологічні (екстремальні погодні умови) та технологічні чинники (розрідження пульпи через надлишок глини). На етапі ініціювання небезпечної ситуації відсутність інструментального моніторингу та оперативних коригувальних дій посилювала ймовірність настання катастрофи.

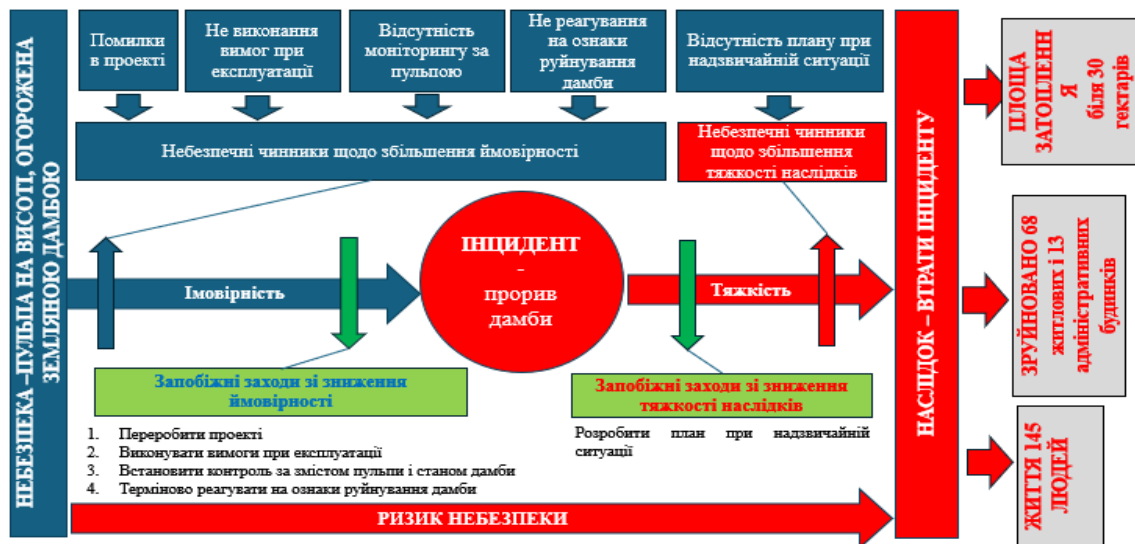


Рис. 2 – Модель ризику Куренівської трагедії

Таблиця 2

Оцінка ризику та виявлення ключових дій, реалізація яких унеможливила прорив дамби у Куренівському районі міста Києва в контексті вимог стандарту ISO 45001:2018

№	Розвиток небезпечної ситуації	Етап циклу PDCA	Ключові дії, виконання яких унеможливило настання небезпечної ситуації
1	Зародження небезпечної ситуації	Plan	Оцінка ризиків руйнування дамби з урахуванням властивостей ґрунтів (втрата несучої здатності при замочуванні), виявлення гідрологічних чинників (погодні умови) та технологічних чинників (розрідження пульпи). Рівень ризику «Неприйнятний» через високу ймовірність і катастрофічні наслідки.
		Check	Управління змінами: оцінка ризиків зміни матеріалу (пісок на глину); заборона експлуатації без зміни проекту; обґрунтування будівництва бетонної підпірної стіни, розширення дренажу; забезпечення операційного контролю – дотримання регламенту (зупинка наміву взимку, 8-годинний режим роботи). Рівень ризику «Неприйнятний» через високу ймовірність і катастрофічні наслідки.
2	Ініціювання небезпечної ситуації	Do	Забезпечення інструментального моніторингу стану дамби (використання п'єзометрів для виявлення насичення водою за дні до аварії); внутрішня комунікація – прямий канал зв'язку для механіка, який виявив протікання (замість спроби засипати лопатою). Рівень ризику «Неприйнятний» через відсутність контролю за небезпечними чинниками.
		Act	Забезпечення коригувальних дій (зупинка насосних станцій при перших ознаках протікання); активація плану реагування – оголошення надзвичайного стану. Рівень ризику «Неприйнятний» через відсутність коригувальних дій.

У таблиці 3 наведені результати аналізу ключових дій зацікавлених сторін (служби цивільного захисту і влади міста) під час настання прориву дамби для зменшення тяжкості наслідків. У цей час необхідно виконувати заздалегідь підготовлену частину циклу PDCA

«Готовність до аварій», що починається з етапу Дія. Щодо етапу План, він опрацьовується та передбачає дії всіх служб, що відносяться до цивільного захисту на випадок настання небезпечної ситуації.

Таблиця 3

Результати аналізу ключових дій зацікавлених сторін
під час настання прориву дамби для зменшення тяжкості наслідків

№	Розвиток небезпечної ситуації	Етап циклу PDCA	Ключові дії, виконання яких унеможливило настання небезпечної ситуації
1	Кульмінація небезпечної ситуації	Check	Виконання плану реагування: оповіщення (увімкнення сирен цивільного захисту); евакуація населення – перекриття вулиць (Фрунзе/Кирилівська), зупинка трамваїв, виведення людей з низин; право працівників відмовитися від роботи в небезпечних умовах.
2	Затухання небезпечної ситуації	Do	Розслідування інциденту: відкрите технічне розслідування кореневих причин (Root Cause Analysis), визнання економії на бетоні/дренажі; аудит системи управління безпекою – перевірка інших гідротехнічних споруд.
		Act	Коригувальні дії: зміна будівельних норм щодо гідронамиву в містах, заборона розміщення об'єктів над житловими масивами; впровадження обов'язкового страхування ризиків та незалежного нагляду.

На етапі кульмінації ключовими були оповіщення (увімкнення сирен цивільного захисту), евакуація (перекриття вулиць, зупинка трамваїв, виведення людей з низин) та право працівників відмовитися від роботи в небезпечних умовах. Відсутність цих заходів призвела

до зменшення кількості жертв, завдяки своєчасному інформуванню і готовності служб цивільного захисту.

У таблиці 4 наведено порушення вимог ISO 45001:2018, які призвели до настання прориву дамби.

Таблиця 4

Підсумок порушень вимог ISO 45001:2018, які призвели до настання прориву дамби

Етап НС	Етап PDCA	Порушення вимог ISO 45001:2018
Зародження	Plan	П. 6.1.2.1 (ідентифікація небезпек та оцінка ризиків): невраховані технічний та геологічний небезпечні чинники. П. 8.1.3 (управління змінами): неоцінені ризики переходу в будівництві дамби з піску на глину.
Ініціювання	Check	П. 8.1 (операційний контроль): порушення регламентів; цілодобовий налив пульпи замість 8-годинного.
Кульмінація	Do	П. 7.4 (комунікація): відсутність оповіщення населення та працівників про загрозу. П. 8.2 (готовність до аварій): відсутність евакуації.
Затухання	Act	Розділ 10 (розслідування інцидентів): відсутність пошуку кореневих причин.

Підсумок порушень показує системний характер збоїв: на етапі зародження – відсутність ідентифікації небезпек (п. 6.1.2.1) та ігнорування управління змінами (п. 8.1.3); на етапі ініціювання – порушення операційного контролю (п. 8.1), зокрема цілодобовий налив пульпи; на етапі кульмінації – відсутність ефективної комунікації (п. 7.4) та готовності до аварій (п. 8.2), що унеможливило своєчасне оповіщення та евакуацію; на етапі затухання – неефективне розслідування інцидентів (розділ 10), без визначення кореневих причин. Ці порушення підтверджують, що трагедія була не випадковістю, а результатом багаторічного нехтування системою управління безпекою.

Результати та їх обговорення

Розуміння середовища організації є фундаментом будь-якої системи управління [14]. У випадку Куренівської трагедії середовище слід розглядати як складний конгломерат. Він включав Виконком Київради (замовник та контролер), Петрівські цегляні заводи (постачальники відходів), трест «Укргідроспецбуд» (виконавець робіт) та московський інститут «Проектгідромеханізація» (проектувальник). Взаємодія цих суб'єктів відбувалася в умовах жорсткої командно-адміністративної системи радянського союзу.

Критичним зовнішнім чинником, що спотворив систему прийняття рішень, була ідеологічна установка

на «переформатування» пам'яті українців. Бабин Яр розглядався владою не як місце скорботи за загиблими, а як перешкода для розвитку міста, яку слід фізично знищити [15]. Це створило атмосферу, в якій будь-які технічні застереження щодо небезпеки проєкту сприймалися як політична нелояльність до радянської влади або саботаж. На думку автора, основною причиною трагедії стало саме політичне рішення Комуністичної партії УРСР ліквідувати Бабин Яр, що змусило інженерів шукати найшвидші та найдешевші, а це означає не найбезпечніші шляхи реалізації цього завдання.

Пріоритет прийняття рішень визначався економічними показниками при ігноруванні безпеки. Гідронамив розглядався як спосіб утилізувати відходи цегляного виробництва без витрат на автомобільний транспорт. Ця економічна модель була хибною, оскільки не враховувала вартість потенційних небезпек і її ризиків. Економія на бетонній дамбі, дренажних трубах великого діаметру та насосному обладнанні стала фатальною. Прагнення мінімізувати собівартість продукції цегляних заводів призвело до ігнорування базових вимог безпеки до населення.

Працівники депо неодноразово фіксували просочування води через дамбу, затоплення оглядових ям та підвалів. Ці сигнали небезпеки були формою «участі працівників» у ідентифікації небезпек, але вони не були почуті керівництвом. Отже, очевидним є факт ігнорування керівниками сигналів небезпеки і збільшення ймовірності настання трагедії [16]. У працівників не було легітимних інструментів (наприклад, незалежного комітету з безпеки), щоб зупинити небезпечні процеси. Профспілки в той час виконували здебільшого соціальну функцію і були підпорядковані комуністичній партії, що унеможливлювало їх роль як захисника безпеки праці в конфлікті з адміністрацією. Відтак, відсутність механізмів впливу на безпеку зумовила зростання ймовірності настання трагедії. Етап планування виявився фатально дефектним [17, 18]. Система не змогла передбачити катастрофічний сценарій, хоча всі передумови для нього були створені ще на етапі проєктування.

Куренівська трагедія мала системний характер. Трагедія не була наслідком «стихійного лиха» або непередбачуваного збігу обставин. Це був закономірний результат багаторічного системного нехтування вимогами безпеки. Кожен бар'єр захисту (проєктування, експертиза, моніторинг, реагування) був зруйнований адміністративним тиском влади і місцевих керівників [19, 20]. Основною кореневою причиною Куренівської трагедії стала підміна цінностей, де виконання виробничого плану та комуністичні ідеологічні ідеї ставилися вище за життя простих людей [17-19, 21]. Це пряме порушення фундаментальних вимог до Лідерства Вищого керівництва (розділ 5) [12]. Щодо нехтування управління змінами, особливо небезпечним чинником, який суттєво вплинув на збільшення ймовірності трагедії, стала зміна складу пульпи без перегляду інженерного проєкту (порушення п. 8.1.3 [12]). Це

підтверджує критичну важливість процедур «Управління змінами» у будь-якій галузі. Інформаційний вакуум, як небезпечний чинник, вплинув на збільшення тяжкості наслідків. Величезна кількість жертв стала обумовленою не стільки самим проривом, скільки відсутністю системи оповіщення та евакуації (порушення п. 8.2 [12]).

Висновки

За результатами проведеного дослідження встановлено, що критичними невідповідностями у контексті вимог стандарту ISO 45001 є відсутність лідерства вищого керівництва (розділ 5), поверхова ідентифікація небезпек і оцінки ризиків (розділ 6), ігнорування управління змінами (п. 8.1.3), формальний моніторинг (розділ 9) та недієве розслідування інцидентів (розділ 10). Також до кореневих причин трагедії можна віднести підміну цінностей, де виконання виробничого плану та ідеологічні ідеї ставилися вище за життя людей, а також інформаційний вакуум і відсутність участі працівників у процесі забезпечення безпеки.

Перелік використаних джерел

- [1] Liu J., Zhang Z., Feng R. A systemic approach to accident prevention: How control factors influence accident severity and losses across industries. *PLOS ONE*. 2025. Vol. 20(6). Article e0325393. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325393>.
- [2] Van Nunen K., Reniers G., Ponnet K. Measuring safety culture using an integrative approach: The development of a comprehensive conceptual framework and an applied safety culture assessment instrument. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19(20). Article 13602. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192013602>.
- [3] Woon E., Pang A. Explicating the information vacuum: Stages, intensifications, and implications. *Corporate Communications: An International Journal*. 2017. Vol. 22(3). Pp. 329–353. DOI: <https://doi.org/10.1108/CCIJ-10-2016-0066>.
- [4] Moscati I. Ellsberg 1961: Text, context, influence. *Contemporary Politics*. 2024. Vol. 47. Pp. 627–653. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10203-024-00437-1>.
- [5] Chen Y., Cai X. The Storage and Operation Changes of 256 Reservoirs Across the Contiguous United States. *Water Resources Research*. 2025. Vol. 61. Article e2024WR037372. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024WR037372>.
- [6] Nosova O. The role of European Union values in the Ukrainian social-humanitarian safety provision system. *London Journal of Social Sciences*. 2023. Vol. (5). Pp. 19–32. DOI: <https://doi.org/10.31039/ljss.2023.5.95>.
- [7] Афанасьев І. Ю. Уточнення наслідків Куренівської катастрофи. *Гілея: науковий вісник*. 2016. Вип. 107. С. 98–102.

- [8] Крупина В. О. «Жертв багато, а в газетах нічого не пишуть...» (Куренівська трагедія 13 березня 1961 р. в Києві). *Український історичний журнал*. 2012. № 4. С. 140–153.
- [9] Куренівська трагедія 13 березня 1961 р. у Києві: причини, обставини, наслідки. Документи і матеріали / редкол.: В. А. Смолій (відп. ред.) та ін. ; упоряд. В. М. Даниленко та ін. Київ : Інститут історії України НАН України, 2012. 548 с.
- [10] Анісімов О. Л. Куренівський апокаліпсис. Київська трагедія 13 березня 1961 року в фотографіях, документах, спогадах. Київ : Факт, 2000. С. 11–12, 41, 66–67, 71.
- [11] Прошин І. Аналіз факторів та фізико-географічних умов що впливають на причини виникнення аварій на гідротехнічних спорудах. *Social Development and Security*. 2023. Vol. 13(3). Pp. 196–205. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.13>.
- [12] ISO 45001:2018 Simplified. (Clause 5 Leadership and Worker Participation). URL: <https://isoqar.co.za/iso-450012018-simplified-clause-5-leadership-and-worker-participation/> (дата звернення: 15.11.2025).
- [13] «Експеримент над містом у величезних масштабах». *Урядовий кур'єр*. URL: <https://ukrainer.gov.ua/uk/articles/eksperiment-nad-mistom-u-velichezhnih-masshtabah/> (дата звернення: 28.11.2025).
- [14] This day. March 13, 1961 – Kurenivka mudslide. URL: <https://jmhnm.org/en/news-list/2092-ts-ogo-dnya-13-berezhnya-1961-r-kuren-vs-ka-traged-ya-2> (дата звернення: 28.11.2025).
- [15] The 1961 Kurenivka mudslide in Ukraine. URL: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2022/09/28/the-1961-kurenivka-mudslide-in-ukraine/> (дата звернення: 05.12.2025).
- [16] Покшевніцька Т. Закономірності антропогенного забруднення водних ресурсів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 166–173. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351088>.
- [17] Criteria for identification of landslides in the upper Prut river basin on satellite images / R. L. Kravchynskyi et al. *Geoinformatics*. 2021. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521003>.
- [18] Куренівська трагедія, 60 років по тому. Як і чому сталася одна з найбільших катастроф в історії Києва – історія і фото. URL: <https://www.ukr.net/news/details/kyiv/83895969.html> (дата звернення: 05.12.2025).
- [19] Artificial destratification options for reservoir management / F. Chaaya et al. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 967. Article 178738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178738>.
- [20] Куренівська трагедія: 60 років з дня катастрофи. *Вечірній Київ*. URL: <https://vechirniy.kyiv.ua/news/50535/> (дата звернення: 05.12.2025).
- [21] 13 березня в Києві вшановують пам'ять загиблих під час Куренівської катастрофи – трагедії, що стала наслідком неефективної тоталітарної системи – КМДА. URL: https://kyivcity.gov.ua/news/News_13_berezhnya_v_kiyevi_vshanovuyut_pamyat_zagiblih_pid_chas_kurenivsko_katastrofi_tragedi/ (дата звернення: 05.12.2025).

RISK ANALYSIS AND INVESTIGATION OF THE CAUSES OF THE DAM BREAK IN THE KURENIV DISTRICT OF KYIV

Tsopa V.	D.Sc. (Engineering), professor, International Management Institute, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4811-3712 , e-mail: dr.tsopav@gmail.com ;
Cheberyachko S.	D.Sc. (Engineering), professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3281-7157 , e-mail: cheberiachko.s.i@nmu.one ;
Zabolotnaya Yu.	PhD (Engineering), Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4360-5707 , e-mail: zabolotna.yu.o@nmu.one ;
Shuvaiev P.	postgraduate student, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1768-0124 , e-mail: Shuvaiev.Pav.S@nmu.one ;
Sharovatova O.	PhD (Pedagogical Sciences), associate professor, National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2736-2189 , e-mail: sharovatova.elen@ukr.net

In the context of increasing industrial risks, the integration of historical experience into modern standards, the analysis of dangerous events and the investigation of their causes contribute to the improvement of the safety culture in organizations by identifying systemic shortcomings that affect the adoption of constructive management decisions. A retrospective look at the Kurenivka tragedy emphasizes the critical importance of transparency and information openness in crisis situations. The relevance of the proposed material lies in identifying the causes of past disasters, in particular the dam

break in the Kurenivka district of Kyiv, in order to identify systemic failures in the safety management of economic facilities. The purpose of the article is to analyze the risks of the dam break in the Kurenivka district of Kyiv in the context of the requirements of the ISO 45001 standard, to study the relevant causes, which is of significant importance in the system of investigating accidents of a similar level and to find appropriate preventive solutions. The paper uses the method of scientific analysis with an emphasis on the systematic analysis of management and engineering practices through the prism of the requirements of the modern international standard ISO 45001:2018 (“Occupational Health and Safety Management Systems”) regarding the risk of a dam burst. It was found that critical inconsistencies in the context of the requirements of the ISO 45001 standard are the lack of leadership by senior management (section 5), superficial hazard identification and risk assessment (section 6), ignoring change management (section 8.1.3), formal monitoring (section 9) and ineffective incident investigation (section 10). The root causes of the tragedy also include the substitution of values, where the implementation of the production plan and ideological tasks were placed above people's lives, as well as an information vacuum and the lack of employee participation in the safety process. The scientific novelty lies in the methodological innovative synthesis of the analysis of a historical event with the tools of the modern ISO 45001:2018 standard, which opens up new prospects for the study, analysis of man-made disasters, the construction of algorithms for investigating such cases and the formation of sustainable safety systems. The practical value lies in the development of a dam breach risk model and recommendations for the formation of an organization's safety policy, which is focused on preserving human life and health.

Keywords: man-made accident; tragedy; risk assessment; model; management system; investigation of the causes of the accident.

References

- [1] J. Liu, Z. Zhang, and R. Feng, “A systemic approach to accident prevention: How control factors influence accident severity and losses across industries,” *PLOS ONE*, vol. 20(6), article e0325393, 2025. doi: [10.1371/journal.pone.0325393](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325393).
- [2] K. Van Nunen, G. Reniers, and K. Ponnet, “Measuring safety culture using an integrative approach: The development of a comprehensive conceptual framework and an applied safety culture assessment instrument,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19(20), article 13602, 2022. doi: [10.3390/ijerph192013602](https://doi.org/10.3390/ijerph192013602).
- [3] E. Woon, and A. Pang, “Explicating the information vacuum: Stages, intensifications, and implications,” *Corporate Communications: An International Journal*, vol. 22(3), pp. 329–353, 2017. doi: [10.1108/CCIJ-10-2016-0066](https://doi.org/10.1108/CCIJ-10-2016-0066).
- [4] I. Moscati, “Ellsberg 1961: Text, context, influence,” *Contemporary Politics*, vol. 47, pp. 627–653, 2024. doi: [10.1007/s10203-024-00437-1](https://doi.org/10.1007/s10203-024-00437-1).
- [5] Y. Chen, and X. Cai, “The Storage and Operation Changes of 256 Reservoirs Across the Contiguous United States,” *Water Resources Research*, vol. 61, article e2024wr037372, 2025. doi: [10.1029/2024WR037372](https://doi.org/10.1029/2024WR037372).
- [6] O. Nosova, “The role of European Union values in the Ukrainian social-humanitarian safety provision system,” *London Journal of Social Sciences*, vol. (5), pp. 19–32, 2023. doi: [10.31039/ljss.2023.5.95](https://doi.org/10.31039/ljss.2023.5.95).
- [7] I. Iu. Afanasiev, “Utochnennia naslidkiv Kurenivskoi katastrofy” [“Clarifying the legacy of the Kurenivka disaster”], *Hileia: naukovyi visnyk – Gilea: scientific journal*, vol. 107, pp. 98–102, 2016. (Ukr.)
- [8] V. O. Krupyna, “«Zhertv bahato, a v hazetakh nichoho ne pyshut...» (Kurenivska trahediia 13 bereznia 1961 r. v Kyievi)” [“There are a lot of victims, but nothing is written in the newspapers...” (Kurenivka tragedy of February 13, 1961 in Kiev)”, *Ukrainskyi istorychnyi zhurnal – Ukrainian historical magazine*, № 4, pp. 140–153, 2012. (Ukr.)
- [9] V. A. Smolii et al., Eds., *Kurenivska trahediia 13 bereznia 1961 r. u Kyievi: prychyny, obstavyny, naslidky. Dokumenty i materialy* [Kurenivka Tragedy of March 13, 1961 in Kyiv: Causes, Circumstances, Consequences. Documents and Materials], V. M. Danylenko et al., Comps. Kyiv, Ukraine: Institute of History of Ukraine, NASU, 2012. (Ukr.)
- [10] O. L. Anisimov, *Kurenivskyi apokalipsys. Kyivska trahediia 13 bereznia 1961 roku v fotohrafiiakh, dokumentakh, spohadakh* [Kurenivka Apocalypse. Kyiv Tragedy of March 13, 1961 in Photographs, Documents, Memories]. Kyiv, Ukraine: Fakt, 2000, pp. 11–12, 41, 66–67, 71. (Ukr.)
- [11] I. Proshchyn, “Analiz faktoriv ta fizyko-heohrafichnykh umov shcho vplyvaiut na prychyny vynyknennia avarii na hidrotekhnichnykh sporudakh” [“Analysis of factors and physical and geographical conditions that influence the causes of accidents at hydrotechnical structures”], *Social Development and Security*, vol. 13(3), pp. 196–205, 2023. doi: [10.33445/sds.2023.13.3.13](https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.13). (Ukr.)
- [12] ISO 45001:2018 Simplified. (Clause 5 Leadership and Worker Participation). [Online]. Available at: <https://isoqar.co.za/iso-450012018-simplified-clause-5-leadership-and-worker-participation/>. Accessed on: November 15, 2025.
- [13] “Eksperyment nad mistom u velycheznykh masshtabakh” [“An experiment on a place on a grand scale”], *Uriadovyi kurier – District courier*. [Online]. Available at: <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/eksperyment-nad-mistom-u-velicheznih-masshtabah/>. Accessed on: November 28, 2025. (Ukr.)
- [14] This day. March 13, 1961 – Kurenivka mudslide. [Online]. Available at: <https://jmhun.org/en/news->

- [list/2092-ts-ogo-dnya-13-berezhnya-1961-r-kuren-vs-ka-traged-ya-2](#). Accessed on: November 28, 2025. (Ukr.)
- [15] The 1961 Kurenivka mudslide in Ukraine. [Online]. Available at: <https://blogs.agu.org/land-slideblog/2022/09/28/the-1961-kurenivka-mudslide-in-ukraine/>. Accessed on: December 05, 2025.
- [16] T. V. Pokshevnytska, "Zakonomirnosti antropohenoho zabrudnennia vodnykh resursiv" ["Regularities of anthropogenic pollution of water resources"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovsky State Technical University Section Technical sciences*, vol. 52, pp. 166–173, 2025. doi: **10.31498/2225-6733.52.2025.351088**. (Ukr.)
- [17] R. L. Kravchynskyi, V. K. Khilchevskyi, M. V. Korchemluk, L. M. Arkhipova, and L. V. Plichko, "Criteria for identification of landslides in the upper Prut river basin on satellite images," *Geoinformatics*, pp. 1–6, 2021. doi: **10.3997/2214-4609.20215521003**.
- [18] Kurenivska trahediia, 60 rokiv po tomu. Yak i chomu stalasia odna z naibilshykh katastrof v istorii Kyieva – istoriia i foto (Kurenivka tragedy, 60 years after that. How and why one of the worst disasters in the history of Kiev happened - history and photos). [Online]. Available at: <https://www.ukr.net/news/details/kyiv/83895969.html>. Accessed on: December 05, 2025. (Ukr.)
- [19] F. Chaaya, B. Miller, M. Gordos, B. Tamburic, and S. Felder, "Artificial destratification options for reservoir management," *Science of the Total Environment*, vol. 967, article 178738, 2025. doi: **10.1016/j.scitotenv.2025.178738**.
- [20] "Kurenivska trahediia: 60 rokiv z dnia katastrofy" ["Kurenivka tragedy: 60 fatalities from the day of disaster"], *Vechirnyi Kyiv – Evening Kyiv*. [Online]. Available at: <https://vechirniy.kyiv.ua/news/50535/>. Accessed on: December 05, 2025. (Ukr.)
- [21] 13 berezhnia v Kyievi vshanovuiut pamiat zahyblykh pid chas Kurenivskoi katastrofy – trahedii, shcho stala naslidkom neefektyvnoi totalitarnoi systemy – KMDA (On March 13, Kyiv commemorates those killed in the Kurenivka disaster – a tragedy that was the result of an ineffective totalitarian system – Kyiv City State Administration). [Online]. Available at: https://kyivcity.gov.ua/news/News_13_berezhnya_v_kyievi_vshanovuyut_pamyat_zagiblykh_pid_chas_kurenivsko_katastrofi_tragedi/. Accessed on: December 05, 2025. (Ukr.)

Стаття надійшла 04.03.2026

Стаття прийнята 18.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Аналіз ризиків та розслідування причин прориву дамби у Куренівському районі міста Києва / В.А. Цопа та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 150–158. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359949>.

АНАЛІЗ РІВНЯ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА ЙОГО НАСЛІДКІВ
НА ПРАЦІВНИКІВ В УКРАЇНІ ТА ЄВРОПІ

Мітіна Н.Б.	канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5384-7040 , e-mail: natalimitina0000@gmail.com ;
Когтєва О.П.	PhD, ст. викладач, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7282-8243 , e-mail: olhakohtieva@gmail.com ;
Мініна Ю.О.	асистент, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9555-6471 , e-mail: mininayuliya1985@gmail.com

Здорова нація є головною складовою будь-якої держави, що і зазначено в Конституції України. Поняття здоров'я охоплює як фізичний стан людини, так і ментальну його складову. Кожна людина хоча б інколи відчувала стрес і напруження. Не секрет, що частіше це пов'язано з професійною діяльністю, з роботою і вже отримало назву «хвороба століття». Рівень психічного і фізичного навантаження коливається в залежності від професії, віку, статі. Психофізіологічне навантаження відчувають працівники по всьому світу і в будь-якій професії. Праця в Україні пов'язана ще і з додатковою тривожністю і небезпекою, викликану постійними сигналами тривоги, вибухами і болем. Для забезпечення безпеки людини в процесі праці є необхідність дослідження психологічних аспектів професій і визначення шляхів зменшення психоемоційного навантаження. Метою статті є аналіз і увага до проблеми психофізіологічного навантаження працівників, як невід'ємної складової безпеки праці на виробництві. В дослідженні використовувались методи анкетування з метою збору статистичних даних і оцінки основних факторів психофізіологічного навантаження, статистичні методи, обробка результатів з використанням пакету програми Excel. Встановлено статистичний зв'язок між інтегральним показником ризику та рівнем стресу, втомі, робочого навантаження, а також встановлено кореляцію $r = 0.75$ між стресом і когнітивним навантаженням, що свідчить про їх кумулятивний ефект дії на стан працівників. На основі отриманих результатів наведені прогнозовані наслідки психофізіологічного навантаження, серед яких зниження продуктивності і збільшення ризику травматизму на виробництві. Отримані дані можуть бути використані для вдосконалення системи управління охороною праці та розроблення заходів щодо профілактики травматизму та зниження психофізіологічного навантаження.

Ключові слова: психофізіологічне навантаження; психофізіологічні фактори; стрес; ментальне здоров'я; безпека праці; аналіз; нещасний випадок; професійні захворювання; працездатність; увага; кореляція факторів стресостійкості.

Постановка проблеми

Інтенсивність і широке розповсюдження цифровізації в останні роки спричинило не тільки технічний та інформаційний сплеск, а й збільшило навантаження на працівників у психоемоційному сенсі: підвищилась складність завдань та їх обсяг, збільшилась кількість вимог до навичок і вмінь сучасного працівника, до його оперативності і креативності, все більше людей віддають перевагу роботі у сфері послуг або інформаційних технологій [1]. Період пандемії призвів до швидкого і стрімкого руху людей в бік оволодіння (бо хтось до цього періоду зовсім не володів навичками користування новітніми технологіями) новими вміннями і дистанційною роботою майже в усіх сферах. Це все накладає додаткове психофізіологічне навантаження на людину. Законодавча база щодо цього питання в Україні недосконала. Лише нещодавно було прийнято Закон України «Про систему охорони психічного здоров'я в Україні», який визначає правові, організаційні, економічні та соціальні засади системи охорони психічного здоров'я в Україні, регулює суспільні відносини

у цій сфері з метою забезпечення доступності, якості послуг, дотримання прав людей з психічними розладами, іншими проблемами, що стосуються психічного здоров'я, запобігання виникненню психічних розладів, сприяння досягненню психологічного благополуччя та розвитку людини, усунення факторів, що негативно впливають на психічне здоров'я [2]. Британська організація «Health and Safety Executive» розглядає стрес як негативну реакцію людини на перевищення рівня тиску, що є контрастом до звичайного робочого навантаження, яке може сприяти активізації та мотивації. Такі реакції можуть мати далекосяжні наслідки для психічного та фізичного здоров'я співробітників, включно з анксіозністю та депресією. Міжнародна організація праці визначає стрес як шкідливу фізичну та емоційну реакцію, спричинену розбіжністю між вимогами робочого місця та здатністю, знаннями та ресурсами працівника. Всесвітня організація охорони здоров'я описує стрес як реакцію на вимоги та тиски, які не узгоджуються з навичками та можливостями індивіда, ставлячи під загрозу їх здатність ефективно впоратися з

викликами [1]. Також розрізняють негативний стрес – дистрес і позитивний – еустрес, що підкреслює адаптивну функцію стресу в процесі подолання життєвих труднощів. І сьогодні перед фахівцями постає задача використати максимально позитивний стрес для покращення якості життя працівника і зменшити негативний стрес і його наслідки, як чинника небезпеки в процесі праці. На сьогодні практики з подолання стресу на роботі більш розповсюджені в ІТ-сфері, в невеликих офісах, тому проблема надмірного психофізіологічного навантаження залишається і потребує уваги.

Країни Європи також мають проблеми з психофізіологічним навантаженням і його регуляцією. Так, за даними Джерел [3], до пандемії проблеми з ментальним здоров'ям мав кожен шостий житель Європейського Союзу, наразі – кожен третій. Для покращення ситуації запроваджено комплексний підхід до ментального здоров'я, сформовано програму з розбудови потенціалу у сфері психічного здоров'я на період 2024-2028 рр [4]. Стрес є складним процесом, подолання якого не має єдиної універсальної стратегії, все індивідуально. Але є спільне для всіх людей – те, що стрес і вигорання може відчувати кожна людина. Все-таки тільки визнання наявності проблеми не вирішує проблеми, необхідні дослідження, розробка програм і стратегій оздоровлення і покращення умов праці [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Автори [6] наголошують, що найбільші ризики та рівень психоемоційного навантаження людина отримує саме на робочому місці. Дослідження [7] також підтверджують високий рівень стресу, пов'язаний саме з робочим місцем. В дослідженні [8] автори вивчали стрес і вплив на офісних працівників, в якому зробили огляд на основі медичних показників, які отримали в ході експерименту. В роботі [9] проведено дослідження щодо стресу від роботи серед європейців, в якому визначено, що більше 50% працівників вказали фактор стресу основною проблемою на роботі, а близько 40% вважають, що стрес на робочому місці не контролюється як треба. Автор [10] описує стрес як технострес, як невід'ємну складову сучасного світу, пов'язану із широким використанням смартфонів. Вивчаючи проблему стресу різної природи, автори [11] запропонували використання біосенсорів для моніторингу стану для виявлення змін, спричинених стресом.

Тому, оцінка психофізіологічного стану працівника є важливою складовою, особливо при відборі працівників на певні посади та для роботи в деяких галузях, а також як проміжна контрольна характеристика стану людини-працівника [12]. До того ж, соціологічні опитування говорять про те, що лідером причини стресу є робота [13]. Зокрема, проаналізовані статистичні дані Фонду України та страхових компаній для визначення сучасного стану страхування від нещасного випадку та професійних захворювань, які сталися під впливом небезпечних та шкідливих виробничих

факторів, показали, що переважають організаційні – 65,5 %, через психофізіологічні причини сталося 22,3% нещасних випадків, а через технічні причини – 12,2 %. Також значно на ментальне здоров'я впливає фінансове становище і політична ситуація в країні. За даними опитувань відчуття стресу є майже у половини жителів таких європейських країн, як Нідерланди, Британія, Франція, Німеччина, Іспанія, Польща та Італія. Ототожнюють це відчуття респонденти саме з роботою [14].

Мета статті

Метою статті є висвітлення проблеми психофізіологічного навантаження на працівників незалежно від виду діяльності, а також показати, що дана проблема є нагальною не тільки в Україні, а й в усьому світі, зокрема в країнах Європи. На основі статистичних даних виявити найбільш впливові фактори навантаження працівників і за допомогою коефіцієнта кореляції для подальшого впровадження методик щодо покращення психофізіологічного стану на робочому місці для забезпечення безпеки праці.

Виклад основного матеріалу

В Україні картина рівня стресу доповнюється підвищенням тривожності людей, спричиненою воєнними діями, через що відчуття стресу від роботи поступається тривозі від воєнної ситуації в країні, на відміну від даних стану європейців. В подальшому накопичення цих факторів веде до вигорання працівника, знижує працездатність, стає причиною серцево-судинних та інших захворювань, травматизму на роботі. Також після пандемії майже у всі сфери життя людини увійшло додаткове цифрове і технологічне навантаження (дистанційне навчання, дистанційна робота, збільшення самообслуговування у всіх можливих сферах з використанням технологій). Так, авторами [15] досліджено вимушену зміну форми навчання у вищій школі, яка була спочатку зумовлена пандемією COVID-19, а потім і введенням воєнного стану. Процес адаптації до вимушеної трансформації форми навчання виявився складний, як з погляду технічних можливостей забезпечення якості освіти, так і з точки зору психоемоційного стану студентів (проблеми з концентрацією уваги) та викладачів. І мова не тільки про виснаженість, втому, стрес, а й про реальні проблеми зі здоров'ям, зниження імунітету. Згідно з міжнародною статистикою, головним винуватцем нещасних випадків і травматизму є, як правило, не техніка, не організація, а сам працівник, який, за тих чи інших причин, не дотримувався правил безпеки праці, порушував хід трудового процесу. Практика показує, що 60–90% нещасних випадків відбувається з вини самих постраждалих. Тому виникає необхідність дослідження психологічних аспектів безпеки людини в процесі праці [16]. До стресових факторів відносять різноманітні як зовнішні, так і внутрішні події. В якості протидії, людина

«виробляє» стратегію адаптації задля збереження життя і благополуччя, таким чином адаптуючись до стресового фактору, що в свою чергу призводить до психологічних і, навіть, фізичних порушень. А це, в свою чергу неминуче веде до збільшення випадків

травмування та порушень правил безпеки охорони праці [17, 18].

Для порівняльного аналізу рівня стресу, пов'язаного з роботою, було розглянуто показники рівня стресу в різних країнах Європи і в Україні, дані представлені у вигляді діаграми (Рис.1).



Рис. 1 – Рівень стресу у працівників спричинений роботою в країнах Європи і в Україні

Дане дослідження було спрямоване на оцінку впливу психофізіологічних факторів на рівень ризику виникнення людських помилок, травматизму, аварійних ситуацій в трудовій діяльності. Основною метою дослідження було визначення взаємозв'язку між рівнем стресу працівників та інтегральним показником психофізіологічного ризику, а також кореляція між основними дослідними факторами.

Емпіричні дослідження засновані на анкетуванні різного віку та статі працівників. Анкетування було спрямоване на визначення психофізіологічного навантаження за обраними основними показниками, а саме: рівень стресу, рівень втоми, когнітивне навантаження та інтенсивність робочого навантаження. За основу прийнята п'ятибальна шкала, за якою респонденти розподіляли відповідно до інтенсивності прояву того чи іншого стану від 1 до 5 свої відчуття від мінімального рівня до дуже високого. Також, на основі отриманих даних, було розраховане і середнє значення для кожного з факторів. Інтегральний показник

психофізіологічного ризику дозволив комплексно врахувати вплив декількох факторів і розраховувався сумою значень окремих факторів психофізіологічного навантаження з використанням вагових коефіцієнтів, які відображають їх відносну вагу в загальному ризику.

За результатами досліджень сформовано діаграму розподілу психофізіологічного навантаження за віковими групами (рис. 2). Аналіз показує, що рівень втоми, стресу та робочого навантаження має тенденцію зростати в групах старшого віку, в той же час когнітивне навантаження змінюється менш помітно.

Аналіз результатів анкетування також показав, що рівень втоми і робочого навантаження превалює серед респондентів середнього і старшого віку, що свідчить про накопичувальний ефект психофізіологічного виснаження. Серед респондентів молодшого віку (20-35 років) більшим виявився рівень стресу, що може бути пов'язано із адаптаційним періодом і нестабільністю умов праці.

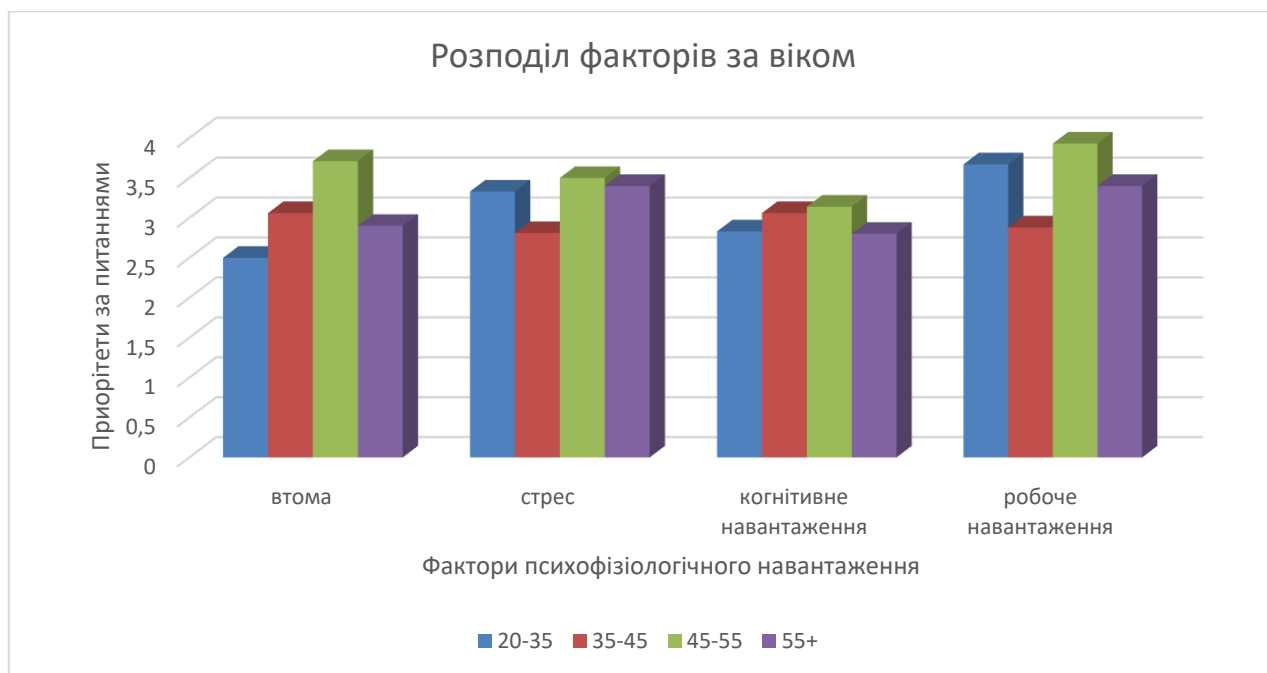


Рис. 2 – Розподіл психофізіологічного навантаження за віковими групами

Гендерний аналіз результатів показав, що рівень втоми, стресу, робочого навантаження у жінок дещо вищий ніж у чоловіків (Рис. 3). Це можна пояснити

додатковим психоемоційним навантаженням, пов'язаним із поєднанням жіною одночасно професійних і соціальних ролей.

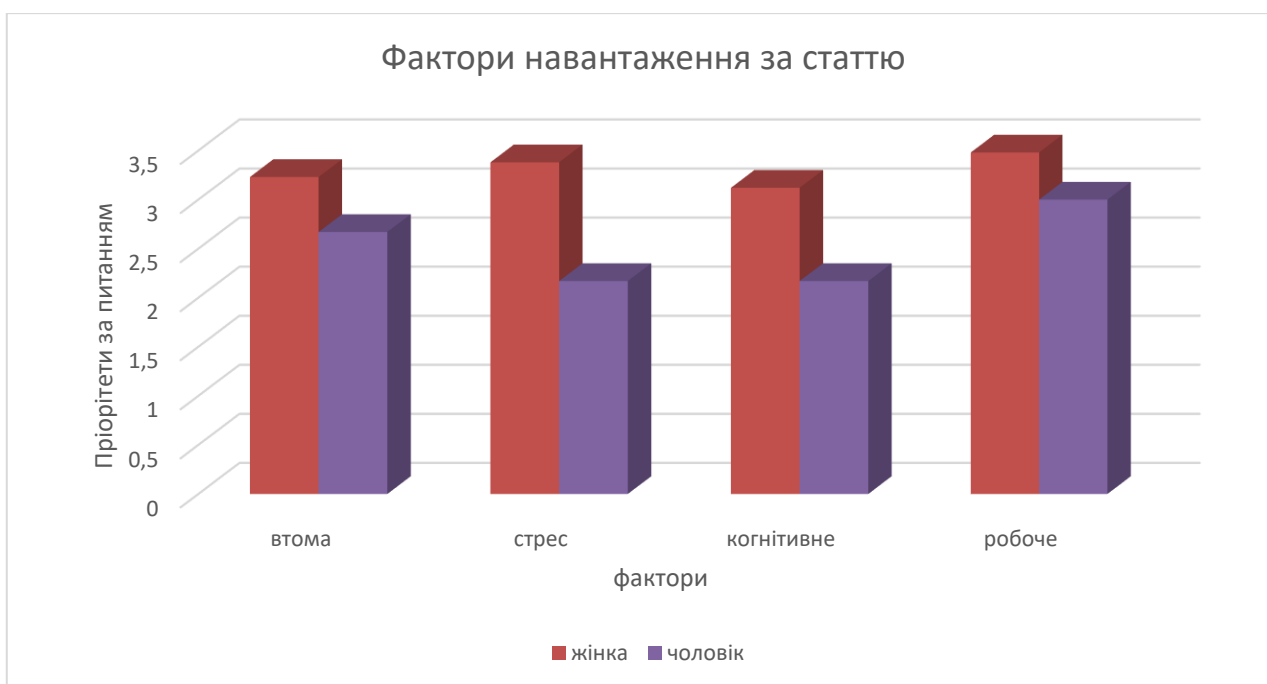


Рис. 3 – Розподіл психофізіологічного навантаження за статтю

Для статистичної обробки результатів були застосовані методи визначення середніх значень показників, визначений інтегральний показник психофізіологічного ризику, а також для аналізу взаємозв'язку між

факторами було проведено кореляційний аналіз із використанням коефіцієнта кореляції Пірсона. На основі аналізу побудований графік (Рис. 4).

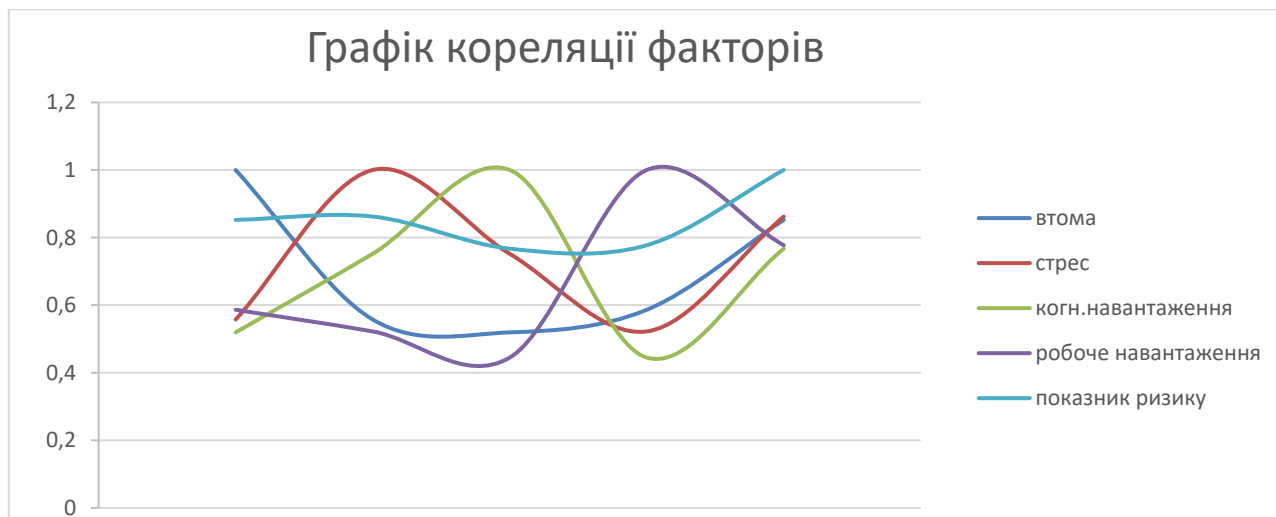


Рис. 4 – Графік, що характеризує кореляцію факторів психофізіологічного навантаження

Кореляційний аналіз дозволяє оцінити силу та напрямок зв'язку між окремими факторами, а також визначити їх вплив на інтегральний показник психофізіологічного ризику. Отримані результати демонструють наявність тісного зв'язку інтегрального показника ризику з фактором стресу, втоми та робочого навантаження, кореляція складає 0,86, 0,85 і 0,78 відповідно, що свідчить про значний вплив на працівника саме цих показників. Побудова даного графіку дає можливість наочно оцінити взаємодію досліджуваних факторів та визначити ті з них, які мають найбільший вплив на формування психофізіологічного ризику. Найбільша кореляція спостерігається між стресом і когнітивним навантаженням, що вказує на їх взаємний посилюючий вплив на працівника.

Результати та їх обговорення

Результатом проведеного дослідження є оцінка рівня психофізіологічного навантаження працівників переважно професій «людина-людина» на основі проведеного анкетування. За даними Державної служби статистики, за кількістю потерпілих від нещасних випадків в різних сферах діяльності лідером є сектор охорони здоров'я та надання соціальних послуг, тобто це фахівці типу «людина-людина», що підтверджує і наше дослідження. Значно далі від цього напрямку фахівці переробної промисловості, видобувної промисловості, сільського та лісового господарства, транспорт – фахівці, переважно, типу «людина-техніка». Аналіз інтегрального показника ризику та середніх значень досліджуваних показників свідчить про наявність помірного або підвищеного рівня втоми, стресу, когнітивного та робочого навантаження серед респондентів. Встановлено, що найбільший ризик серед досліджуваних факторів становлять втома і стрес. Кореляційний аналіз показав наявність тісного зв'язку між показником ризику і рівнем стресу працівників ($r \approx 0.86$), втоми ($r \approx 0.85$) і робочого навантаження ($r \approx 0.78$), що

свідчить про невід'ємну роль психофізіологічного стану працівників у формуванні ризиків помилок на робочому місці та зниженні безпеки праці. Виявлено також високе значення кореляції між стресом і когнітивним навантаженням ($r \approx 0.75$), що підтверджує їх взаємопосилюючий характер. Аналізуючи розподіл показників за віком, простежується тенденція зростання втоми та робочого навантаження в старших вікових групах. Порівняння рівня стресу серед працівників в європейських країнах і в Україні показало вищий рівень серед українських працівників і це очевидно, бо до рівня стресу, спричиненого роботою, несвідомо додається тривога і стрес від військових дій на території країни. У короткостроковому періоді це може призвести до зниження концентрації уваги на робочому місці і, як наслідок, збільшення кількості помилок, до уповільнення реакції працівника і зниження продуктивності праці. При недостатній увазі і профілактиці можливе розвинення хронічної втоми, емоційного виснаження, зниження мотивації працівників. В довгостроковому періоді недостатня увага до ментального здоров'я працівників тягне за собою професійне вигорання, психосоматичні захворювання останніх, а також підвищення виробничого травматизму, зростання аварійності.

Висновки

Проведений аналіз і дослідження дозволили встановити, що психофізіологічні фактори є суттєвими чинниками для формування ризиків у професійній сфері та безпеці праці. Найбільший вплив на інтегральний показник психофізіологічного ризику має втома працівників, стрес та інтенсивність і кількість робочого навантаження, що було підтверджено результатами кореляційного аналізу в ході дослідження. Виявлені взаємозв'язки свідчать про комплексний характер впливу сукупності чинників, що вивчались, і необхідність їх системного врахування при оцінці умов праці для забезпечення безпеки праці. Порівняння

отриманих в ході експерименту показників з європейськими значеннями подібних факторів показало, що рівень психофізіологічного навантаження, а саме стресу, є вищим, що може бути обумовлено організаційними або соціально-економічними чинниками, або сукупністю і тих і інших. З метою зниження психофізіологічного навантаження та підвищення безпеки праці доцільно запроваджувати такі заходи: вдосконалення організації режиму роботи та відпочинку, розробка методів управління стресом на робочому місці та профілактики професійного вигорання, оптимізація робочих процесів, враховуючи когнітивне навантаження, регулярний моніторинг стресового стану на психофізіологічного стану працівників, використання ризик-орієнтованого підходу до контролю людського фактора в процесі праці, впровадження європейських практик та методик щодо управління психофізіологічними ризиками. Таким чином, дослідження підтверджують необхідність уваги та дій з боку системи управління охороною праці, які сприятимуть підвищенню ефективності професійної діяльності працівників та зниженню рівня виробничого травматизму та вигорання.

Перелік використаних джерел

- [1] Гуцуляк Н., Чуйко О., Дуб В. Стратегії подолання професійного стресу в управлінській діяльності. *Science and Education*. 2024. Вип. 1. С. 47–52. DOI: <https://doi.org/10.24195/2414-4665-2024-1-8>.
- [2] Про систему охорони психічного здоров'я в Україні : Закон України від 15.01.2025 р. № 4223-IX. Відомості Верховної Ради. 2025. № 31. Ст. 103. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4223-20#Text> (дата звернення: 07.02.2026).
- [3] Більше ніж добробут і турбота про себе. URL: <https://www.ipg-journal.io/ua/rubriki/demokratiche-suspilstvo/bilshe-nizh-dobrobut-i-turbota-pro-sebe-1820/> (дата звернення: 07.02.2026).
- [4] EU PROMENS. URL: <https://eu-promens.eu/eu-promens> (дата звернення: 07.02.2026).
- [5] Burnout at Work: A Psychological Perspective / ed.: M. P. Leiter, A. B. Bakker, C. Maslach. London : Psychology Press, 2014. 182 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/978131589416>.
- [6] Zoni S., Lucchini R. G. European approaches to work-related stress: a critical review on risk evaluation. *Safety and Health at Work*. 2012. Vol. 3, no. 1. Pp. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.5491/SHAW.2012.3.1.43>.
- [7] World Mental Health Day: 29% of EU workers suffer stress, depression or anxiety. URL: <https://osha.europa.eu/en/highlights/world-mental-health-day-29-eu-workers-suffer-stress-depression-or-anxiety> (дата звернення: 07.02.2026).
- [8] The effects of acute work stress and appraisal on psychobiological stress responses in a group office environment / J. I. Kerr et al. *Psychoneuroendocrinology*. 2020. Vol. 121. Article 104837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2020.104837>.
- [9] Work-related stress risk factors and health outcomes in public sector employees / F. Marcatto et al. *Safety Science*. 2016. Vol. 89. Pp. 274–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.07.003>.
- [10] Kaltenecker H. C. Working Conditions and Technostress in the Workplace: Physiological and Psychological Correlates : Dissertation for the degree of Doctor of Human Biology (Dr. rer. biol. hum.). Munich : Ludwig-Maximilians-Universität München, 2024. 130 p.
- [11] Samson C., Koh A. Stress monitoring and recent advancements in wearable biosensors. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. Article 1037. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.01037>.
- [12] Аналіз рівня психофізіологічного навантаження та його наслідків на працівників різних галузей України / Мітіна Н. Б., Когтева О. П., Павлова В. В., Мініна Ю. О. *Сталий розвиток – стан та перспективи* : зб. матер. V Міжн. наук. симпозіум, Львів–Славськ, 21–24 січня 2026 року. Львів: «Камула», 2026. С. 559–562.
- [13] Under pressure: survey reveals European office workers stress landscape. URL: <https://gradius.app/uk/open-reports/under-pressure-survey-reveals-european-office-workers-stress-landscape/> (дата звернення: 10.02.2026).
- [14] Мітіна Н. Б., Герасюк І. С. Дослідження сучасного стану страхування від нещасного випадку та професійних захворювань в Україні. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 4(267–268). С. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.010920.74.657>.
- [15] Смирнова О. В., Мітіна Н. Б., Гармаш С. М. Психофізіологічні фактори небезпек під час навчання в умовах воєнного часу. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 4, т. 10. С. 89–94. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.89.882>.
- [16] Синявський В. Психологічні аспекти безпеки людини в процесі праці. *Journal of Ecology and Health*. 2011. Т. 15, № 6. С. 295–298.
- [17] Martins V., Ferreira V., Guilhem D. Psychophysiological consequences arising from the stress of everyday life and work activities. *Salud Mental*. 2013. Vol. 36. Pp. 141–147.
- [18] Associations of working conditions and chronic low-grade inflammation among employees: a systematic review and meta-analysis / H. C. Kaltenecker et al. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5271/sjweh.3982>.

AN ANALYSIS OF THE LEVEL OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL STRESS AND ITS EFFECTS ON EMPLOYEES IN UKRAINE AND EUROPE

- Mitina N.B.** PhD (Engineering), associate professor, Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of the Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5384-7040>, e-mail: natalimitina0000@gmail.com;
- Kohtieva O.P.** PhD, senior lecturer, Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of the Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7282-8243>, e-mail: olhakohtieva@gmail.com;
- Minina Y.O.** assistant, Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of the Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9555-6471>, e-mail: mininayuliya1985@gmail.com

A healthy nation is a key component of any state, as stated in the Constitution of Ukraine. The concept of health encompasses both a person's physical condition and their mental well-being. Everyone has experienced stress and tension at least occasionally. It is no secret that this is often linked to professional activities and work, and has already been dubbed the 'disease of the century'. The level of mental and physical strain varies depending on occupation, age and gender. Workers all over the world and in every profession experience psychophysiological strain. Work in Ukraine is also associated with additional anxiety and danger, caused by constant alarm signals, explosions and pain. To ensure human safety in the workplace, it is necessary to study the psychological aspects of professions and identify ways to reduce psycho-emotional stress. The aim of this article is to analyse and highlight the issue of psychophysiological stress among workers as an integral component of occupational safety in the workplace. The study employed questionnaire-based methods to collect statistical data and assess the main factors of psychophysiological stress, alongside statistical methods and data analysis using the Excel software package. A statistical correlation was established between the integrated risk indicator and the levels of stress, fatigue and workload; a correlation of $r=0.75$ was also found between stress and cognitive load, indicating their cumulative effect on employees' well-being. Based on the results obtained, the predicted consequences of psychophysiological stress are outlined, including reduced productivity and an increased risk of workplace injuries. The data obtained can be used to improve the occupational health and safety management system and to develop measures for the prevention of injuries and the reduction of psychophysiological stress.

Keywords: psychophysiological strain; psychophysiological factors; stress; mental health; occupational safety; analysis; accident; occupational diseases; work capacity; attention; correlation between stress factors and stress resilience.

References

- [1] N. Gutsuliak, O. Chuyko, and V. Dub, "Stratehii podolannia profesiinoho stresu v upravlinskii diialnosti" ["Strategies for overcoming professional stress in management activities"], *Science and Education*, vol. 1, pp. 47–52, 2024. doi: 10.24195/2414-4665-2024-1-8. (Ukr.)
- [2] Pro systemu okhorony psykhichnoho zdorovia v Ukraini [On the Mental Health Care System in Ukraine], Law of Ukraine no. 4223-IX, Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4223-20#Text>. Accessed on: February 7, 2026. (Ukr.)
- [3] Bilshe nizh dobrobut i turbota pro sebe (More than well-being and self-care). [Online]. Available: <https://www.ipg-journal.io/ua/rubriki/demokratichne-suspilstvo/bilshe-nizh-dobrobut-i-turbota-pro-sebe-1820/>. Accessed on: February 7, 2026. (Ukr.)
- [4] EU PROMENS. [Online]. Available: <https://eu-promens.eu/eu-promens>. Accessed on: February 7, 2026.
- [5] M. P. Leiter, A. B. Bakker, and C. Maslach, Eds., *Burnout at Work: A Psychological Perspective*. London, UK: Psychology Press, 2014. doi: 10.4324/978131589416.
- [6] S. Zoni, and R. G. Lucchini, "European approaches to work-related stress: a critical review on risk evaluation," *Safety and Health at Work*, vol. 3, no. 1, pp. 43–49, 2012. doi: 10.5491/SHAW.2012.3.1.43.
- [7] World Mental Health Day: 29% of EU workers suffer stress, depression or anxiety. [Online]. Available: <https://osha.europa.eu/en/highlights/world-mental-health-day-29-eu-workers-suffer-stress-depression-or-anxiety>. Accessed on: February 7, 2026.
- [8] J. I. Kerr et al., "The effects of acute work stress and appraisal on psychobiological stress responses in a group office environment," *Psychoneuroendocrinology*, vol. 121, article 104837, 2020. doi: 10.1016/j.psyneuen.2020.104837.
- [9] F. Marcatto et al., "Work-related stress risk factors and health outcomes in public sector employees," *Safety Science*, vol. 89, pp. 274–278, 2016. doi: 10.1016/j.ssci.2016.07.003.
- [10] H. C. Kaltenecker, "Working conditions and technostress in the workplace: Physiological and psychological correlates," Ph.D. dissertation, Dept. Human

- Biology, Ludwig-Maximilians-Universität München, Munich, Germany, 2024.
- [11] C. Samson, and A. Koh, "Stress monitoring and recent advancements in wearable biosensors," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 8, article 1037, 2020. doi: 10.3389/fbioe.2020.01037.
- [12] N. B. Mitina, O. P. Kohtieva, V. V. Pavlova, and Y. O. Minina, "Analiz rivnia psykhofiziologichnoho navantazhennia ta yoho naslidkiv na pratsivnykiv riznykh haluzei Ukrainy" ["Analysis of the level of psychophysiological stress and its consequences for employees of various industries in Ukraine"], in *Proc. of the V Int. Symposium «Sustainable development – status and prospects»*, Lviv-Slavsko, January 21–24, 2026, pp. 559–562. (Ukr.)
- [13] Under pressure: survey reveals European office workers stress landscape. [Online]. Available: <https://gradus.app/uk/open-reports/under-pressure-survey-reveals-european-office-workers-stress-landscape/>. Accessed on: February 10, 2026.
- [14] N. B. Mitina, and I. S. Herasiuk, "Doslidzhennia suchasnoho stanu strakhuvannia vid neshchasnoho vypadku ta profesiinykh zakhvoriuvan v Ukraini" ["Study of the current state of accident insurance and occupational diseases in Ukraine"], *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of Prydniprov'ska state academy of civil engineering and architecture*, № 4(267–268), pp. 74–81, 2020. doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010920.74.657. (Ukr.)
- [15] O. V. Smyrnova, N. B. Mitina, and S. M. Harmash, "Psykhofiziologichni faktory nebezpek pid chas navchannia v umovakh voiennoho chasu" ["Psychophysiological factors of dangers during study in war-time conditions"], *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury – Ukrainian magazine of construction and architecture*, № 4, vol. 10, pp. 89–94, 2022. doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.89.882. (Ukr.)
- [16] V. Syniavskyi, "Psykhologichni aspekty bezpeky liudyny v protsesi pratsi" ["Psychological aspects of human safety during work"], *Journal of Ecology and Health*, vol. 15, № 6, pp. 295–298, 2011. (Ukr.)
- [17] V. Martins, V. Ferreira, and D. Guilhem, "Psychophysiological consequences arising from the stress of everyday life and work activities," *Salud Mental*, vol. 36, pp. 141–147, 2013.
- [18] H. C. Kaltenegger, L. Becker, N. Rohleder, D. Nowak, and M. Weigl, "Associations of working conditions and chronic low-grade inflammation among employees: A systematic review and meta-analysis," *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, vol. 47, no. 8, pp. 565–581, 2021. doi: 10.5271/sjweh.3982.

Стаття надійшла 22.02.2026

Стаття прийнята 09.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Мітіна Н.Б., Когтева О.П., Мініна Ю.О. Аналіз рівня психофізіологічного навантаження та його наслідків на працівників в Україні та Європі. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 2. С. 159–166. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359951>.

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 665.754:66.067

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359954

ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ ДВИГУНІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК СУДЕН МОРСЬКОГО ФЛОТУ

Погорлецький Д.С.	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053 , e-mail: dimon150582@gmail.com ;
Грицук І.В.	д-р техн. наук, професор, Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7065-6820 , e-mail: grytsuk_iv@ukr.net ;
Худяков І.В.	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8900-7879 , e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com ;
Філіпішина Л.М.	д-р екон. наук, професор, Первомайський навчально-науковий інститут НУК імені адмірала Макарова, м. Первомайськ, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9552-1367 , e-mail: ontariofilpi@ukr.net ;
Самарін О.Є.	канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2690-7298 , e-mail: samarin162@gmail.com

В статті розглядаються питання та актуальні проблеми, покращення якості очищення важкого суднового палива від каталітичних домішок, які є причиною зносу циліндропоршневої групи, судових двотактних двигунів, за рахунок оптимізації очистки паливної системи та автоматичного керування витратою палива через сепараційну установку. Цілю роботи є демонстрація можливості вдосконалення використовуваних стандартних систем очистки палива (які не мають можливості регулювання витрати палива через сепаратор) двигунів судових енергетичних установок, з метою створення ефективної системи, для покращення процесу очистки важких сортів суднового палива від каталітичних домішок. В результаті аналізу методів та способів покращення очистки важких сортів суднового палива, обґрунтовано доцільність впровадження у існуючі системи паливопідготовки, додаткову систему автоматичного контролю витрати палива через сепараційну установку, в залежності від витрати палива та навантаження суднового двигуна. У роботі запропонований спосіб покращення очистки суднового важкого палива та сформовано структуру модернізованої системи паливопідготовки, яку пропонується використовувати на стандартних системах очистки палива, що не мають можливості регулювання витрати палива через сепаратор та працюють у стандартному виконанні на 100% витрати палива двигуном; досліджено вплив системи автоматичного регулювання продуктивності сепаратора та обрано оптимальний режим роботи сепараційної установки залежно від витрати палива та навантаження суднового двигуна. Дана ситуація спонукає до пошуку альтернативних способів оптимального використання вже використовуваного та встановленого суднового сепараційного обладнання для покращення видалення каталітичних частинок з важкого суднового палива різних марок та захисту судових двигунів від зношування. Безперервне керування потоком – простий та ефективний спосіб забезпечення оптимальної продуктивності сепарації палива та його очистки.

Ключові слова: система паливопідготовки; суднова енергетична установка; очистка палива; каталітичні домішки; експлуатаційні показники.

Постановка проблеми

Сучасний світ стикається з проблемами ефективного користування енергетичними ресурсами та зменшення впливу технологічних процесів в судових енергетичних установках на навколишнє середовище. На морському флоті уваги потребують енергетичні установки через їх енергоспоживання та безпосередній вплив на навколишнє середовище. Один з аспектів оптимізації роботи судових енергетичних установок (СЕУ) є покращення роботи системи паливопідготовки суднового двигуна, яка забезпечує ефективну очистку суднового палива та роботу двигуна зі зниженням витрати палива та викидів шкідливих речовин у

відпрацьованих газах судових двигунів в атмосферу; найсуворіші обмеження стосуються оксидів азоту (NO_x), оксидів сірки (SO_x), які утворюються під час згоряння важких суднових палив.

Залишки каталітичних частинок у судновому паливі є невід'ємною їх часткою, що надходить у двигун, та становлять значну частину зношування компонентів камери згоряння двотактних двигунів. Спроба знизити кількість каталітичних частинок у паливних бункерах згідно зі стандартом ISO 8217:2010/2012 до максимум 60 ppm не призвела до зниження середнього рівня вмісту. Навпаки, ширше використання палива ЕСА призвело до значного збільшення кількості випадків зношення окремих елементів судових двигунів,

пов'язаних з каталітичними частинками. Каталітичні частки (catalytic fines) – це дрібні, дуже тверді частки, що утворюються у процесі нафтопереробки, які, потрапляючи у двигун, викликають зношування за допомогою так званого трикомпонентного стирання. Таким чином, гільзи циліндрів, канавки поршневих кілець та самі поршневі кільця стають найбільш схильними до зносу компонентів двотактних судових двигунів. Каталітичні частинки можуть швидко зношувати двигун, тому рекомендується використовувати систему очищення судового палива для максимального очищення та видалення каталітичних частинок до їх потрапляння у двигун. Необхідно вжити всіх можливих заходів для зниження ризику потрапляння каталітичних частинок до судового двигуна. Рекомендується підтримувати максимально низький рівень каталітичних частинок перед попаданням до двигуна, який становить 15 ppm, прийнятний на короткий період часу. У зв'язку з цим розробка та вдосконалення існуючих систем паливопідготовки для вирішення цих проблем при конструюванні систем СЕУ стає все більш актуальною. Одним з напрямків у цьому питанні постає покращення якості очистки високосірчистих судових палив від каталітичних домішок (вміст каталітичних частинок в бункерному паливі, становить від 0 до 80 ppm Al + Si в стандарті ISO 8217 (2010-2012 років) і від 0 до 60 ppm в новіших версіях ISO 8217) шляхом модернізації існуючих систем очистки палив судових двигунів [1-4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз наявних досліджень щодо очистки та підготовки судових палив (різних видів та марок) перед його спалюванням у камері згоряння судового дизельного двигуна демонструє традиційні методи очистки судового палива, якими є відстоювання, сепарація, фільтрація, призначенням яких є видалення різних механічних домішок, води і золи. Дане завдання було сформовано у результаті аналізу впливу різних шкідливих домішок, які є у судовому паливі, на експлуатаційні показники роботи судового дизельного двигуна та методів і засобів паливопідготовки, які використовуються більшістю СЕУ на судах [1, 3-6].

У цьому випадку забруднюючі частинки в паливі осідають, не стикаючись між собою, і на кожну з них діють сила тяжіння або власна вага, підйомна сила середовища та сила опору середовища.

Відстоювання це найпростіший метод очищення судового палива різних марок, але з бігом часу поступово втрачає своє значення і застосовується переважно для палив з в'язкістю до 20 сСт. На даний час один з загальноприйнятих та використовуваних методів очищення судового палива на судні є сепарація, ефективність очищення даним методом різна з огляду на різні марки судових палив та їхній фракційний склад, а також відрізняється для різних партій палива. Основний вплив на ефективність очищення палива методом

сепарації має груповий склад, співвідношення дистильованих та залишкових компонентів, прийняте при його компаундуванні, і вибраний режим сепарації. Під час сепарації відділення домішок здійснюється за рахунок відцентрової сили [1, 4-9].

Результати досліджень [1-3, 5-7, 10-11] показують, що малов'язке паливо має більший ступінь очищення, ніж високов'язке. Так, вміст механічних домішок при сепарації палив з в'язкістю 50...100 сСт стає меншим на 70...80%, а з 180...380 сСт – на 50...60%, паливо, яке має в'язкість більше ніж 380 сСт, – на 20...40%. Вміст води після процесу сепарації в малов'язких паливах зменшується на 100%, середньо в'язких – на 95...100%, а високов'язких – на 75...85%. Приведені значення зниження наявності механічних домішок і води у судовому паливі, супроводжуються втратою паливної частини самого палива, а саме важких компонентів (смола та асфальтени). Дані втрати мають можливість досягати 2...3%, знижуючи теплотворну здатність палива (яка зазвичай становить близько 40–42 МДж/кг), що є суттєвим недоліком сепарації [2-3, 8, 11-12]. Сепарація середньо та високов'язких судових палив загалом проводиться при підігріві у проміжках 80...92°C, що супроводжується посиленням окисних процесів, за рахунок чого підвищується вміст смолистих речовин [2-4, 6, 10]. Очищення палива шляхом фільтрації здійснюється по всьому шляху його прямування з танків до двигуна. Засоби фільтрації палива при цьому діляться на дві основні групи: фільтраційні установки, що самоочищаються, та паливні фільтри [2, 6, 10-11].

В системах паливопідготовки на судні, наряду з загальноприйнятими, використовують альтернативні методи та способи очистки палива для забезпечення збільшення якості високосірчистих палив. До них належить гомогенізація, застосування водопаливних емульсій та присадок в суднове паливо. Суттєвий внесок у розвиток гомогенізації палива та застосування в судових умовах внесла школа українських вчених, яку очолював професор Фомін Ю.Я. Основним завданням, рішення якого забезпечувалося під час гомогенізації судового палива, є збереження теплотворної здатності судових палив, важке суднове паливо (HFO, IFO 380) має теплотворність 40,5...41,0 МДж/кг, дизельне паливо (MGO/MDO) – 42,5...43,5 МДж/кг, це забезпечує енергію для судових двигунів. Широкого застосування у СЕУ гомогенізатори так і не набули, хоча й виготовлялися у малих серіях вітчизняними і зарубіжними виробниками [1, 4, 7-8]. Присадки до судових палив також не знайшли широкого застосування та у більшості використовуються фірмами, які їх виготовляють та мають у власності судна морського флоту різного призначення [1-3, 9, 11-12]. За рахунок використання паливних присадок покращується процес згоряння судового палива у двигуні, але вплив на зношення циліндро-поршневої групи (ЦПГ) та економічні і екологічні експлуатаційні показники роботи судового дизеля є досить неоднозначними.

Ультразвукова обробка суднового палива також розглядалася як варіант модернізації систем паливопідготовки СЕУ [1, 6, 10-11, 13-14]. Даний вид паливопідготовки суднового палива СЕУ розглядався за рахунок створення стійких сумішей палив, які мають різну щільність і структурний склад, його застосування для зниження концентрації сірковмісних компонентів з паралельним впливом на корозійне зношування і екологічні параметри роботи суднового дизельного двигуна під час його експлуатації не вивчалися.

Незважаючи на дослідження, проведені окремими науковими співробітниками й організаціями, більшість із яких стосується оптимізації використання стандартних способів паливопідготовки, не виконано глибокого аналізу альтернативних способів удосконалення систем паливопідготовки суднових двигунів у цілому.

Мета статті

Дослідження присвячене огляду особливостей експлуатації та покращенню існуючих систем паливопідготовки. Воно полягає в тому, щоб продемонструвати операції щодо покращення процесу очистки суднового палива, яке використовується головною енергетичною установкою судна, за рахунок модернізації системи паливопідготовки. Одним з напрямків удосконалення системи паливопідготовки двигунів СЕУ є інтеграція в їх конструкцію сучасних технологій, які дозволяють підвищити адаптованість до умов експлуатації СЕУ, покращать очистку важкого палива від каталітичних частинок і покращать продуктивність самої системи. Розглянуто можливості вдосконалення існуючих систем паливопідготовки двигунів СЕУ з урахуванням простоти експлуатації, економічності та сумісності з існуючими системами очистки палива енергетичних установок суден.

Виклад основного матеріалу

Доволі багато наукових та експлуатаційних джерел вказують на збільшення концентрації каталітичних частинок у важкому судновому паливі, яке використовується більшістю суднових двигунів [1, 6, 7, 9-10, 15]. DNV Petroleum Services (DNVPS) підтверджує ці твердження, на рис. 1 приведено концентрації каталітичних частинок різних марок суднового палива. З огляду на природоохоронне світове законодавство було збільшено попит на використання низькосірчистих видів суднових палив. Це спонукало світові нафтопереробні заводи збільшити виробництво сумішей важкого та дизельного суднового палива, але, як відомо, сам процес змішування палив є одним з джерел появи каталітичних частинок у суднових паливах. Спочатку зони емісійного контролю впровадили саме в Північній Європі з 2006...2007 років. Дана тенденція спостерігається при зміні правил та появи нових Зон емісійного контролю. Легші марки суднового палива характеризуються меншою концентрацією каталітичних частинок

проти інших важких марок палива (HFO – Heavy Fuel Oil чи судновий мазут) з більшою в'язкістю. Найпоширеніша марка палива RMG 380 сСт або (IFO 380) містить у своєму складі каталітичні частки у діапазоні 1...110 ppm Al+Si, а RMG 700 (Residual Marine Grade) до 400 ppm Al+Si [1-3, 5-6, 8-9, 11]. Концентрація каталітичних частинок більша у марках суднових палив, які мають більш високу в'язкість.

Каталітичні частинки є дуже твердими частинками, які зазвичай складаються зі сполук кремнію та алюмінію. Їхня присутність у судновому паливі є наслідком каталітичного крекінгу.

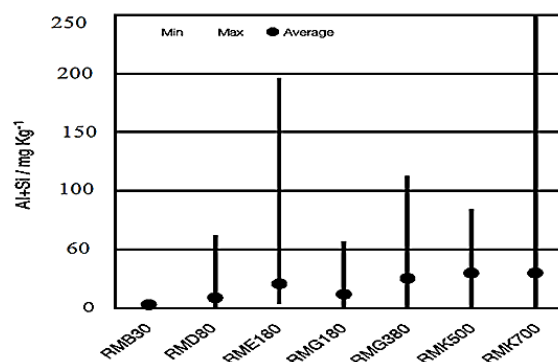


Рис. 1 – Середній показник концентрації каталітичних частинок різних марок суднового палива

Присутність каталітичних частинок небажана, оскільки вони можуть спричинити важке абразивне зношування деталей двигуна, якщо їх не видалити з допомогою системи підготовки палива типу – Alfa Laval AB, BP Marine Ltd & MAN B&W Diesel A/S, або інших. Концентрація частинок вимірюється у частинах на мільйон (ppm). Каталітичні частинки утворюються в результаті розпаду каталізатора, головним чином через абразивне зношування в процесі рециркуляції каталізатора в установці для каталітичного крекінгу. Існують дві причини, що зумовлюють необхідність визначати концентрацію каталітичних частинок у нафтовому паливі. По-перше, необхідно перевірити, чи відповідає перероблена нафта стандарту палива ISO 8217 і, відповідно, чи вона має прийнятний рівень вмісту каталітичних частинок. Другою причиною є необхідність забезпечити постійне підвищення якості палива, що використовується на борту судна, та мінімізувати знос деталей двигуна [1, 6, 10]. ISO 8217 є загальноприйнятим стандартом якості палива. Нова версія стандарту обмежує концентрацію каталітичних частинок у нафтовому паливі, що є на ринку, до 60 ppm Al+Si (алюміній плюс кремній). Виробники морських двигунів в даний час передбачають концентрацію 15 ppm як максимально допустимий рівень вмісту каталітичних частинок в паливі до впорскування. Тому перед тим, як паливо надійде в двигун, необхідно провести належні процедури підготовки палива на борту судна, включаючи сепарацію та фільтрацію, що дозволить знизити

рівень вмісту каталітичних частинок. ISO 10478 є стандартизованим методом визначення вмісту алюмінію та кремнію в нафтовому паливі. Вимір вмісту каталітичних частинок як частина звичайних процедур, що проводяться на судні, є відносно новою, але дуже актуальною концепцією з урахуванням недавнього збільшення частоти негативних наслідків присутності каталітичних частинок у паливі. Незважаючи на те, що неозброєним оком каталітичні частинки практично неможливо побачити, вони досить тверді, щоб сильно пошкодити металеві поверхні двигуна (Alfa Laval, MAN B&W Diesel, 2008) [8, 11-12]. Усі каталітичні частинки, що залишилися в паливі після його очищення у сепараторі, можуть спричинити абразивне зношування та пошкодження двигуна, що може призвести до втрати ефективності роботи та створити небезпечні умови експлуатації. Ось чому вміст каталітичних частинок має бути знижено настільки, наскільки це можливо, за рахунок системи паливопідготовки. Абразивні частинки, потрапляючи в камеру згоряння двотактних двигунів, викликають знос. Тут вони можуть застрягати між поверхнями ковзання, наприклад, між поршневим кільцем і гільзою циліндра або між поршневим кільцем та канавкою кільця.

Досвід показує, що навіть дуже невелика кількість каталітичних частинок може бути шкідливою для двигуна. Тому необхідно вжити всіх заходів для зниження ризику потрапляння каталітичних частинок у двигун. Рекомендується підтримувати максимально низький рівень каталітичних частинок перед подачею до двигуна. Максимальний рівень 15 ppm прийнятний протягом короткого періоду часу, але нормальний рівень має бути нижчим 5 ppm.

Розробники двигунів стверджують, що каталітичні частинки розміром менше ніж 4 мкм є менш шкідливими, ніж великі частинки (СІМАС, Документ № 51, 2013). Проте що вища концентрація каталітичних частинок, то вище ризик створення небезпечних умов роботи. Двигуни, які страждають від високого вмісту каталітичних частинок, швидше за все, вимагатимуть більш частого технічного обслуговування, при цьому підвищується ризик їх ушкодження. Низький рівень вмісту каталітичних частинок можна досягти, постійно забезпечуючи високий рівень очищення палива [1, 6, 8-10, 12, 14]. Наприклад, при бункеруванні палива з вмістом Al+Si 80 ppm його необхідно очистити на борту до 15 ppm, а при бункеруванні палива з вмістом Al+Si 30 ppm – до 6 ppm,

Системи очищення палива на судах складні та вимагають пильної уваги. Важливо, щоб вони були спроектовані та виготовлені таким чином для забезпечення кращого очищення суднового палива. У деяких випадках виявляється, що встановлений паливний сепаратор і підігрівач дуже малі, подача пари в обігрівач обмежена або регулювання температури відбувається дуже повільно. Усі ці фактори знижують ефективність очищення палива [1-6, 8-10, 14]. Система очищення повинна бути спроектована для оптимальної роботи як за

високих, так і за низьких витрат при стабільно високих температурах.

Різні он-лайн системи діагностики, такі як Kittiwake LinerScan та NanoNord Catguard, попереджають про підвищений знос та високий вміст каталітичних частинок. У поєднанні з підвищенням обізнаності та навчанням машинної команди, а також моніторингом та оптимізацією роботи сепараторів, ризик зносу двигуна, спричиненого каталітичними частинками, може бути значно знижений. Крім того, для задоволення потреб в оптимальному очищенні палива можливе використання розробленої системи покращення процесу сепарації, а саме нове компонування бортової системи паливопідготовки та підвищення ефективності роботи сепаратора [1, 3-6, 10, 13, 16-17]. У зв'язку зі зростанням числа випадків пошкодження двигунів через каталітичні частинки організація PrimeServ компанії MAN Diesel & Turbo (MDT) створила «функцію з усунення несправностей, пов'язаних з каталітичними нейтралізаторами», яка пропонує послуги з дослідження стану циліндрів на борту, включаючи проведення лабораторного аналізу пошкоджених поверхонь гільз циліндрів та поршневих кілець [2-6, 10-13].

В роботі для підтвердження запропонованої модернізації системи паливопідготовки використано представлені дослідження, які було проведено підрозділом PrimeServ компанії MAN Diesel & Turbo (MDT). Було проведено багато досліджень, за рахунок яких можливо здобути більш детальні знання про зв'язок між затримкою дрібних каталітичних частинок на деталях двигуна та випадків їх пошкоджень [2, 4, 6, 10]. Каталітичні частки легко розпізнаються в лабораторних умовах за допомогою стереомікроскопа, який надає можливість виміряти розмір кожної з частинок на поверхні деталі (рис. 2).

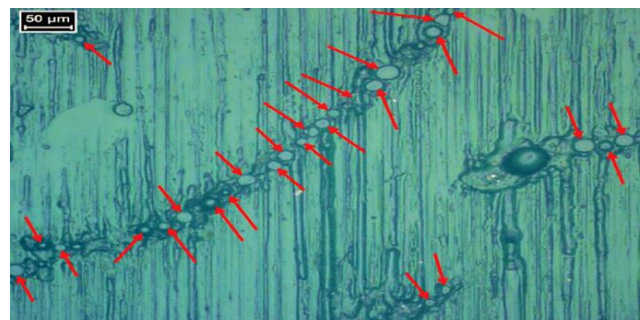


Рис. 2 – Фото каталітичних часток на поверхні гільзи циліндрів

Згідно досвіду, менше ніж 200 каталітичних частинок на см^2 , які є на поверхні гільзи циліндрів, є нормальним та нешкідливим рівнем. Якщо буде збільшення більш 200 каталітичних часток на см^2 (CF/cm^2), збільшиться швидкість зносу. Якщо вміст каталітичних частинок більше, ніж 1000 на см^2 (CF/cm^2), результатом є надмірний знос гільзи циліндрів та знос поршневих кілець протягом кількох днів. У крайніх

випадках було виявлено понад 5000 на cm^2 (CF/cm^2) [2-3, 6, 10-11].

За три роки роботи під час пошуків та усунення несправностей, пов'язаних з каталітичними домішками, служба MDT's PrimeServ була задіяна загалом 226 разів на суднах для діагностики стану циліндрів, через високий знос та поломку поршневих кілець. З вини неякісного палива та можливого відкладення каталітичних домішок. Лише у 16% цих випадків у гільзі циліндрів було виявлено менше 200 CF/cm^2 . Був зроблений висновок, що каталітичні дрібні частинки не були причиною проблем зі станом циліндрової втулки. Але у 59% випадків вкраплення каталітичних дрібних частинок перевищували 200 CF/cm^2 , а в середньому становили 1400 CF/cm^2 . В решті 25% цих випадків було виявлено каталітичну частинку, але водночас мікроструктура поверхні з закритим графітом через подрипини, що є цілком нормальним непрямим ушкодженням під впливом каталітичних частинок [2, 3, 6, 10]. Це означає, що каталітичні частинки були задіяні у 190 з 226 випадків або у 84% усіх випадків. Іншими словами, каталітичні частинки складають значну частину висвітлених випадків високого зносу гільз циліндрів. Оскільки дані базуються на випадках усунення несправностей, що виникають через високий знос, поломку поршневих кілець, невідповідність палива специфікації, результати нічого не говорять про те, якою мірою каталітичні частинки сприяють прийнятним або

дещо підвищеним рівням зносу. Звичайно, знос від дрібних каталітичних частинок не є постійним процесом, він пропорційний вмісту дрібних каталітичних частинок в паливі, яке потрапляє до камери згоряння двигуна [2-3, 6, 10, 13].

Пошкодження від дрібних каталітичних частинок рідко є результатом роботи на неякісному паливі. Більшість сортів палива, що постачаються на судна, відповідає вимогам специфікації ISO 8217. Дрібні каталітичні частинки мають тенденцію осідати в танках та можуть потрапляти в двигун у високих концентраціях під час хитавиці або за непогоди. Таке явище може призвести до пошкодження суднового двигуна внаслідок потрапляння дрібних каталітичних частинок. Знос від каталітичних частинок можна легко виявити, вимірявши вміст заліза у відібраному маслі з циліндрів. Вміст заліза у відібраному маслі з працюючих циліндрів зазвичай становить від 100 до 200 mg/kg . У разі сильного ураження каталітичними частинками вміст заліза може зрости до 1000...2000 mg/kg [2-3, 6, 10].

На рис. 3 продемонстровано графічне зображення впливу каталітичних частинок на судновому двигуні MAN-B&W серії ME, задокументований з допомогою обладнання Kittiwake LinerSCAN, яке вимірює вміст частинок заліза. Зверніть увагу, що до впливу каталітичних частинок рівень заліза був нижче 100 mg/kg . Під час дії він досягнув піку понад 2500 mg/kg [2-3, 6, 10, 12].

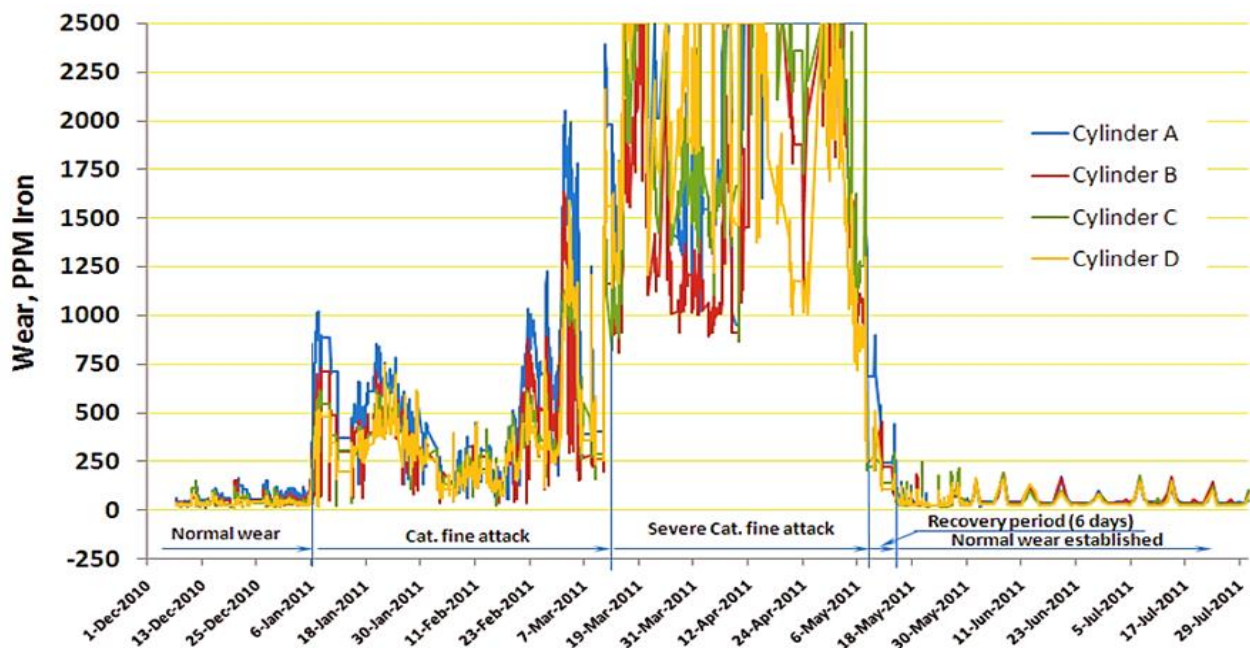


Рис. 3 – Вплив каталітичних частинок на судновому двигуні MAN-B&W S типу ME, виявлене за допомогою обладнання Kittiwake LinerSCAN

Чим менші дрібні каталітичні частинки, тим важче їх відокремити від суднового палива за допомогою сепараторів. Мінімальна товщина масляної плівки між

поверхнею гільзи циліндрів та поршневими кільцями у верхній мертвій точці (ВМТ) становить до 0,5 μm .

Отже, дуже дрібні каталітичні частинки, що потрапляють між поршневим кільцем та гільзою циліндра,

сприятимуть зносу в зоні ВМТ. Для перевірки даних результатів спеціалісти MAN Diesel & Turbo (MDT) додали через продувочні вікна двигуна 4T50ME дрібні тверді частинки оксиду кремнію (1,4 та 8 мкм) та виміряли результуючий знос, згідно наявності продуктів зносу в злитому маслі. Для випробувань були обрані частинки SiO_2 , тому що вони майже ж такі тверді, як дрібні каталітичні частинки, та мають чітко виражену форму і розподіл розмірів. Результати випробування наведено в таблиці 1. Вміст заліза у зразках відібраного масла було проаналізовано за допомогою ICP (Inductive Coupled Plasma, індуктивно зв'язаної плазми) після озолення та кислотного розкладання зразка [2-3, 6, 10, 12-13, 17].

Таблиця 1

Результати тесту ICP

Розмір частинок SiO_2	Залізо (Fe), виміряне у відібраному циліндровому маслі за допомогою ICP (Inductive Coupled Plasma)
без частинок SiO_2	52
1 мкм	60
4 мкм	117
8 мкм	415

Результати показують нормальний рівень кількості заліза у відібраному маслі з циліндрів при введенні частинок SiO_2 розміром 1 мкм через продувне повітря та значне збільшення вмісту заліза при введенні частинок SiO_2 розміром 4 мкм та 8 мкм. Ці результати показують, що суднове паливо, яке надходить до двигуна, також має бути очищено від дуже дрібних каталітичних частинок. Збільшення вмісту каталітичних домішок у паливі спостерігалось після впровадження європейських зон ECA, і така ж тенденція спостерігалася у 2012 році та далі при поставках важкого палива з США. Паливо з високим вмістом каталітичних домішок можна знайти у всіх марках важкого палива. Однак у середньому легші марки палива мають нижчу концентрацію каталітичних частинок порівняно з марками з вищою в'язкістю. Варто зазначити, що близько 40% найпопулярнішої марки палива RMG380 містить каталітичні частинки у діапазоні 21...40 мг/кг Al+Si, а близько 20% палива марки RMG380 містять 41...80 мг/кг Al+Si [1, 4, 6, 10, 12, 13, 17].

Беручи до уваги проведені дослідження і отримані результати, існує гостра потреба в покращенні ефективності очищення важкого палива на борту судна через зростання кількості каталітичних частинок у важкому паливі та збільшення кількості зареєстрованих випадків пошкодження суднових двигунів. Загальна ефективність очищення на сучасних судах часто виявляється занадто низькою. Вимога MDT наполягає, що система очищення повинна бути здатною знизити вміст каталітичних частинок Al+Si з 80 мг/кг у бункерному паливі до максимуму 15 мг/кг перед подачею до двигуна. Вміст каталітичних частинок Al+Si у

бункерному паливі з вмістом менше 80 мг/кг має бути знижено перед подачею до двигуна. Це означає, що загальна ефективність очищення має становити щонайменше 80...85% [3, 6, 10, 13-15, 17].

Дослідження, які проводяться компанією DNV Petroleum Services з 2009 року по теперішній час, на основі отриманих результатів перевірки паливної системи (FSC), показали, що в середньому системи очищення суднового палива видаляють 72% каталітичних частинок з палива, яким букерується судно. З огляду на ці дані необхідно приділяти більше уваги системі очищення палива на борту судна та вдосконалювати її загалом [2-4, 6, 10, 17]. Було зроблено висновок при опрацюванні отриманих даних про те, що для підвищення ефективності очищення важкого палива від каталітичних частинок на судні необхідно враховувати три основні фактори: температура сепарації; витрати через сепаратор; експлуатація та конструкція паливних танків. Підвищення температури важкого палива, що проходить через сепаратор, призведе до зниження його в'язкості, що позитивно позначиться на ефективності проведеної сепарації. Наприклад, для важкого палива з в'язкістю 37,5 мм²/с при 98°C підвищення температури до 120°C призведе до збільшення в'язкості до 18,8 мм²/с. Це значне зниження в'язкості призведе до значного полегшення відокремлення каталітичних частинок від важкого палива [1-8, 10-11, 18].

З огляду на можливість регулювання витрати палива через паливний сепаратор, який у стандартному виконанні розрахований на 100% витрати палива двигуном і має постійні значення для різних запасів суднового палива, слід зазначити, що у сучасних умовах експлуатації суднових двигунів, які рідко працюють на 100% навантаження, зменшення витрати палива під час його проходження через сепаратор (контроль і регулювання витрати палива) відносно витрати палива судновим двигуном дозволить підвищити ефективність роботи сепараційної установки, оскільки паливо у сепараторі знаходиться довше та сепаруватиметься краще. Оскільки сьогодні судна переважно рухаються на малих швидкостях, існує потенціал для збільшення ефективності сепарації суднового палива за рахунок застосування автоматичного керування потоком залежно від фактичної витрати палива двигуном.

Використання систем онлайн-моніторингу і виявлення каталітичних частинок відкриває можливості для покращення контролю та оптимізації роботи бортових суднових систем паливopідготовки [4, 6, 9-10, 12, 17-19].

Ситуація, яка склалася на даний час з оптимізацією та покращенням способів очистки суднового палива, спонукає до пошуку нових методів очистки та оптимального використання вже встановленого суднового сепараційного обладнання для покращення видалення каталітичних частинок з важкого палива та захисту суднових двигунів від зношування. Безперервне керування потоком – простий і ефективний спосіб для підтримання оптимальної продуктивності сепарації

під час очистки та підготовки палива перед подачею його до камери згоряння двигуна. Беручи до уваги, що більшість суден постійно не працюють на максимально допустимій швидкості, існує можливість знизити витрати та збільшити ефективність сепарації судового палива на судні під час експлуатації.

Сьогодні рекомендується використовувати всю встановлену продуктивність відцентрових сепараторів та паралельно запускати резервні сепаратори; ручне керування потоком інколи використовується. Системи автоматичного керування потоком відцентрового сепаратора досі рідкісні, ведуться роботи з проектування даних систем, які автоматично регулюють витрату сепаратора в залежності від навантаження двигуна [1, 9-12, 15, 17-18]. У даній роботі, з огляду на розглянуті особливості та приведені результати досліджень різних судових організацій, пропонується приклад модернізації системи паливопідготовки за рахунок

застосування системи керування насосами з частотно-регульованим приводом на лінії судової паливопідготовки, що дозволяє відрегулювати витрату палива, яке проходить через сепараційну установку, відповідно до фактичного навантаження на судовий двигун; її можливо використовувати на стандартних паливних сепараційних установках для покращення очистки палива від каталітичних частинок.

Частотно-регульований привід використовується для керування швидкістю електродвигуна паливного насоса, що дозволяє проводити регулювання подачі відповідно до фактичного навантаження двигуна. Під час регулювання фіксованої витрати, при якій потік перекривається, застосування змінної витрати зменшує енергоспоживання насоса, а також сепараційної установки. Регулювання витрати двигуна, працюючого на 75% навантаження, збільшить ефективність сепарації (рис. 4).

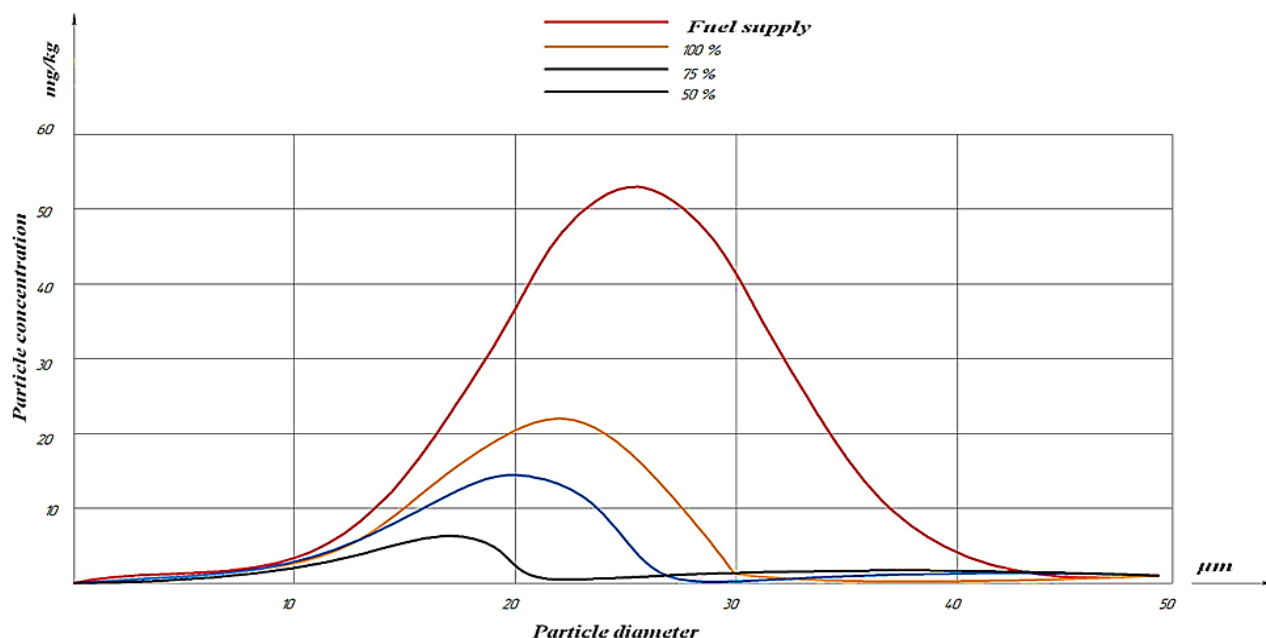


Рис. 4 – Вплив витрати на ефективність сепарації палива

Для покращення роботи системи паливопідготовки та процесу сепарації палива пропонуємо модернізувати режим подачі палива до сепараційної установки під час її експлуатації. Зменшення та утримання на даному рівні подачі палива до сепараційної установки є гарним рішенням для підтримання більш ефективного режиму сепарації важких сортів судового палива. Ця вимога конструктивно виконується за рахунок встановлення додаткового насоса на лінії паливопроводу, біля відстійної цистерни з змонтованим регульованим клапаном. Згідно економічних міркувань система є недоцільною через те, що насос працює з повною продуктивністю та потужністю. Існує спосіб регулювання та керування подачею палива до сепараційної установки за рахунок зменшення продуктивності самого

насоса, що призводить до зменшення його потужності. Максимальна продуктивність сепаратору у відсотках від номінального значення приведена в таблиці 2.

В системі паливопідготовки судового двигуна MAN-B&W 6S80ME-C встановлено сепараційні установки фірми Alfa-Laval типу S816 [1, 4, 6-8, 10, 15-18], які не обладнані системою регулювання подачі палива до сепаратора залежно від потреби палива судовим двигуном.

Пропонується застосування частотно-регульованого приводу для керування подачею палива до сепараційної установки під час її експлуатації з необхідною продуктивністю для надання таких переваг:

- зменшення утворення відстою у судових цистернах запасу палива;

- підвищення гнучкості роботи сепараційної установки, допускається очищення палива густиною 1010 кг/м^3 при 15°C та в'язкістю 700 сСт ;

- зменшується трудомісткість обслуговування сепараційної установки та системи у цілому;

- зменшується виникнення аварійних сигналів, відсутній водяний затвор;

- збільшується теплота згоряння палива, підвищується економічність використання головного та допоміжних суднових двигунів;

- керування насосами згідно фактичної їх потреби покращує енергоспоживання. За рахунок зменшення швидкості на 20% зменшується енергоспоживання вдвічі.

Пропонується встановлення частотного перетворювача (регулятора) виконати згідно приведеної схеми (рис. 5).

Таблиця 2

Рекомендована продуктивність сепаратора

В'язкість сСт при 50°C	Максимальна продуктивність, у % від номінальної	Температура сепарації, $^\circ\text{C}$
30	62	90...98
40	62	85...98
60	47	85...98
100	45	90...98
180	31	90...98
380	26	98
460	22	98
600	18	98

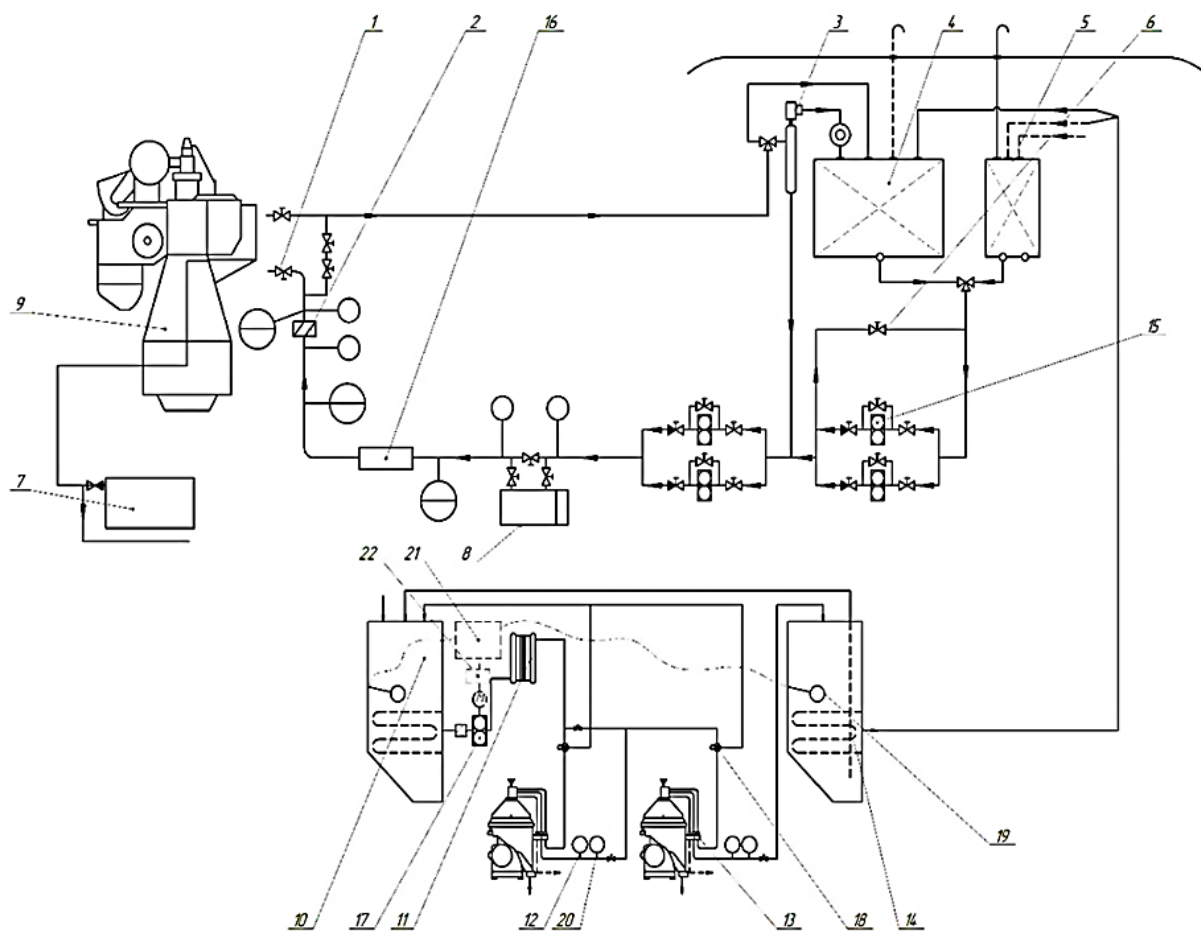


Рис. 5 – Паливна система суднового двигуна: 1 – клапан з дистанційним керуванням; 2 – фільтр паливний; 3 – деаерційний клапан; 4 – розвідна цистерна важкого палива; 5 – розвідна цистерна дизельного палива; 6 – клапан; 7 – дренажна цистерна; 8, 11 – підігрівач; 9 – головний судновий двигун; 10 – відстійна цистерна; 12 – манометр; 13 – сепараційна установка; 14 – розвідна цистерна; 15 – насос; 16 – вискозиметр; 17 – насос; 18 – регулювальний клапан; 19 – датчик рівня палива; 20 – температурний датчик; 21 – система контролю рівня палива; 22 – частотно-регульований привід

Керування частотно-регульованим приводом насоса відбувається за допомогою датчика рівня А2, який знаходиться у витратній цистерні, та алгоритму необхідної продуктивності сепаратора, запрограмованого у частотному перетворювачі, залежно від положення датчика рівня рідини палива. Залежно від положення датчика рівня у паливній витратній цистерні частотний перетворювач програмується згідно продуктивності сепаратору від 18% до 100%. Продуктивність сепаратора залежно від виду палива (в'язкості палива) наведена у табл. 2. Це необхідно для забезпечення режимів роботи сепаратора залежно від потужності головного двигуна. Частотно-регульований привід орієнтується на показники датчика рівня у витратній цистерні, необхідності його під'єднання до блоку керування головним двигуном немає. Це надає можливість реалізації даної модернізації на двигунах різних типів, з електронним керуванням чи з аналоговим. Звідси висновок, що система паливopідготовки є незалежною від самого двигуна. Алгоритм роботи системи представлено у вигляді таблиці 2, де наведено продуктивність сепаратора в залежності від положення датчика рівня палива у витратній цистерні («MAX» та «MIN»).

Частотно-регульований привід має можливість аварійного запуску і зупинки, за рахунок цього забезпечується надійність роботи паливного сепаратора у випадку порушення показників датчика рівня.

Використання системи керування насосами з частотно-регульованим приводом на паливній лінії дозволяє відрегулювати витрату палива у паливних сепараторах згідно навантаження суднового двигуна. Під час зниження подачі палива до сепараційної установки поділ фракцій стає більш ефективним, менше енергії споживається подаючими насосами і самими сепараторами. Ефективність сепарації збільшується, тому що паливо в барабані сепаратора залишається довше, це дозволяє відокремлювати частки з нижчою швидкістю осадження з нафтопродуктів [1, 2, 5-6, 10, 12, 16-18].

Додатковим параметром, який може бути змінений під підвищення ефективності сепарації палива, є в'язкість нафтопродукту [3, 4, 6]. У міру підвищення температури палива його в'язкість зменшується. Якщо температура знижується до 90°C, витрата палива повинна знизитися до 72% номінальної витрати, для підтримання ефективності сепарації на тому ж рівні, при 98°C, а за досягнення температури 85°C витрату необхідно буде понизити до 50%.

На рис. 6 продемонстровано режим роботи паливної сепараційної установки до модернізації і після. Показано режим максимальної продуктивності паливного сепаратора після модернізації, а також приведені поле режимів роботи паливного сепаратора; для наочності додано графічні дані витрати палива головним двигуном на різних режимах.

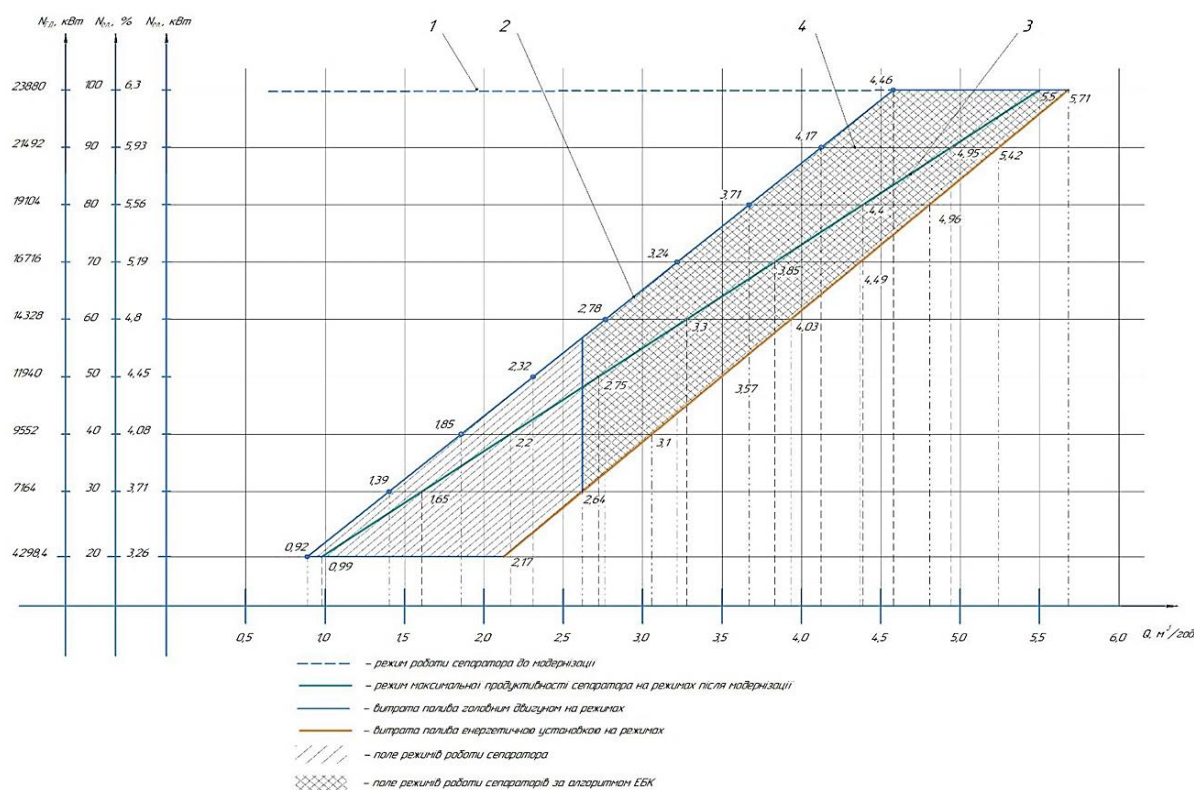


Рис. 6 – Результати розрахунків потужності електродвигуна в залежності від необхідної продуктивності паливного сепаратора: 1 – режим роботи сепаратора до модернізації; 2 – режим максимальної продуктивності сепаратора на режимах після модернізації; 3 – поле режимів роботи сепаратора; 4 – витрата палива головним двигуном на режимах

Використання частотно-регульованого приводу, а також можливість вибору оптимального режиму роботи сепаратору, дозволить:

- покращити якість сепарації різних сортів суднового палива;
- збільшити гнучкість роботи сепараційних установок під час очистки різних сортів суднового палива;
- зменшити витрату електроенергії на систему паливопідготовки;
- частотно-регульований привід дозволяє керувати електродвигуном насоса для регулювання подачі відповідно до навантаження суднового двигуна;
- зміна витрати суднового двигуна, працюючого на 75% свого навантаження, збільшить якість очистки суднового палива різних сортів.

Висновки

Розглянуто загальноприйняті технологічні засоби, які застосовуються для очистки важкого палива від каталітичних домішок у системах паливопідготовки суднових двигунів. Досліджено основні вимоги до систем паливопідготовки двигунів суднових енергетичних установок в різних умовах експлуатації та проведено аналіз існуючих методів та способів очищення важкого суднового палива від каталітичних домішок для його використання в судновій енергетичній установці. Запропоновано концептуальний проєкт для вдосконалення існуючих систем паливопідготовки двигунів суднових енергетичних установок з урахуванням простоти експлуатації, економічності та сумісності з існуючими системами очищення палива енергетичних установок суден морського флоту, що демонструє можливість підвищення ефективності експлуатації системи паливопідготовки та покращення сепарації важкого палива для зменшення кількості каталітичних частинок, які містяться у важкому паливі. Доведено, що безперервне керування витратою це простий та ефективний спосіб забезпечення оптимальної продуктивності сепарації важкого палива. Враховуючи те, що судна не завжди працюють на максимально допустимій швидкості, а також проєктній швидкості, це дозволить знизити витрату та підвищити ефективність сепарації палива.

Перелік використаних джерел

- [1] Особливості експлуатації лубрикаторної системи мащення суднових малооборотних двигунів / Погорлицький Д. С., Грицук І. В., Худяков І. В., Самарін О. Є. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 48. С. 167-178. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310707>.
- [2] SL2017-638. Cylinder Liner Life. Integrated Cylinder Lubricant Feed Rate. MAN B&W Two-stroke Engines : Service Letter / MAN Energy Solutions. 2017. 11 p. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2017-638.pdf?sfvrsn=607695b4_4 (дата звернення: 09.12.2025).
- [3] MAN B&W S80ME-C8.2-GI IMO Tier II : Project Guide. Edition 0.5. Copenhagen : MAN Diesel & Turbo, 2014.
- [4] Bashan V., Demirel H., Celik E. Evaluation of critical problems of heavy fuel oil separators on ships by best-worst method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2022. Vol. 236, iss. 4. Pp. 868-876. DOI: <https://doi.org/10.1177/14750902221097268>.
- [5] Особливості використання датчика концентрації заліза у маслі для безперервного моніторингу технічного стану суднового дизельного двигуна / І. В. Худяков та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 46. С. 114-121. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288180>.
- [6] Onboard Fuel Oil Cleaning, the ever neglected process. How to restrain increasing Cat-fine damages in two-stroke Marine Engines / H. Rolsted, C. Rojgaard, O. Jensen, M. Englund. URL: <https://nanonord.com/wp-content/uploads/2023/08/onboard-fuel-oil-journal.pdf> (дата звернення: 18.12.2025).
- [7] The Standard. A Master's Guide to: Using Fuel Oil Onboard Ships. ABS, 2012. 74 p.
- [8] ISO 8217:2017. Petroleum products – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels. Sixth edition. 2017. 23 p.
- [9] Sagin S. V., Solodovnikov V. G. Cavitation treatment of high-viscosity marine fuels for medium-speed diesel engines. *Modern Applied Science*. 2015. Vol. 9. No. 5. Pp. 269-278. DOI: <https://doi.org/10.5539/mas.v9n5p269>.
- [10] ISO 8217:2024. Products from petroleum, synthetic and renewable sources – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels. Seventh edition. 2024. 52 p.
- [11] The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook : Technical reference booklet. 2018 Edition. URL: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/refuel/Bluebook_en.pdf (дата звернення: 09.11.2025).
- [12] Особливості протидії низькотемпературній корозії гільзи циліндрів суднових малооборотних двигунів / Д. С. Погорлицький та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 46. С. 122-130. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288181>.
- [13] CIMAC: Guideline for the Operation of Marine Engines on Low Sulphur Distillate Diesel. 2013. 23 p.
- [14] Sagin S. V., Semenov O. V. Motor oil viscosity stratification in friction units of marine diesel motors. *American Journal of Applied Sciences*. 2016. Vol. 13. No. 2. Pp. 200-208. DOI:

<https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.200.208>.

- [15] Солодовніков В. Г. Вплив сірчистих сполук палива на робочий процес суднових дизелів. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : зб. матер. III Міжнар. наук.-техніч. конфер., м. Миколаїв, 19-21 листопада 2014 р.

- [16] Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations onboard ships: The case of HFO purifier overhauling / Kandemir C., Celik M., Akyuz E., Aydin O. *Applied Ocean Research*. 2019. Vol. 88. Pp. 317-325. DOI:

<https://doi.org/10.1016/J.APOR.2019.04.019>.

- [17] Сагін С. В., Заблоцький Ю. В. Використання паливних присадок у суднових дизелях. *Суднові енергетичні установки*. 2012. № 30. С. 180-186.

- [18] Chybowski L., Myśków J., Kowalak P. Analysis of fuel properties in the context of the causes of three marine auxiliary engines failure – a case study. *Engineering Failure Analysis*. 2023. Vol. 150. Article 107362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2023.107362>.

IMPROVEMENT OF THE FUEL PREPARATION SYSTEM OF ENGINES OF POWER PLANTS OF NAVY VESSELS

Pohorletskyi D.S.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053 , e-mail: dimon150582@gmail.com ;
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 ;
Khudiakov I.V.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8900-7879 , e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com ;
Filipishyna L.M.	D.Sc. (Economic Sciences), professor, Pervomaïsk Polytechnic Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding (NUS), Pervomaïsk, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9552-1367 , e-mail: ontariofilpi@ukr.net ;
Samarin O.E.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2690-7298 , e-mail: samarin162@gmail.com

This article examines issues and current challenges related to improving the quality of heavy marine fuel purification by removing catalytic impurities – which cause wear in the cylinder-piston group of marine two-stroke engines – through the optimization of the fuel system and automatic fuel flow control via a separation unit. The objective of this work is to demonstrate the possibility of improving the standard fuel purification systems currently in use (which lack the ability to regulate fuel flow through a separator) in marine power plant engines, with the aim of creating an effective system to enhance the purification process of heavy marine fuels from catalytic impurities. As a result of analyzing methods and approaches to improving the purification of heavy marine fuels, the feasibility of introducing an additional system for automatic control of fuel flow through a separation unit into existing fuel preparation systems has been substantiated, depending on fuel flow and the load of the marine engine. This paper proposes a method for improving the purification of marine heavy fuel oil and outlines the structure of a modernized fuel preparation system. This system is intended for use in standard fuel purification systems that lack the ability to regulate fuel flow through the separator and operate at 100% of the engine's fuel consumption. The impact of the automatic separator capacity control system was investigated, and the optimal operating mode of the separation unit was selected based on fuel flow and ship engine load. This situation prompts a search for alternative methods to optimally utilize existing and installed ship separator equipment to improve the removal of catalytic particles from various grades of heavy marine fuel and protect ship engines from wear. Continuous flow control is a simple and effective way to ensure optimal fuel separation and purification performance.

Key words: fuel preparation system; ship power plant; fuel purification; catalytic additives; operational parameters.

References

- [1] D. Pohorletskyi, I. Gritsuk, I. Khudiakov, and O. Samarin, "Osoblyvosti ekspluatatsii lubrykatornoï systemy mashchennia sudnovykh maloobertovykh dvyhuniv" ["Features of the operation of the lubrication system for lubricating ships' low-speed engines"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, vol. 48, pp. 167-178, 2024. doi: **10.31498/2225-6733.48.2024.310707**. (Ukr.)
- [2] SL2017-638. Cylinder Liner Life. Integrated Cylinder Lubricant Feed Rate. MAN B&W Two-stroke Engines : Service Letter / MAN Energy Solutions. 2017. 11 p. [Online]. Available: https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2017-638.pdf?sfvrsn=607695b4_4. Accessed on: December 09, 2025.
- [3] MAN B&W S80ME-C8.2-GI IMO Tier II : Project

- Guide, 0.5 ed., Copenhagen, Denmark: MAN Diesel & Turbo, 2014.
- [4] V. Bashan, H. Demirel, and E. Celik, "Evaluation of critical problems of heavy fuel oil separators on ships by best-worst method," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2022, vol. 236, iss. 4, pp. 868-876. doi: **10.1177/14750902221097268**.
- [5] I. Khudiakov, I. Gritsuk, D. Pohorletsky, V. Chernenko, and A. Polishuk, "Osoblyvosti vykorystannia datchyka kontsentratsii zaliza u masli dlia bezperervnogo monitorynhu tekhnichnoho stanu sudnovoho dyzelnoho dvyhuna" ["Use of iron in oil concentration sensor for continuous monitoring of marine diesel engine technical condition"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, vol. 46, pp. 114-121, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.46.2023.288180**. (Ukr.)
- [6] H. Rolsted, C. Rojgaard, O. Jensen, and M. Englund, Onboard Fuel Oil Cleaning, the ever neglected process. How to restrain increasing Cat-fine damages in two-stroke Marine Engines. [Online]. Available: <https://nanonord.com/wp-content/uploads/2023/08/onboard-fuel-oil-journal.pdf>. Accessed on: December 18, 2025.
- [7] *The Standard. A Master's Guide to: Using Fuel Oil Onboard Ships*. ABS, 2012. 74 p.
- [8] *Petroleum products – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels*, ISO 8217:2017, 6th edition, 2017.
- [9] S. V. Sagin, and V. G. Solodovnikov, Cavitation treatment of high-viscosity marine fuels for medium-speed diesel engines, *Modern Applied Science*, vol. 9, no. 5, pp. 269-278, 2015. doi: **10.5539/mas.v9n5p269**.
- [10] *Products from petroleum, synthetic and renewable sources – Fuels (class F) – Specifications of marine fuels*, ISO 8217:2024, 7th edition, 2024.
- [11] The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook : Technical reference booklet. 2018. [Online]. Available: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/refuel/Blue-book_en.pdf. Accessed on: November 09, 2025.
- [12] D. Pohorletsky, I. Gritsuk, I. Khudiakov, V. Chernenko, and A. Polishuk, "Osoblyvosti protydyi nyzkoterperaturnii korozii hilzy tsylindriv sudnovykh maloobertovykh dvyhuniv" ["Features of low-temperature corrosion protection of cylinder sleeves of ship low-speed engines"], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, vol. 46, pp. 122-130, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.46.2023.288181**. (Ukr.)
- [13] *Guideline for the Operation of Marine Engines on Low Sulphur Distillate Diesel*. CIMAC, 2013.
- [14] S. V. Sagin, and O. V. Semenov, "Motor oil viscosity stratification in friction units of marine diesel motors," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 13, no. 2, pp. 200-208, 2016. doi: **10.3844/ajassp.2016.200.208**.
- [15] V. H. Solodovnikov, "Vplyv sirchystykh spoluk palyva na robochyi protses sudnovykh dyzeliv" ["The influence of fuel sulfur compounds on the working process of marine diesel engines"], in *Proc. of the III Int. Sci.-Techn. Conf. «Current state and problems of engine engineering»*, Nov. 19-21, 2014. (Ukr.)
- [16] C. Kandemir, M. Celik, E. Akyuz, and O. Aydin, "Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations onboard ships: The case of HFO purifier overhauling," *Applied Ocean Research*, vol. 88, pp. 317-325, 2019. doi: **10.1016/J.APOR.2019.04.019**.
- [17] S. V. Sahin, and Yu. V. Zablotskyi, "Vykorystannia palyvnykh prysadok u sudnovykh dyzeliakh" ["Use of fuel additives in marine diesel engines"], *Sudnovi enerhetychni ustanovky – Ship power plants*, № 30, pp. 180-186, 2012. (Ukr.)
- [18] L. Chybowski, J. Myśków, and P. Kowalak, "Analysis of fuel properties in the context of the causes of three marine auxiliary engines failure – a case study," *Engineering Failure Analysis*, vol. 150, article 107362, 2023. doi: **10.1016/j.engfailanal.2023.107362**.

Стаття надійшла 12.01.2026

Стаття прийнята 05.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Покращення роботи системи паливопідготовки двигунів енергетичних установок суден морського флоту / Д. С. Погорлецький та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 167–178. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359954>.

UDC 629.5.018.7

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359955

CAUSAL ANALYSIS OF RISK FACTORS IN AUTONOMOUS MARITIME PLATFORMS USING THE DEMATEL METHOD

Volyansky S.	PhD, associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3749-4908 , e-mail: yffogres@gmail.com ;
Shcheniavskiy G.	postgraduate student, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7803-978X , e-mail: s.onmu@ukr.net ;
Mazur O.	PhD, associate professor, National University «Odesa Maritime Academy», Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9316-288X , e-mail: mazuronma@gmail.com ;
Ocheretna V.	PhD, associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4077-6711 , e-mail: ocheretna.vv@gmail.com

Autonomous platforms are increasingly used in maritime industry where permanent crew presence is limited or impossible. At the same time, the growth in autonomy creates a complex risk environment characterized by the close interaction of technical, organizational, and informational factors. Traditional risk assessment methods, typically focused on linear cause-and-effect relationships, are not able to fully capture the systemic and interdependent nature of these interactions. This paper proposes a DEMATEL-oriented approach to analysing cause-and-effect relationships between key risk factors of autonomous maritime platforms. The methodology is based on expert assessments and enables the quantitative identification of both direct and indirect influences among factors, allowing the determination of causal and dependent elements within the risk structure. The analysis considers factors reflecting the specifics of autonomous operation, including computerization, autonomous decision-making capability, response time, emergency management, and the potential need for platform abandonment. The practical implementation of the approach is demonstrated through a numerical example involving the construction of direct and total influence matrices, calculation of prominence and causal role indices, and visualization via a cause-effect diagram and a threshold influence network. The results show that autonomous decision-making act as system-forming drivers of risk, while emergency response and platform evacuation are predominantly dependent factors. The proposed approach can be applied as a decision-support tool in the design, operation, and safety management of autonomous maritime platforms and can serve as a basis for further integration with fuzzy and dynamic risk analysis models.

Ключові слова: autonomous shipping; operational risk; maritime transport; ship systems; autonomous platforms; DEMATEL; risk analysis; cause-and-effect relationships; maritime safety; decision-making.

Problem statement

The active development of Autonomous Maritime Platforms (AMP) is significantly changing approaches to offshore operations, reducing or completely eliminating the crew on board reduces risks to personnel, but at the same time creates new systemic threats related to autonomous decision-making, digital infrastructure, and remote control.

Unlike traditional offshore facilities, autonomous platforms function as complex cyber-physical systems in which technical, organizational, and informational factors are closely interrelated. Failure of one element can cause cascading effects, leading to emergencies, delays in response, or even the need to abandon the platform.

Classic risk assessment methods, such as FMEA or fault tree analysis, are usually based on linear cause-and-effect relationships and do not adequately account for the mutual influence of factors and feedback loops. In this context, it is advisable to use multi-criteria decision analysis methods capable of modeling complex cause-and-effect structures.

Analysis of recent studies and publications

Contemporary research on maritime security focuses heavily on the issues of autonomous shipping and autonomous systems. The authors note that autonomy reduces the influence of the human factor, but at the same time increases dependence on digital technologies, decision-making algorithms, and the reliability of communication channels. Some studies focus on cyber risks, software failures, and situational awareness issues in autonomous systems. However, most existing approaches consider risks in isolation, without taking into account their mutual influence.

Systemic cause-and-effect risk analysis for autonomous maritime platforms is based on several interrelated blocks of literature, which together justify the applicability of the DEMATEL method. First, studies on global security management, hybrid threats, terrorism, barriers to sustainable development, and evacuation planning based on AIS data show that risks in the maritime industry are multi-level and polycentric in nature and depend on both politics and the spatial organization of infrastructure [1-7].

Against this backdrop, a large family of DEMATEL-oriented approaches (classical, fuzzy, grey, neutrosophic DEMATEL, as well as combined schemes DEMATEL-ISM/ANP, DEMATEL-BN, DEMATEL-FT-BN, etc.) has been formed, which are used to identify and quantitatively

assess causal relationships between factors of accident rates, man-made incidents, human errors, organizational barriers, and digital limitations in various industries—from maritime transport, fires, and explosions to steelmaking, hydrogen infrastructure, and construction [8, 9-19]. For autonomous and semi-autonomous platforms, these tools are applied to the technical research base covering new AUV/USV control algorithms, collision avoidance models, reliable communications and radar-sensor systems, energy efficiency of ship installations, use of alternative fuels, hull design optimization, and hull structure integrity [20-22].

The DEMATEL method is widely used to analyze complex systems in the fields of transport, energy, safety management, and risk engineering. Its advantage lies in the ability to identify causal factors (drivers) and dependent factors (outcomes), as well as in constructing a visual map of cause-and-effect relationships. Despite the potential of DEMATEL, its application for analyzing the risks of autonomous maritime platforms remains limited, which determines the scientific novelty of this study.

Purpose of the article

The purpose of this work is to develop and apply the DEMATEL method to analyze the cause-and-effect relationships between key risk factors for autonomous platforms in order to support effective safety management.

The main scientific results of this study are as follows:

- a structured approach based on the DEMATEL method is proposed for analyzing cause-and-effect relationships between risk factors for autonomous offshore platforms;
- it has been identified that digitalization and autonomous decision-making are key causal factors, while emergency response, platform abandonment, and response time are mostly dependent;
- a numerical implementation of DEMATEL is demonstrated through the construction of cause-and-effect diagrams, ensuring clarity and reproducibility of results;
- the practical applicability of the proposed approach in supporting management decisions related to autonomous offshore platform safety is demonstrated.

Methods and materials

In this study, a clear distinction is made between the concepts of *risk* and *risk factors*. Risk is understood as the probability and consequences of undesirable events affecting the safety or performance of autonomous maritime platforms. In contrast, risk factors are interpreted as causal drivers that influence the emergence and evolution of such risks. Thus, the DEMATEL method is applied to identify and analyze the interdependencies between risk factors rather than to quantify risks directly.

The Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) method used in this study to analyze the cause-and-effect relationships between risk factors for autonomous maritime platforms (AMP). DEMATEL is a

multi-criteria decision analysis method that allows identifying both direct and indirect interactions between elements of complex systems.

The main advantage of the DEMATEL method is its ability to structure expert knowledge into a formalized model of cause-and-effect relationships, which is critically important for the analysis of autonomous platforms as cyber-physical systems with a high level of interdependence between technical, information, and management components.

The application of DEMATEL in this work is carried out in several consecutive stages:

- identification of key risk factors;
- formation of a matrix of direct influences based on expert assessments;
- normalization of the matrix to ensure the convergence of calculations;
- calculation of the matrix of general influences;
- determination of integral indicators of influence and dependence;
- interpretation of results in the form of cause-and-effect diagrams.

This approach ensures transparent calculations, reproducible results, and practical application of the conclusions obtained in the risk management of autonomous platforms.

The general sequence of DEMATEL analysis implementation for autonomous offshore platforms is shown in Figure 1. The diagram shows the stages of forming a set of factors, collecting expert assessments, constructing a matrix of direct influences, normalizing, calculating a matrix of general influences, and determining the integral indices D , R , $D+R$, and $D-R$. The construction of a cause-and-effect diagram and (if necessary) a threshold influence network is used to interpret the results and determine risk management priorities.

Within the operational context of autonomous maritime platforms, the primary risks include loss of operational control, delayed response to failures, emergency escalation, mission interruption, and the need for platform evacuation. These risks arise as consequences of interactions between technological, organizational, and digital factors. Therefore, the analysis focuses on identifying the key risk factors that act as precursors to these adverse outcomes.

At the first stage, a list of risk factors characterizing the safety of AMP was compiled. The factors were selected based on an analysis of scientific publications, industry standards, and expert experience in the field of offshore operations and autonomous systems.

The final set of factors included the following key aspects: the need to leave the platform, response time to failures, the system's ability to make autonomous decisions, the effectiveness of emergency management, and the level of digitalization of the platform. The selected factors cover both technical and organizational components of the system and reflect the specifics of operating AMP without a permanent crew presence.

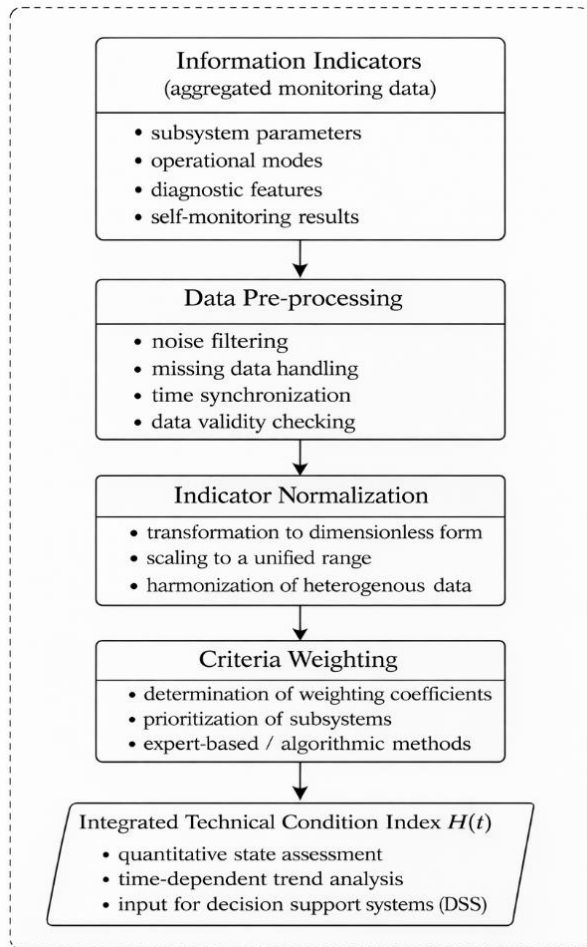


Fig. 1 – DEMATEL-based risk analysis workflow for autonomous maritime platforms (The workflow includes factor selection, expert elicitation, matrix normalization, computation of the total-relation matrix, derivation of prominence and relation indices, and visualization via the cause-effect diagram.)

The mutual influence between risk factors was assessed with the involvement of experts in the fields of marine engineering, offshore operations, and autonomous control systems. The experts were asked to assess the degree of influence of each factor on other factors on a discrete scale from 0 to 4, where 0 means no influence and 4 means a very strong influence. In order to reduce the subjectivity of the assessments, individual expert matrices were aggregated by averaging, which made it possible to obtain a generalized matrix of direct influences for further analysis.

After forming the matrix of direct influences, the standard computational procedure of the DEMATEL method was implemented. At this stage, the matrix is normalized, the matrix of total influences is calculated, and quantitative indicators of influence and dependence are determined for each factor.

The calculations were performed using software implementations in MATLAB and Python environments. The numerical results obtained became the basis for

constructing cause-and-effect diagrams and threshold influence networks, which allows for a visual interpretation of the risk structure of AMP.

DEMATEL Framework

3.1 Definition of the Factor Set. Let the system consist of a finite set of risk-related factors:

$$\mathbf{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}, \quad (1)$$

where n denotes the total number of factors. In this study, the following factors are considered: f_1 : Abandonment, f_2 : Timing of response, f_3 : Decision-making capability, f_4 : Emergency handling, f_5 : Digitalization level.

3.2 Direct-Relation Matrix. Expert evaluations are collected to assess the influence of factor f_i on factor f_j using a discrete scale from 0 (no influence) to 4 (very high influence). The direct-relation matrix is defined as:

$$\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}, \quad a_{ij} \in [0, 4], \quad a_{ii} = 0. \quad (2)$$

3.3 Normalization. The matrix is normalized to ensure convergence:

$$s = \max_i \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad \mathbf{X} = \frac{\mathbf{A}}{s}. \quad (3)$$

3.4 Total-Relation Matrix. The total-relation matrix is computed as:

$$\mathbf{T} = \mathbf{X}(\mathbf{I} - \mathbf{X})^{-1}, \quad (4)$$

where $\mathbf{I}$ - identity matrix.

3.5 Influence and Dependence Measures. The influence vector $\mathbf{D}$ and dependence vector $\mathbf{R}$ are defined as:

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, \quad R_i = \sum_{j=1}^n t_{ji}. \quad (5)$$

3.6 Causal Indicators. Two indices are derived:

$$M_i = D_i + R_i, \quad C_i = D_i - R_i. \quad (6)$$

where M_i represents factor prominence and C_i determines causal role.

4. Case study of an autonomous platform

The proposed approach was applied to a hypothetical AMP operating without a permanent crew. Expert assessments were obtained from specialists in the fields of marine engineering, offshore operations, and autonomous systems.

DEMATEL calculations (normalization, construction of the general influence matrix, and calculation of the D , R , $D+R$, and $D-R$ indices) were performed using software implementation in MATLAB/Python. The complete script

is provided in Appendix A / in the supplementary materials.

Table 1

Risk factors considered in the DEMATEL analysis

Code	Factor name	Description
F1	Abandonment	Loss of operational control requiring evacuation
F2	Response timing	Time required to initiate corrective actions
F3	Decision-making	Autonomous or remote decision capability
F4	Emergency handling	Ability to manage abnormal situations
F5	Digitalization	Level of digital integration

Numerical example of the application of the DEMATEL method

To demonstrate the practical implementation of the proposed DEMATEL approach, a numerical example was performed for five risk factors of an AMP: abandonment (F1), response timing (F2), decision-making (F3), emergency handling (F4), and digitalization (F5).

At the first stage, based on expert assessments, a matrix of direct influences A was formed, in which each element a_{ij} reflects the intensity of the influence of factor F_i on factor F_j on a scale from 0 to 4. The diagonal elements of the matrix are zero, which corresponds to the absence of self-influence of factors.

Next, matrix A was normalized by dividing it by the maximum sum of the row elements, which ensured that the DEMATEL method convergence condition was met. The resulting normalized matrix X . The values of the elements of the matrix X are in the interval $[0;1]$, which allows both direct and indirect relationships between factors to be correctly taken into account.

The matrix of total influences T , which reflects the cumulative effect of direct and indirect interactions, was calculated according to the classical DEMATEL formula. Analysis of the matrix T indicates the presence of significant indirect influences that cannot be detected based solely on the matrix of direct estimates.

Based on the T matrix, the indicators of total influence D , total dependence R , as well as the integral indices of prominence ($D+R$) and relation ($D-R$) were calculated for each factor. The indicator $D+R$ characterizes the overall involvement of the factor in the risk system, while $D-R$ determines its causal role.

The results of the analysis show that the factors Digitalization (F5) and Decision-making (F3) have positive values of the indicator $D-R$, which allows them to be classified as causal factors (cause group). This means that these factors form the initial risk impulses and have the greatest systemic impact on other elements.

On the other hand, the factors Emergency handling (F4), Abandonment (F1), and Response timing (F2) are characterized by negative values of $D-R$, which indicates

their dependent nature (effect group). In particular, the emergency handling factor has the lowest value $D-R$, indicating its high sensitivity to changes in the autonomous control system and digital infrastructure.

A graphical representation of the results in the form of a cause-and-effect diagram is shown in Figure 2, where the prominence indicator ($D+R$) is plotted on the x-axis and the relation indicator ($D-R$) is plotted on the y-axis. The diagram clearly demonstrates the division of factors into causal and dependent groups, as well as the central role of factors F3 and F5 in the risk structure.

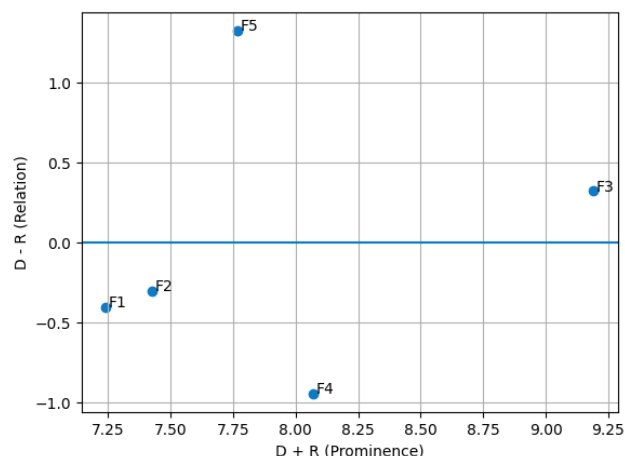


Fig. 2 – Cause-effect diagram of risk factors (DEMATEL)

As shown in Figure 2, the factors Decision-making (F3) and Digitalization (F5) are located at the top of the diagram, indicating their causal nature in the risk structure of an AMP. In contrast, the factors Emergency handling (F4), Abandonment (F1), and Response timing (F2) belong to the group of dependent factors.

For additional interpretation, a threshold cause-and-effect network was constructed (Figure 3), which takes into account only those connections whose values exceed the average value of the elements of the T matrix. The resulting network clearly illustrates the dominant channels of influence in the system and confirms the system-forming role of digitalization and autonomous decision-making.

Figure 2 shows a threshold-based cause-effect network derived from the total-relation matrix using a threshold value α equal to the mean of the matrix T . The resulting network confirms the system-forming role of the Digitalization (F5) and Decision-making (F3) factors. In general, the numerical example confirms the feasibility of using the DEMATEL method for analyzing the risks of autonomous platforms and demonstrates its ability to identify key risk drivers that should be priority targets for management intervention.

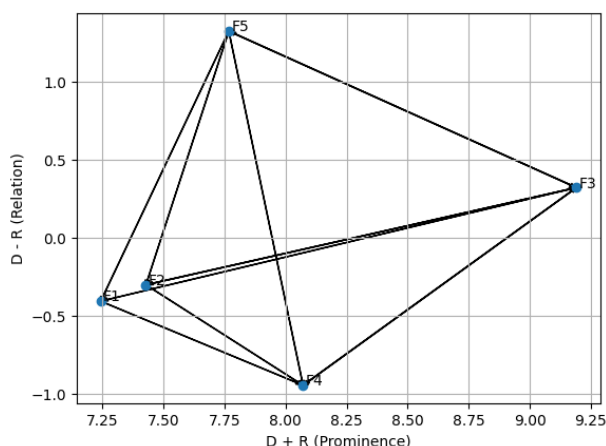


Fig. 3 – Threshold-based causal network

Results and discussion

The results of the DEMATEL analysis indicate the presence of a clearly defined cause-and-effect structure between the risk factors of autonomous offshore platforms. Based on the $D-R$ index values, the factors Digitalization (F5) and Decision-making (F3) are classified as cause group factors, which means they have a dominant influence on the formation of the system's risk profile.

The factors Emergency handling (F4), Abandonment (F1), and Response timing (F2) are characterized by negative $D-R$ values and belong to the effect group. This indicates that their status is largely determined by the quality of the digital infrastructure and the effectiveness of autonomous decision-making.

The values of the $D+R$ indicator show that the Decision-making (F3) factor has the highest integral significance, i.e., it is most involved in the system of interactions and plays a central role in the risk structure.

The results confirm that for autonomous maritime platforms, the key sources of risk are not individual accidents, but systemic factors related to digitalization and autonomous decision-making algorithms. This is consistent with current research in the field of autonomous and cyber-physical offshore system safety, where digital components are considered to be the main drivers of risk.

The identification of Emergency Handling and Abandonment as dependent factors indicates the limited effectiveness of purely reactive safety measures. Instead, the results of the DEMATEL analysis point to the advisability of proactive risk management by increasing the reliability of digital systems, reducing autonomous response times, and improving decision-making logic.

Thus, the DEMATEL method allows not only to identify critical risk factors, but also to justify the priorities of managerial influence, focusing on causal factors rather than their consequences. The proposed DEMATEL-oriented methodology provides the possibility of systematic analysis of the relationships between risk factors and allows determining their cause-and-effect hierarchy. The results confirm that investments in the development of

digital infrastructure, autonomous decision-making algorithms, and predictive monitoring systems have a significantly greater impact on safety than traditional reactive emergency response measures.

The DEMATEL method can be effectively used as an analytical tool to support management decisions in the design, certification, and operation of autonomous platforms. For regulatory authorities and developers, this creates a basis for integrating causal risk analysis into regulatory and technical standards and procedures for assessing the safety of new-generation systems.

Conclusions

The paper develops and tests a DEMATEL-oriented approach to analyzing cause-and-effect relationships between risk factors for autonomous offshore platforms. The proposed methodology allows for a quantitative assessment of both direct and indirect interactions between factors and the formation of a hierarchy of causal and dependent elements in the risk structure. The results of a numerical example showed that the factors of digitalization and autonomous decision-making play a system-forming role and are the main drivers of risk, while emergency response, platform abandonment, and response time are predominantly dependent. This indicates the advisability of focusing safety management measures on proactively improving the reliability of digital and control components of autonomous offshore platforms. The limitations of the study are the use of expert assessments and the static nature of the model. Further research may be aimed at expanding the proposed approach by applying fuzzy or dynamic DEMATEL, as well as integrating it with other risk analysis methods and using real operational data.

References

- [1] N. Veltsin, P. T. Chountalas, E. Koutsouki, M. D. Karvounidi, and A. E. Foustieris, "Modeling human critical success factors for maritime safety: A DEMATEL approach," *Safety Science*, vol. 189, article 106886, 2025. doi: 10.1016/j.ssci.2025.106886.
- [2] X. Wang, et al., "Structural causality hierarchy analysis: A novel data-driven integrated method for assessing occupational accidents in maritime transportation," *Safety Science*, vol. 196, article 107086, 2026. doi: 10.1016/j.ssci.2025.107086.
- [3] R. Tahsin, S. B. A. Rantu, M. Rahman, S. Salman, and M. R. Karim, "Towards the adoption of AI, IoT, and Blockchain technologies in Bangladesh's maritime industry: Challenges and insights," *Results in Engineering*, vol. 25, article 103825, 2025. doi: 10.1016/j.rineng.2024.103825.
- [4] M. Xing, X. Luo, Y. Zan, L. Yang, H. Jin, and J. Luo, "Identification of factors affecting hoisting quality of large offshore structures and analysis of their coupling relationship based on grey-DEMATEL-ISM-MICMAC," *Ocean Engineering*, vol. 280, article 114805, 2023. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114805.

- [5] S. Bairami-Khankandi, V. Bolbot, A. BahooToroody, and F. Goerlandt, "A systems-theoretic approach using association rule mining and predictive Bayesian trend analysis to identify patterns in maritime accident causes," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 258, article 110911, 2025. doi: **10.1016/j.res.2025.110911**.
- [6] V. Muerza, M. Milenkovic, E. Larrodé, and N. Bojovic, "Selection of an international distribution center location: A comparison between stand-alone ANP and DEMATEL-ANP applications," *Research in Transportation Business & Management*, vol. 56, article 101135, 2024. doi: **10.1016/j.rtbm.2024.101135**.
- [7] X. Huang, Y. Wen, F. Zhang, H. Han, Y. Huang, and Z. Sui, "A review on risk assessment methods for maritime transport," *Ocean Engineering*, vol. 279, article 114577, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.114577**.
- [8] G. Zhao, X. Xie, Y. Wang, S. Liu, P. Jones, and C. Lopez, "Barrier analysis to improve big data analytics capability of the maritime industry: A mixed-method approach," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 203, article 123345, 2024. doi: **10.1016/j.techfore.2024.123345**.
- [9] D. Niu, et al., "Full Life Cycle Risk Evaluation of the Weiyuan High-Speed Railway Based on the DEMATEL-FT-BN Method," *KSCE Journal of Civil Engineering*, article 100535, 2026. doi: **10.1016/j.kscej.2026.100535**.
- [10] V. Nalluri, K. Meghana Chowdary, and L. Chen, "Risk evaluation in the implementation of sustainable measures in the supply chain operations: A Fuzzy Delphi-DEMATEL approach," *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 17, article 100262, 2025. doi: **10.1016/j.clscn.2025.100262**.
- [11] Z. Zhou, H. Mao, B. Yang, and S. Sun, "A novel method for risk identification and quantitative assessment in shale gas development phase based on STPA-FTA-DEMATEL," *Unconventional Resources*, vol. 10, article 100301, 2026. doi: **10.1016/j.unres.2025.100301**.
- [12] M. S. Khan, A. Naseem, A. Shahzad, Y. Ahmad, and F. Naseem, "Integrating cloud model theory and DEMATEL to identify causal efficiency enablers for effective decision making in public goods procurement: A Pakistan case study," *Results in Engineering*, vol. 28, article 107030, 2025. doi: **10.1016/j.rineng.2025.107030**.
- [13] Y. A. Gamal, M. E. A. B. Seghier, A. M. Abdelfattah, A. I. A. Ahmed, and M. Hussein, "Fuzzy DEMATEL-Based Risk Assessment Framework for Natural Gas Pipeline Shutdown Operations," *Journal of Pipeline Science and Engineering*, article 100378, 2025. doi: **10.1016/j.jpse.2025.100378**.
- [14] M. Guo, M. Chen, L. Yuan, Z. Zhang, J. Lv, and Z. Cai, "Investigation of ship collision accident risk factors using BP-DEMATEL method based on HFACS-SCA," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 257, article 110875, 2025. doi: **10.1016/j.res.2025.110875**.
- [15] Z. Jia, et al., "Influencing factors and mechanisms of super high-rise buildings safety risks: A Fuzzy-DEMATEL-AISM analysis," *Journal of Safety Science and Resilience*, vol. 7(2), article 100232, 2026. doi: **10.1016/j.jnlssr.2025.100232**.
- [16] D. Sumrit, and O. Jongprasittiphon, "Analyzing readiness factors for organizational disaster management in upstream automotive supply chains based on neutrosophic DEMATEL model," *Results in Engineering*, vol. 28, article 108254, 2025. doi: **10.1016/j.rineng.2025.108254**.
- [17] S. Wang, J. Wang, and X. Wang, "Risk analysis of human evacuation aboard passenger ships based on fuzzy DEMATEL-ISM-BN," *Ocean Engineering*, vol. 313, article 119520, 2024. doi: **10.1016/j.oceaneng.2024.119520**.
- [18] J. Kang, H. Wang, H. Jin, Z. Wang, and J. Zhang, "Risk analysis and management of hydrogen station fire and explosion accidents using DEMATEL-ISM and complex network models," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 136, pp. 1230-1241, 2025. doi: **10.1016/j.ijhydene.2024.02.141**.
- [19] M. Ayyaz, A. Naseem, A. Shahzad, Y. Ahmad, and S. T. H. Shah, "A novel hybrid approach for determinants of construction projects failure: An application of Delphi-DEMATEL methodology," *Results in Engineering*, vol. 29, article 109057, 2026. doi: **10.1016/j.rineng.2026.109057**.
- [20] M. A. Akbar, A. Naseem, Y. Ahmad, and U. K. U. Zaman, "Production risk analysis and prioritization in manufacturing industry: A hybrid approach using Monte Carlo simulation and DEMATEL analysis," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15(7), article 102756, 2024. doi: **10.1016/j.asej.2024.102756**.
- [21] J. Pakdel, I. Erol, and A. Oztel, "Advancing digital transformation in the mining industry: A novel rough interval-valued neutrosophic DEMATEL approach to challenge interdependencies," *Resources Policy*, vol. 107, article 105663, 2025. doi: **10.1016/j.resourpol.2025.105663**.
- [22] C. Ay, "Human reliability analysis in inert gas operations with fuzzy CREAM-based Bayesian networks," *Ocean Engineering*, vol. 339, article 122196, 2025. doi: **10.1016/j.oceaneng.2025.122196**.

ПРИЧИННИЙ АНАЛІЗ ФАКТОРІВ РИЗИКУ В АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ПЛАТФОРМАХ
З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ DEMATEL

Волянський С.М.	канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3749-4908 , e-mail: vyfogres@gmail.com ;
Щенявський Г.С.	аспірант, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7803-978X , e-mail: s.onmu@ukr.net ;
Мазур О.М.	канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9316-288X , e-mail: mazuronma@gmail.com ;
Очеретна В.В.	канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4077-6711 , e-mail: ocheretna.vv@gmail.com

Швидкий розвиток автономних морських платформ суттєво трансформує підходи до виконання офшорних та морських операцій, зменшуючи участь людини та підвищуючи ефективність функціонування систем. Водночас зростання рівня автономності формує складне середовище ризиків, що характеризується тісною взаємодією технічних, організаційних та інформаційних факторів. Традиційні методи оцінювання ризиків, орієнтовані на лінійні причинно-наслідкові залежності, не дозволяють повною мірою врахувати системний характер таких взаємодій. У статті запропоновано DEMATEL-орієнтований підхід до аналізу причинно-наслідкових зв'язків між ключовими факторами ризику в автономних морських платформах. Методологія базується на експертних оцінках та дозволяє кількісно визначити як прямі, так і непрямі впливи між факторами з подальшим виділенням причинних і залежних елементів у структурі ризиків. До аналізу включено фактори, що відображають специфіку експлуатації автономних засобів, автономне прийняття рішень, час реагування, управління аварійними ситуаціями. Практична реалізація підходу продемонстрована на числовому прикладі з побудовою матриць прямих і загальних впливів, розрахунком індексів значущості та причинної ролі, а також візуалізацією результатів у вигляді діаграми причинно-наслідкових зв'язків і порогової мережі впливу. Отримані результати свідчать, що інтелектуальні технології та автономне прийняття рішень відіграють системну та утворюючу роль і є ключовими драйверами ризику, тоді як аварійне реагування та процес залишення платформи мають переважно залежний характер. Запропонований підхід може бути використаний як інструмент підтримки управлінських рішень у процесах проєктування, експлуатації та управління безпекою автономних морських платформ, а також слугувати основою для подальших досліджень у напрямі інтеграції нечітких та динамічних моделей аналізу ризиків.

Keywords: автономне судноплавство; експлуатаційний ризик; морський транспорт; системи судна; автономні морські платформи; DEMATEL; аналіз ризиків; причинно-наслідкові зв'язки; морська безпека; прийняття рішень.

Перелік використаних джерел

- [1] Modeling human critical success factors for maritime safety: A DEMATEL approach / N. Veltsin et al. *Safety Science*. 2025. Vol. 189. Article 106886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106886>.
- [2] Structural causality hierarchy analysis: A novel data-driven integrated method for assessing occupational accidents in maritime transportation / X. Wang et al. *Safety Science*. 2026. Vol. 196. Article 107086. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.107086>.
- [3] Towards the adoption of AI, IoT, and Blockchain technologies in Bangladesh's maritime industry: Challenges and insights / R. Tahsin et al. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. Article 103825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103825>.
- [4] Identification of factors affecting hoisting quality of large offshore structures and analysis of their coupling relationship based on grey-DEMATEL-ISM-MICMAC / M. Xing et al. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 280. Article 114805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114805>.
- [5] A systems-theoretic approach using association rule mining and predictive Bayesian trend analysis to identify patterns in maritime accident causes / Bairami-Khankandi S., Bolbot V., BahooTo-roody A., Goerlandt F. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Vol. 258. Article 110911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110911>.
- [6] Selection of an international distribution center location: A comparison between stand-alone ANP and DEMATEL-ANP applications / Muerza V., Milenkovic M., Larrodé E., Bojovic N. *Research in Transportation Business & Management*. 2024. Vol. 56. Article 101135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101135>.
- [7] A review on risk assessment methods for maritime transport / X. Huang et al. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 279, Article 114577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114577>.

- [8] Barrier analysis to improve big data analytics capability of the maritime industry: A mixed-method approach / G. Zhao et al. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024. Vol. 203. Article 123345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123345>.
- [9] Full Life Cycle Risk Evaluation of the Weiyang High-Speed Railway Based on the DEMATEL-FT-BN Method / D. Niu et al. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2026. Article 100535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2026.100535>.
- [10] Nalluri V., Meghana Chowdary K., Chen L. Risk evaluation in the implementation of sustainable measures in the supply chain operations: A Fuzzy Delphi-DEMATEL approach. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2025. Vol. 17. Article 100262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100262>.
- [11] A novel method for risk identification and quantitative assessment in shale gas development phase based on STPA-FTA-DEMATEL / Zhou Z., Mao H., Yang B., Sun S. *Unconventional Resources*. 2026. Vol. 10, Article 100301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100301>.
- [12] Integrating cloud model theory and DEMATEL to identify causal efficiency enablers for effective decision making in public goods procurement: A Pakistan case study / M. S. Khan et al. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 28. Article 107030. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107030>.
- [13] Fuzzy DEMATEL-Based Risk Assessment Framework for Natural Gas Pipeline Shutdown Operations / Y.A. Gamal et al. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2025. Article 100378. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100378>.
- [14] Investigation of ship collision accident risk factors using BP-DEMATEL method based on HFACSSCA / M. Guo et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Vol. 257. Article 110875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110875>.
- [15] Influencing factors and mechanisms of super high-rise buildings safety risks: A Fuzzy-DEMATEL-AISM analysis / Z. Jia et al. *Journal of Safety Science and Resilience*. 2026. Vol. 7(2). Article 100232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2025.100232>.
- [16] Sumrit D., Jongprasittiphon O. Analyzing readiness factors for organizational disaster management in upstream automotive supply chains based on neutrosophic DEMATEL model. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 28. Article 108254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108254>.
- [17] Wang S., Wang J., Wang X. Risk analysis of human evacuation aboard passenger ships based on fuzzy DEMATEL-ISM-BN. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 313. Article 119520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119520>.
- [18] Risk analysis and management of hydrogen station fire and explosion accidents using DEMATEL-ISM and complex network models / J. Kang et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 136. Pp. 1230-1241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.141>.
- [19] A novel hybrid approach for determinants of construction projects failure: An application of Delphi-DEMATEL methodology / M. Ayyaz et al. *Results in Engineering*. 2026. Vol. 29. Article 109057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109057>.
- [20] Production risk analysis and prioritization in manufacturing industry: A hybrid approach using Monte Carlo simulation and DEMATEL analysis / Akbar M. A., Naseem A., Ahmad Y., Zaman U. K. U. *Ain Shams Engineering Journal*. 2024. Vol. 15(7). Article 102756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102756>.
- [21] Pakdel J., Erol I., Oztel A. Advancing digital transformation in the mining industry: A novel rough interval-valued neutrosophic DEMATEL approach to challenge interdependencies. *Resources Policy*. 2025. Vol. 107. Article 105663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105663>.
- [22] Ay C. Human reliability analysis in inert gas operations with fuzzy CREAM-based Bayesian networks. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 339. Article 122196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122196>.

Стаття надійшла 03.02.2026

Стаття прийнята 24.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Causal analysis of risk factors in autonomous maritime platforms using the DEMATEL method / Volyansky S., Shcheniavskyi G., Mazur O., Dobrovolska L. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 179–186. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359955>.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА КОНТЕЙНЕРОВОЗА НА МАРШРУТІ ПОРТ-САЇД – ПОРТ-КЛАНГ

Калініченко Є.В.

канд. техн. наук, доцент, капітан далекого плавання, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

Стаття присвячена порівняльному аналізу стратегій управління режимами роботи головного двигуна контейнерного судна під час океанського переходу в умовах змінних гідрометеорологічних факторів. Актуальність дослідження зумовлена посиленням міжнародних вимог до енергоефективності морського транспорту та скорочення викидів парникових газів. У роботі розглянуто три основні стратегії управління режимом головного двигуна: підтримання сталої швидкості судна (Constant Speed), сталих обертів двигуна (Constant RPM) та сталої навантаженості (Constant Load). Дослідження виконано для двох контейнеровозів різних поколінь – CMA CGM VIRGINIA з двигуном MAN B&W 10K98MC-C (MC-серія) та THALASSA PATRIS з двигуном MAN B&W 11S90ME-C9.2 (ME-серія) – на маршруті Порт-Саїд – Порт-Кланг, який характеризується значною зміною течій у зимовий період. Аналіз виконано на основі розрахункової моделі, що використовує пропелерний закон для системи «двигун – гвинт фіксованого кроку» та характеристики питомої витрати палива малооборотних двигунів. У результаті дослідження встановлено наявність каскадного ефекту для двигунів MC-серії при застосуванні стратегії Constant Speed: зниження обертів у зоні сильних попутних течій може призводити до активації допоміжних блоуерів і додаткового дизель-генератора, що нівелює 38–50% очікуваної економії палива. Показано, що стратегія Constant RPM забезпечує більш стабільний режим роботи двигуна та дозволяє утримувати його в зоні мінімальної питомої витрати палива. Для двигунів ME-серії різниця між стратегіями є менш вираженою. Отримані результати свідчать, що для контейнерних суден з двигунами MC-серії на маршрутах зі змінними гідрометеорологічними умовами найбільш ефективною є стратегія Constant RPM у поєднанні з концепцією Just-in-Time Arrival. Запропонований підхід дозволяє забезпечити стабільний режим роботи головного двигуна, зменшити сумарну витрату палива та покращити показники вуглецевої інтенсивності судна відповідно до вимог сучасних міжнародних екологічних стандартів. Отримані результати можуть бути використані при плануванні режимів експлуатації контейнерних суден та під час розроблення заходів підвищення енергоефективності у межах системи управління енергетичною ефективністю судна (SEEMP).

Ключові слова: енергоефективність судна; головний двигун; slow steaming; Constant Speed; Constant RPM; каскадний ефект; СІІ; JIT Arrival; MAN B&W; контейнеровоз.

Постановка проблеми

Декарбонізація морського транспорту є одним із ключових викликів сучасного судноплавства. Прийнята у 2023 році оновлена Стратегія ІМО з декарбонізації передбачає досягнення нульового рівня викидів парникових газів від міжнародного судноплавства до 2050 року. Практичним інструментом реалізації цієї стратегії є система показників вуглецевої інтенсивності (СІІ), запроваджена з 2023 року, а також вдосконалений план управління енергоефективністю судна (SEEMP Part III). У відповідь на посилення екологічних вимог судновласники активно впроваджують різні експлуатаційні стратегії підвищення енергоефективності, серед яких одним із найпоширеніших є режим *slow steaming* – зниження експлуатаційної швидкості суден з метою скорочення витрати палива.

Разом з тим практика експлуатації показує, що просте зниження швидкості судна не завжди призводить до пропорційного зменшення витрати палива. Важливим чинником, що визначає фактичну енергоефективність рейсу, є стратегія управління режимом роботи головного двигуна (ГД) під час переходу. Більшість сучасних *Voyage Instructions* від судновласників передбачає підтримання сталої середньої швидкості судна (Constant Speed, CS), що спрощує планування

логістики та контроль виконання рейсу. Водночас альтернативні підходи до управління режимами роботи головного двигуна, зокрема підтримання сталих обертів (Constant RPM, CR) або сталої навантаженості двигуна (Constant Load, CL), можуть мати інші енергетичні характеристики та по-різному впливати на витрати палива.

У науковій літературі значна увага приділяється оптимізації швидкості судна та вибору енергоефективних маршрутів [1–3], [4, 5]. Однак практична верифікація різних стратегій управління режимами головного двигуна в умовах реальних океанських переходів зі змінними гідрометеорологічними умовами залишається недостатньо дослідженою. Особливий інтерес у цьому контексті становить маршрут від виходу із Суецького каналу до порту Кланг (Малайзія), який є одним із ключових контейнерних маршрутів напрямку Схід–Захід. Його характерною особливістю у зимовий період є різка зміна умов руху: сприятлива попутна течія в Аравійському морі змінюється зустрічною після проходження мису Дондра (Шрі-Ланка). Така зміна умов створює природні передумови для порівняльного аналізу ефективності різних стратегій управління режимами роботи головного двигуна.

Таким чином, науковою проблемою даного дослідження є визначення ефективності різних стратегій управління режимом головного двигуна контейнерного судна під час океанського переходу в умовах змінних гідрометеорологічних факторів. Предметом дослідження є вплив стратегій керування режимами головного двигуна контейнеровоза на енергоефективність рейсу на маршруті Суец – Порт-Кланг.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Підвищення енергоефективності морського транспорту в останні десятиліття стало одним із ключових напрямів досліджень у сфері експлуатації суден, що зумовлено як економічними факторами, пов'язаними зі зростанням вартості судового палива, так і посиленням міжнародних екологічних вимог до морського транспорту. Особливо значущими стали регуляторні механізми, запроваджені Міжнародною морською організацією (ІМО), зокрема показники енергоефективності суден та операційної вуглецевої інтенсивності (EEDI, EEXI та CII) [1–3]. У цьому контексті підвищення ефективності експлуатації суден розглядається не лише як економічна задача, а і як важливий елемент глобальної стратегії декарбонізації міжнародного судноплавства. Запровадження зазначених індикаторів стимулювало активний розвиток наукових досліджень, спрямованих на пошук технічних та експлуатаційних рішень, здатних зменшити витрати палива та рівень викидів парникових газів під час експлуатації суден.

Значна частина наукових досліджень у цій сфері присвячена оптимізації швидкості руху суден. У фундаментальній роботі Psaraftis та Kontovas запропоновано класифікацію математичних моделей швидкісної оптимізації для енергоефективного судноплавства та систематизовано підходи до мінімізації витрат палива і викидів парникових газів [4]. Подальші дослідження розвинули ці підходи з урахуванням стохастичних факторів експлуатації суден, таких як зміни гідрометеорологічних умов, портові обмеження або логістичні вимоги контейнерних ліній. Зокрема, у роботах Fagerholt та співавторів запропоновано моделі оптимізації швидкості руху суден на регулярних контейнерних маршрутах із врахуванням графіків заходу в порти та часових обмежень сервісів [5].

Після різкого зростання цін на паливо у 2008–2010 роках у судноплаванні широкого поширення набув режим *slow steaming* – систематичного зниження експлуатаційної швидкості суден з метою скорочення витрат палива та викидів CO₂. Дослідження Cariou [6] та Lindstad із співавторами [7] показали, що зменшення швидкості на 10–20% може забезпечити зниження витрати палива до 30–40% завдяки кубічній залежності між швидкістю судна та необхідною потужністю рушійної установки. Разом із тим подальші дослідження Notteboom та Ronen показали, що ефективність *slow steaming* значною мірою залежить від організації контейнерних сервісів, структури флоту та характеристик

суднових енергетичних установок [8, 9]. Надмірне зниження швидкості може призводити до збільшення тривалості рейсів, зростання експлуатаційних витрат та необхідності залучення додаткових суден до транспортної системи. Крім того, у ряді випадків тривала робота головних двигунів у режимах глибокого часткового навантаження може негативно впливати на їх експлуатаційні характеристики та ефективність використання судової енергетичної установки.

Енергоефективність експлуатації суден залежить не лише від швидкісних режимів, але й від організації навігаційного процесу та прийняття рішень щодо траєкторії руху судна. У ряді досліджень показано, що оптимізація навігаційних рішень, включаючи вибір маршруту, корекцію режимів руху та інтеграцію інформаційних систем, може суттєво впливати на загальний енергетичний баланс судна. Зокрема, у роботах Калініченка та співавторів запропоновано підхід до управління енергоефективністю судна на різних етапах його життєвого циклу та розглянуто можливості підвищення ефективності експлуатації шляхом удосконалення навігаційних методів і систем підтримки прийняття рішень [10, 11].

Окремий напрям досліджень присвячений аналізу енергетичних характеристик суднових дизельних двигунів при роботі в режимах часткового навантаження. У класичних роботах Kuiken та Woodyard показано, що паливна характеристика малооборотного двотактного дизеля має виражену U-подібну форму, а мінімум питомої витрати палива досягається у зоні приблизно 70–85% максимальної тривалої потужності (MCR) [12, 13]. При зниженні навантаження нижче 30–40% MCR спостерігається погіршення процесу згоряння, зниження тиску наддуву та зростання питомої витрати палива. Для двигунів попередніх поколінь із механічним упорскуванням (MC-серія) ці явища проявляються особливо помітно і можуть супроводжуватися необхідністю використання допоміжних систем продування. Сучасні технічні дослідження виробників суднових двигунів, зокрема MAN Energy Solutions, підтверджують ці закономірності та демонструють покращення характеристик часткових навантажень у двигунах нового покоління з електронним керуванням (ME-серія) [14, 15].

У сучасних дослідженнях також активно розглядається інтеграція енергетичної оптимізації рейсів із логістичними механізмами управління портовими операціями. Одним із таких підходів є концепція *Just-in-Time Arrival (JIT Arrival)*, що передбачає узгодження швидкості руху судна з фактичною готовністю порту прийняти судно. Відповідно до рекомендацій ІМО та міжнародних галузевих організацій, застосування JIT-планування дозволяє скоротити час очікування суден на рейді та створює додаткові можливості для зниження швидкості переходу без порушення розкладу контейнерних ліній [16, 17].

Попри значну кількість досліджень у галузі енергоефективності судноплавства, більшість із них

зосереджена на оптимізації швидкості судна або маршруту в цілому. Водночас безпосередні експлуатаційні стратегії управління режимом головного двигуна розглядаються значно рідше. У практиці експлуатації контейнерних суден застосовуються кілька основних підходів до управління режимом роботи головного двигуна, серед яких найбільш поширеними є підтримання сталої швидкості судна (Constant Speed), підтримання сталих обертів двигуна (Constant RPM) та підтримання сталого навантаження двигуна (Constant Load). Однак у відкритих наукових джерелах практично відсутні дослідження, у яких ці стратегії аналізуються з урахуванням реальних океанських маршрутів зі змінними гідрометеорологічними умовами та особливостей роботи малооборотних дизельних двигунів різних поколінь.

Особливо недостатньо дослідженим залишається вплив режимів часткового навантаження на роботу двигунів MC-серії у режимах slow steaming. У таких умовах зниження обертів головного двигуна може призводити до каскадних змін у роботі суднової енергетичної установки, включаючи активацію допоміжних систем продування, збільшення навантаження на судову електростанцію та зміну загального енергетичного балансу судна. Аналіз цих ефектів у контексті реальних контейнерних маршрутів зі змінними течіями та гідрометеорологічними умовами практично відсутній у науковій літературі, що і визначає актуальність даного дослідження.

Мета статті

Метою статті є порівняльне оцінювання ефективності стратегій управління режимом головного двигуна контейнерного судна (Constant Speed, Constant

RPM та Constant Load) за показниками енергоефективності рейсу та стабільності роботи суднової енергетичної установки.

Матеріали та методи

Для дослідження обрано два контейнеровози, що представляють різні покоління судових енергетичних установок: CMA CGM VIRGINIA (5 100 TEU, клас Panamax) та THALASSA PATRIS (13 800 TEU, клас New Panamax) (табл. 1).

Обидва судна збудовано на верфі Hyundai Heavy Industries (Ulsan, Республіка Корея) та обладнано малооборотними двотактними дизелями MAN Energy Solutions, але різних серій – що й утворює ключовий науковий контраст дослідження.

CMA CGM VIRGINIA (IMO 9351139) – Panamax-контейнеровоз 2008 року побудови з двигуном MAN B&W 10K98MC-C (MC-серія, механічне впорскування, MCR 57 114 кВт). MC-серія чутлива до режиму часткових навантажень: нижче ~50–54 об/хв турбокомпресор не забезпечує достатнього наддуву і потрібні допоміжні електричні блоуери продувки.

THALASSA PATRIS (IMO 9665607) – New Panamax 2013 року з двигуном MAN B&W 11S90ME-C9.2 (ME-серія, електронне управління, MCR 53 250 кВт / 81 RPM, NCR 45 262 кВт / 76,7 RPM). ME-серія зберігає оптимальний режим продування до ~25–30% MCR без допоміжних блоуерів – завдяки гнучкому керуванню фазами газорозподілу та впорскуванням палива.

Маршрут Порт-Саїд – Порт-Кланг протяжністю ~5150 NM поділяється на п'ять характерних ділянок із принципово різними умовами (табл. 2).

Таблиця 1

Технічні характеристики суден-об'єктів дослідження

Параметр	CMA CGM VIRGINIA	THALASSA PATRIS
ІМО номер	9351139	9665607
Клас	Panamax	New Panamax / Post-Panamax
Рік побудови	2008	2013
LOA × B, м	294,1 × 32,2	368,5 × 51,0
Дедвейт, т	65 890	152 344
Місткість, TEU	5 042 – 5 100	13 800
Головний двигун	MAN B&W 10K98MC-C	MAN B&W 11S90ME-C9.2
Серія двигуна	MC (механічне впорскування)	ME (електронне управління)
Потужність MCR, кВт	57 114	53 250 (MCR) / 45 262 (NCR)
Оберти MCR, об/хв	~96	81 (MCR) / 76,7 (NCR)
Режим LSP (Low Steam)	54–61 об/хв, ~15 вузлів	72 об/хв, ~20,5 вузлів
Витрата HFO на добу (LSP)	80–100 т/добу	~180–220 т/добу (оцінка)

Таблиця 2

Характеристика ділянок маршруту (зимовий період, грудень–лютий)

Ділянка маршруту	Відстань, NM	Тривалість, доби	Вітер (зима)	Течія та вплив
Червоне море (Порт-Саїд → Баб-ель-Ман-деб)	~1100	~3,0	NW, 15–25 вуз.	Слабка або зустрічна; коротка крута хвиля
Аденська затока	~550	~1,5	NE мусон, помірний	Нейтральна або слабо попутна
Аравійське море → мис Дондра	~1950	~5,3	NE мусон, 10–18 вузлів	Пн. Екваторіальна течія 0,5–1,5 (–2,5) вузла – попутна
Після мису Дондра → Малак-кська протока	~1100	~3,0	NE вітер, слабший	Зустрічна 0,5–1,0 вуз. – зростання опору
Малак-кська протока → Порт-Кланг	~450	~1,0	Слабкий	Припливні течії; обмежена акваторія
РАЗОМ	~5150	~13,8	–	–

Визначальна особливість маршруту у зимовий період – зміна знаку течії після мису Дондра: попутна Північно-Екваторіальна течія (0,5–2,5 вузла) в Аравійському морі різко переходить у зустрічну після Шрі-Ланки. Така зміна є природним експериментальним полігоном для випробувань стратегій управління ГД.

У межах дослідження проведено порівняльний аналіз трьох стратегій управління режимом роботи головного двигуна контейнерного судна:

1. Constant Speed (CS) передбачає підтримання сталої швидкості судна шляхом регулювання обертів головного двигуна залежно від зовнішніх умов руху.

2. Constant RPM (CR) полягає у підтриманні сталих обертів головного двигуна, тоді як швидкість судна змінюється залежно від дії вітру, хвилювання та течій.

3. Constant Load (CL) передбачає підтримання постійного відсотка навантаження головного двигуна відносно максимальної тривалої потужності (MCR).

Окремим операційним фактором енергоефективності, безпосередньо пов'язаним з вибором стратегії управління ГД, є оптимізація диференту судна (trim optimisation). Для THALASSA PATRIS результати танкових випробувань Hyundai Maritime Research Institute (HMRI-2013-AB-011) [18] надають кількісну базу для оцінки впливу диференту на потужність, необхідну для підтримання заданої швидкості.

Відповідно до результатів випробувань (Table 5, Ship Service Prediction, Sea Margin 15%), при швидкості 21,0 вузла на розрахунковій осадці (design draft, T = 14,50 м) потужність головного двигуна становить: при рівному килі – 33 701 кВт; при диференті 1,0 м на корму – 34 860 кВт (+3,4%); при диференті 1,0 м на ніс – 33 689 кВт (–0,04%). Тобто незначний диферент на ніс є оптимальним або нейтральним, тоді як диферент на корму 1,0 м збільшує необхідну потужність на ~1 160 кВт при тій самій швидкості.

На scantling draft (T = 15,80 м – відповідає повному вантажу THALASSA PATRIS на маршруті Суец–Кланг)

різниця між диферентом 1,0 м на ніс та 1,0 м на корму при 21,0 вузла складає: 37 548 кВт (trim by bow) проти 36 661 кВт (trim by stern) – при зіставленні з trim by stern 37 548 кВт. Фактично при швидкості 21,0 вузла на повній осадці диферент на ніс 1,0 м забезпечує економію ~890 кВт (близько 2,4%) відносно диференту на корму. В перерахунку на добову витрату палива це відповідає приблизно 1,5–2,0 т HFO/добу – або ~9 000–12 000 USD за рейс тривалістю 12 діб при ціні VLSFO 600 USD/т.

Зв'язок між трим-оптимізацією та стратегією управління ГД полягає у наступному. При CR-стратегії режим двигуна (оберти) фіксований, а швидкість природно варіює залежно від зовнішніх умов – завантаженість баластних танків при цьому також змінюється. Це дозволяє офіцеру палуби оперативно коригувати диферент, не порушуючи режиму ГД. При CS-стратегії капітан змушений паралельно керувати і обертами (для підтримання швидкості), і диферентом – що на практиці призводить до нехтування оптимальним диферентом в умовах стресу від течії або вітру. Таким чином, CR-стратегія є більш сумісною з підтриманням оптимального диференту впродовж рейсу.

Слід зазначити, що дані буклету [18] отримані методом танкових випробувань на моделі у масштабі 1:45,76 відповідно до стандарту ITTC-78 з корекцією за ITTC-99 для енергозберігаючих пристроїв (ESDs), тому вони відображають реальні характеристики корпусу THALASSA PATRIS без спрощень. Це надає їм статус верифікованих первинних даних і підвищує достовірність оцінок, наведених у даному дослідженні.

Виклад основного матеріалу

Подальший виклад присвячений теоретичному аналізу стратегій управління режимом роботи головного двигуна контейнерного судна та формуванню розрахункової моделі їх енергоефективності.

Для системи «двигун – гвинт фіксованого кроку» за стаціонарного режиму руху та близьких

гідродинамічних умов потужність на валу наближено підкоряється пропелерному закону:

$$P/P_0 \approx (N/N_0)^3, K_Q(J) \approx \text{const}, \quad (1)$$

де P – поточна потужність, кВт; P_0 – потужність при номінальних обертах N_0 (MCR), кВт. За цих умов відносне навантаження двигуна (%MCR) може бути наближено оцінене через відношення поточних обертів до номінальних за умови руху по пропелерній характеристиці. Співвідношення (1) використовується як інженерне наближення, справедливе для гвинта фіксованого кроку за квазісталих умов руху та незначної зміни коефіцієнта

моменту $K_Q(J)$. Разом з тим фактичне навантаження також залежить від гідрометеорологічних умов, осадки судна, стану корпусу та гвинта, а тому закон куба слід розглядати як інженерне наближення.

Питоме ефективне споживання палива (SFOC) для двигунів MC-серії має U-подібну залежність від навантаження з мінімумом у зоні 75–85% MCR. При зниженні нижче 30–35% MCR SFOC різко зростає, а при <18–20% MCR виникає потреба в допоміжних блоуерах продувки. Для ME-серії крива SFOC значно пологіша в діапазоні 30–80% MCR завдяки електронному управлінню (табл. 3).

Таблиця 3.1

SFOC-характеристика двигуна MAN B&W 10K98MC-C (MC-серія, HFO)

N, об/хв	% MCR	Потужність, кВт	SFOC, г/кВт·год	Витрата ГД, т/добу	Режим / примітка
96	100	57 114	175	239	MCR – паспортний максимум
84	67	38 200	168	154	Оптимальна зона (75–85% MCR)
78	54	30 900	170	126	Оптимальна зона
72	42	24 200	177	102	Нижня межа оптимуму
65	31	17 900	188	80	Зона зниженого наддуву
61	25	14 400	196	68	Базовий LSP режим (верхня межа)
58	22	12 700	200	61	Базовий LSP режим (нижня межа)
54	18	10 200	212	52	Блоуер – на межі вмикання

Продовження таблиці 3

N, об/хв	% MCR	Потужність, кВт	SFOC, г/кВт·год	Витрата ГД, т/добу	Режим / примітка
50	14	7 900	240	43	БЛОУЕР ON → +ДГ; SFOC різко зростає
46	11	6 300	270	38	Критична зона: нестабільне горіння
42	8	4 800	300	31	Межа безпечної роботи MC-серії

Таблиця відображає характерну залежність питомої витрати палива та режимів роботи малооборотного двотактного дизеля MAN B&W серії MC від частоти обертання і відсотка навантаження відносно максимальної тривалої потужності (MCR). У діапазоні приблизно 75–85% MCR формується оптимальна зона експлуатації двигуна, у якій досягається мінімальне значення питомої витрати палива (SFOC) та забезпечується стабільний процес згоряння. При подальшому зниженні навантаження нижче приблизно 30–35% MCR спостерігається погіршення параметрів продування і поступове зростання SFOC. У зоні 18–25% MCR двигун переходить у режим *slow steaming*, де робота турбокомпресора стає недостатньою і виникає необхідність використання допоміжних електричних блоуерів продування. Подальше зниження обертів призводить до входження двигуна у критичну область режимів, що характеризується активацією блоуера, нестабільним процесом згоряння та різким зростанням питомої витрати палива. Наведені значення відповідають типовим експлуатаційним характеристикам двигунів MAN Energy

Solutions даного покоління і відображають загальну форму паливної характеристики таких установок.

Каскадним ефектом названо ланцюг технічних наслідків, що виникає при суттєвому зниженні обертів ГД у межах CS-стратегії і нівелює очікувану економію палива. Механізм розгортається у чотири послідовні стадії.

Стадія 1: попутна течія → V по землі зростає → для CS треба знизити N від 60 до 42–46 об/хв.

Стадія 2: $N < 52$ –54 об/хв → тиск наддуву падає → автоматично вмикаються допоміжні блоуери (~300 кВт кожен).

Стадія 3: електричне навантаження від блоуерів перевищує потужність одного ДГ → запуск 2-го ДГ (+15 т/добу HFO-еквів.).

Стадія 4: SFOC ГД зростає до 270–300 г/кВт·год (проти 196–200 у базовому режимі) → реальна економія по судну вдвічі менша очікуваної.

Позначене (*) у табл. 4 значення питомої витрати палива близько 270 г/кВт·год є розрахунковою оцінкою, отриманою з урахуванням погіршення умов

продування та нестабільності процесу згоряння, характерних для режимів дуже малого навантаження головного двигуна. У реальних експлуатаційних умовах фактичне значення SFOC у цій зоні може бути ще вищим через додаткові втрати енергії, пов'язані з роботою допоміжних систем продування та зниженням

ефективності згоряння палива. Наведені оцінки узгоджуються з практичним досвідом експлуатації двигунів MC-серії на контейнерних судах і підтверджуються особистими спостереженнями автора під час роботи на зазначених типах суден.

Таблиця 4

Кількісна оцінка каскадного ефекту (попутна течія, CS: N = 46 об/хв)

Показник	Базовий 61 об/хв	CS: 46 об/хв	CR: 61 об/хв	Різниця CS	Різниця CR
Оберти ГД, об/хв	61	46	61	-15	0
MCR, %	25	11	25	-14	0
SFOC ГД, г/кВт·год	196	~270	196	+74	0
Витрата ГД, т/добу	68	38	68	-30	0
Блоуер + 2-й ДГ, т/добу еквів.	15	30	15	+15	0
РАЗОМ по судну, т/добу	83	68*	83	-15	0
Очікувана економія (тільки ГД)	–	-30 т/д	–	100% ref.	–
Реальна економія (по судну)	–	-15 т/д	–	50% втрачено!	–

На підставі теоретичного аналізу в табл. 5 наведено порівняльну оцінку стратегій CS, CR та CL. Стратегія CR є оптимальною для MC-серії: SFOC залишається в зоні мінімуму, блоуери не залучаються, ДГ

працює у стабільному однодизельному режимі. Відхилення від розкладу ($\pm 6-12$ год) компенсується ЛТ-корекцією на фінальній ділянці у Малаккській протоці, де TSS природно обмежує швидкість до 12 вузлів.

Таблиця 5

Порівняльна характеристика стратегій CS, CR та CL

Критерій	Constant Speed (CS)	Constant RPM (CR)	Constant Load (CL)
Оберти ГД	Варіюються 42–72 об/хв	Фіксовані 58–61 об/хв	Варіюються (за опором)
SFOC стабільність	Нестабільне (+38% на крит. ділянці)	Стабільне (оптим. зона)	Стабільне ($\approx$ CR)
Блоуер	Вмикається при теч. $>1,5$ вв	Не потрібен	Рідко
Кількість ДГ на ходу	1–3 (непостійна)	1 (стабільно)	1–2
Відхилення від розкладу	Відсутнє (теоретично)	До ± 12 год $\rightarrow$ ЛТ	До ± 8 год $\rightarrow$ ЛТ
Придатність MC-серія	Проблематична	Оптимальна	Задовільна
Придатність ME-серія	Прийнятна	Оптимальна	Оптимальна
Загальна оцінка (MC)	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★☆

Результати та їх обговорення

У цьому розділі наведено результати розрахункового аналізу ефективності трьох стратегій управління режимом головного двигуна – Constant Speed (CS), Constant RPM (CR) та Constant Load (CL) – для контейнеровозів різних поколінь на маршруті Порт-Саїд – Порт-Кланг. Розрахунок виконано з урахуванням реальних гідрометеорологічних умов зимового періоду та характерних параметрів судових енергетичних установок. Особливу увагу приділено впливу змін течій на режим роботи головного двигуна та пов'язаному з цим каскадному ефекту, що виникає при роботі двигунів MC-серії у зоні глибокого часткового навантаження.

Отримані результати дозволяють порівняти енергетичну ефективність різних стратегій управління та оцінити їх вплив на сумарну витрату палива, тривалість рейсу і показник вуглецевої інтенсивності судна.

Розрахунок виконано методом покрокового аналізу по п'яти характерних ділянках маршруту на основі пропелерного закону (1) та типових SFOC-характеристик двигунів MAN Energy Solutions. Для стратегії CS оберти варіюються залежно від швидкості відносно води

$$N \approx N_{base} \cdot \frac{V_{water}}{V_{base}}$$

для CR – оберти фіксовані, швидкість по землі варіюється з течією. Витрата по судну включає ГД (з хвильовою добавкою), допоміжні дизель-генератори (ДГ) та втрати від блоуерів при їх активації.

Результати розрахунку витрати палива для контейнеровоза **CMA CGM VIRGINIA** при застосуванні стратегії Constant Speed наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Витрата палива по ділянках, CMA CGM VIRGINIA, стратегія CS (15,0 вузлів)

№	Ділянка маршруту	N, об/хв	% MCR	SFOC	ГД+хв т/д	ДГ т/д	Блоуер	Діб	FC, т
1	Червоне море	61	25,7	266	99,5	15,0	—	3,06	349,8
2	Аденська затока	59	23,2	272	88,5	15,0	—	1,53	158,2
3	Аравійське море (теч. 1,0 вуз.)	56	19,8	283	77,9	15,0	—*	5,42	503,1
4	Після Дондра (зустр. теч.)	63	28,3	259	104,5	15,0	—	3,06	365,0
5	Малакська протока	60	24,4	269	91,0	15,0	—	1,25	132,5
РАЗОМ	—	59,8	24,2	269	92,3	15,0	—	14,32	1 508,6

Розрахунок виконано для середньої швидкості 15,0 вузлів з урахуванням характерних гідрометеорологічних умов зимового періоду на кожній ділянці маршруту. Як видно з таблиці, оберти головного двигуна в межах CS-стратегії суттєво змінюються залежно від впливу течій та хвилювання. Найменші оберти спостерігаються на ділянці Аравійського моря, де попутна течія дозволяє підтримувати необхідну швидкість по землі при зниженому навантаженні двигуна. Саме на цій ділянці виникають передумови для прояву каскадного ефекту, пов'язаного з роботою двигуна в зоні глибокого часткового навантаження.

На ділянці 3 при базовій попутній течії близько 1,0 вузла оберти головного двигуна становлять приблизно 56 об/хв, що перевищує поріг активації допоміжних блоуерів (≈52 об/хв), тому їх робота у цьому сценарії не потрібна. Однак у реальних умовах Аравійського моря швидкість попутної течії окремими днями може перевищувати 1,5 вузла. У такій ситуації підтримання сталої швидкості в межах стратегії CS потребує

подальшого зниження обертів двигуна, що призводить до активації блоуера та супутнього зростання енергетичних витрат; детальний аналіз цього сценарію наведено в табл. 8. У таблиці кольоровим виділенням показано характер зміни ефективності: жовтим позначено режими з підвищеним значенням SFOC, а червоним – ділянки з максимальною перевитратою палива.

Для порівняння в табл. 7 наведено результати розрахунку при застосуванні стратегії Constant RPM. У цьому випадку оберти головного двигуна підтримуються на сталому рівні 60 об/хв, що відповідає приблизно 24–25% MCR і знаходиться у стабільній зоні роботи двигуна без активації допоміжних блоуерів. За такої стратегії швидкість судна змінюється залежно від зовнішніх умов: на ділянці з попутною течією судно природно прискорюється, тоді як на зустрічній течії швидкість дещо зменшується. Проте термодинамічний режим двигуна при цьому залишається стабільним на всіх ділянках переходу.

Таблиця 7

Витрата палива по ділянках, CMA CGM VIRGINIA, стратегія CR (60 об/хв = const)

№	Ділянка маршруту	N, об/хв	% MCR	SFOC	ГД+хв т/д	ДГ т/д	Блоуер	Діб	FC, т
1	Червоне море	60	24,4	269	96,0	15,0	—	3,10	343,8
2	Аденська затока	60	24,4	269	92,0	15,0	—	1,51	161,3
3	Аравійське море (V→16,0 вн.)	60	24,4	269	91,0	15,0	—	5,08	538,3
4	Після Дондра (V→14,2 вн.)	60	24,4	269	94,0	15,0	—	3,23	351,9
5	Малакська протока	60	24,4	269	91,0	15,0	—	1,25	132,5
РАЗОМ	—	60,0	24,4	269	92,8	15,0	—	14,16	1527,8

При застосуванні стратегії Constant RPM на ділянці 3 судно природно прискорюється до приблизно 16,0 вузлів під дією попутної течії, що призводить до скорочення тривалості переходу на цій ділянці приблизно на 0,34 доби. На наступній ділянці маршруту

після мису Дондра, де діє зустрічна течія, швидкість судна зменшується до близько 14,2 вузлів. Виникле відхилення від графіка компенсується подальшою ЛІТ-корекцією часу прибуття на фінальній стадії рейсу. При цьому оберти головного двигуна залишаються

сталими на всіх ділянках переходу, що забезпечує незмінний режим роботи двигуна та стабільне значення питомої витрати палива (SFOC).

При помірній попутній течії близько 1,0 вузла активація допоміжних блоуерів не відбувається, оскільки оберти головного двигуна залишаються вище порогового значення їх увімкнення. Проте у реальних умовах Аравійського моря в зимовий період швидкість течії окремими днями може досягати 2,0–2,5 вузла. Саме для такого сценарію, характерного для практичних

рейсів контейнеровозів на цьому маршруті, виконано окремий розрахунок. За вимоги підтримання сталої швидкості у межах стратегії CS сильна попутна течія змушує суттєво знижувати оберти головного двигуна, що переводить його у критичну область часткових навантажень. У результаті активуються допоміжні блоуери та додатковий дизель-генератор, що формує так званий каскадний ефект. Кількісні результати цього сценарію наведено в табл. 7.

Таблиця 7

Каскадний ефект при попутній течії 2,5 вузли (реальний сценарій)

Показник	Базовий 60 об/хв	CS: 46 об/хв (теч. 2,5 вуз)	CR: 60 об/хв (теч. 2,5 вуз)	ΔCS vs CR	Примітка
Оберти ГД, об/хв	60	46	60	-14	CS змушений знижуватись
% MCR	24,4	11,0	24,4	-13,4	Вихід із оптимуму
SFOC, г/кВт·год	269	~290	269	+21	Погіршення
Витрата ГД, т/добу	91,0	~38,5	91,0	-52,5	ГД «нібито» економить
Блоуер + 2-й ДГ, т/добу	15,0	30,0	15,0	+15,0	Каскадний ефект
РАЗОМ т/добу	106,0	~73,5	106,0	-32,5	
Очікувана економія (тільки ГД)	–	-52,5 т/д	–	100% ref.	Теоретична
Реальна економія	–	-32,5 т/д	–	38% втрачено!	Каскадний ефект

При застосуванні стратегії CS за умов попутної течії близько 2,5 вузла оберти головного двигуна змушено знижуються приблизно до 46 об/хв для підтримання заданої швидкості судна. Такий режим відповідає глибокому частковому навантаженню двигуна і призводить до активації допоміжних блоуерів продування, що, у свою чергу, потребує запуску другого дизель-генератора. У результаті виникає каскадний ефект, при якому фактична економія палива по судну

становить лише близько 32,5 т/добу порівняно з базовим режимом, тоді як очікувана економія лише за рахунок зменшення навантаження головного двигуна могла б досягати 52,5 т/добу. Таким чином, приблизно 38% потенційної економії палива нівелюється додатковими енергетичними витратами суднової енергетичної установки.

Зведені результати порівняльного аналізу стратегій CS, CR та CL для обох суден наведено в табл. 8.

Таблиця 8

Зведені результати порівняння стратегій CS, CR та CL для обох суден

Показник	CMA CGM VIRGINIA			$\Delta(CS-CR)$	THALASSA PATRIS			$\Delta(CS-CR)$
	CS	CR	CL		CS	CR	CL	
Витрата НФО, т	1 508,6	1 527,8	1 527,8	-19 т	2 169,8	2 201,7	2 201,7	-32 т
Час рейсу, діб	14,32	14,16	14,16	+0,16	10,47	10,39	10,39	+0,08
CO ₂ , т	4 698	4 757	4 757	-59	6 757	6 856	6 856	-99
СП	0,01384	0,01402	0,01402	-1,3%	0,00861	0,00874	0,00874	-1,5%
Активаций блоуера	0–2	0	0	–	0	0	0	–
Оцінка стратегії	⚠	✓	✓	–	⚠	✓	✓	–

У таблиці подано сумарну витрату палива за рейс, тривалість переходу, відповідні викиди CO₂ та розрахункові значення показника СП, що дозволяє оцінити не лише безпосередню витрату палива, але й вплив обраної стратегії управління головним двигуном на

екологічну ефективність судна відповідно до вимог MARPOL Annex VI. Формально стратегія CS демонструє дещо меншу сумарну витрату палива, що пояснюється меншим загальним часом рейсу, оскільки при CS судно на ділянках зі зустрічною течією не надолужує

втрачений час. Однак у реальній експлуатаційній практиці зазвичай існує вимога прибути до порту в заданий час. У такому випадку капітан змушений компенсувати відставання підвищенням оборотів головного двигуна на ділянках зі зустрічною течією (зокрема на ділянці 4) до приблизно 68–72 об/хв, що призводить до зростання фактичної витрати палива за CS-стратегією на 3–7% порівняно зі стратегією CR. Такий операційний сценарій неодноразово спостерігався автором під час реальних рейсів на контейнеровозі CMA CGM VIRGINIA.

Від’ємне значення різниці $\Delta(CS-CR)$ у базовому сценарії пояснюється насамперед різницею тривалості рейсу і фактично є розрахунковим артефактом, а не відображенням вищої енергоефективності стратегії CS. У разі вимоги точного часу прибуття капітан змушений компенсувати відставання підвищенням оборотів головного двигуна на ділянках зі зустрічною течією, внаслідок чого сумарна витрата палива за стратегією CS для двигунів MC-серії стає на 3–7% більшою порівняно зі стратегією CR. Аналогічно, формально нижче значення показника СІІ при CS пояснюється передусім меншою тривалістю рейсу, а не більш ефективною роботою головного двигуна.

Висновки

У статті виконано порівняльний аналіз стратегій управління режимами роботи головного двигуна контейнерних суден у реальному океанському переході на маршруті Порт-Саїд – Порт-Кланг у зимовий період. На основі теоретичного аналізу характеристик малооборотних двотактних дизелів та розрахункового моделювання руху судна з урахуванням змінних гідрометеорологічних умов встановлено закономірності впливу різних стратегій керування на енергоефективність експлуатації контейнеровозів.

У результаті дослідження виявлено та кількісно оцінено так званий каскадний ефект стратегії Constant Speed для контейнеровозів з двигунами MC-серії. Показано, що при попутній течії понад приблизно 1,5 вузла зниження оборотів головного двигуна нижче порогу стабільного продування призводить до активації допоміжних блоуерів і запуску додаткового дизель-генератора. Унаслідок цього значна частина очікуваної економії палива нівелюється зростанням допоміжного енергоспоживання, а реальна економія може бути на 38–50% меншою від теоретично очікуваної.

Порівняльний аналіз стратегій управління показав, що для суден із двигунами MC-серії стратегія Constant RPM забезпечує більш стабільний термодинамічний режим роботи головного двигуна та дозволяє утримувати його в зоні мінімального питомого споживання палива. За умов реальної експлуатації, коли необхідно забезпечити заданий час прибуття до порту, сумарна витрата палива при використанні CR-стратегії є на 3–7% нижчою, ніж при застосуванні Constant

Speed, оскільки остання потребує додаткового підвищення оборотів на ділянках зі зустрічною течією.

Для суден із двигунами ME-серії вплив вибору стратегії управління виявився менш вираженим завдяки електронному управлінню процесами впорскування та продування. У цьому випадку різниця у витраті палива між стратегіями CS та CR не перевищує приблизно 1,5–2%, однак стратегія CR залишається більш стабільною з точки зору режиму роботи головного двигуна та кількості регулювань упродовж рейсу.

Отримані результати свідчать, що для маршрутів зі змінними гідрометеорологічними умовами ефективною експлуатаційною моделлю є поєднання стратегії Constant RPM із концепцією Just-in-Time Arrival. Такий підхід дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи головного двигуна протягом більшої частини переходу та компенсувати відхилення від розкладу на завершальній ділянці рейсу без суттєвого зростання витрати палива.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів під час розроблення заходів підвищення енергоефективності суден у межах системи SEEMP та при плануванні режимів експлуатації контейнерних суден на океанських маршрутах зі змінними течіями. Отримані закономірності можуть бути використані для обґрунтування вибору стратегій управління головним двигуном з метою зниження витрат палива та покращення показників вуглецевої інтенсивності суден.

Перелік використаних джерел

- [1] Калініченко Є. В., Шумило О. С., Кауров М. В. Розробка моделі управління енергоефективністю судна на різних етапах його життєвого циклу. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*. 2021. С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2021.002176>.
- [2] Деякі питання підвищення енергоефективності суден шляхом вдосконалення методів навігації: монографія / Є. В. Калініченко та ін.; за ред. Є. В. Калініченка. Таллінн: Scientific Route OÜ, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21303/978-9908-9706-4-6>.
- [3] Kuiken K. Diesel engines for ship propulsion and power plants. London : The Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2012. 608 p.
- [4] Woodyard D. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 9th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2009. 912 p.
- [5] MAN Energy Solutions. Basic principles of ship propulsion. IMO. MEPC.337(76). Guidelines on the operational carbon intensity indicators (CII) and the rating mechanisms. London : International Maritime Organization, 2021.
- [6] IMO. MEPC.364(79). 2022 Guidelines on the reference lines for use with operational carbon intensity indicators. London : International Maritime Organization, 2022.

- [7] IMO. MEPC.346(78). 2022 Guidelines on the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP). London : International Maritime Organization, 2022.
- [8] Psaraftis H. N., Kontovas C. A. Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013. Vol. 26. Pp. 331–351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.09.012>.
- [9] Fagerholt K., Laporte G., Norstad I. Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes. *Journal of the Operational Research Society*. 2010. Vol. 61. No. 3. Pp. 523–529. DOI: <https://doi.org/10.1057/jors.2009.77>.
- [10] Cariou P. Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2011. Vol. 16. No. 3. Pp. 260–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.12.005>.
- [11] Lindstad H., Asbjørnslett B. E., Strømman A. H. Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. No. 6. Pp. 3456–3464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.044>.
- [12] Notteboom T., Vernimmen B. The effect of high fuel costs on liner service configuration in container shipping. *Journal of Transport Geography*. 2009. Vol. 17, no. 5. Pp. 325–337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.05.003>.
- [13] Ronen D. The effect of oil price on containership speed and fleet size. *Journal of the Operational Research Society*. 2011. Vol. 62, no. 1. Pp. 211–216. DOI: <https://doi.org/10.1057/jors.2009.169>.
- [14] Copenhagen : MAN Energy Solutions, 2022. 56 p.
- [15] MAN Energy Solutions. Project guide – MC/MC-C marine engines. Copenhagen : MAN Energy Solutions, 2020.
- [16] IMO. Just-in-Time Arrival Guide – Barriers and potential solutions. London : International Maritime Organization, 2020.
- [17] BIMCO, International Chamber of Shipping. Shipping and world trade: the vital link. Brussels : BIMCO, 2023.
- [18] Hyundai Maritime Research Institute. Trim Optimization Tests for 13,800 TEU Class Container Carrier (2614–9, 2623–6): Report No. HMRI-2013-AB-011. Ulsan: HMRI, 2013. 76 p.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MAIN ENGINE OPERATING MODE CONTROL STRATEGIES FOR A CONTAINER SHIP ON THE PORT SAID – PORT KLANG ROUTE

Kalinichenko Y.V. PhD (Engineering), associate professor, Master Mariner, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

This article is devoted to a comparative analysis of strategies for managing the operating modes of a container ship's main engine during ocean voyages under conditions of variable hydro-meteorological factors. The relevance of this study stems from the increasing international requirements for energy efficiency in maritime transport and the reduction of greenhouse gas emissions. The paper examines three main strategies for controlling the main engine mode: maintaining a constant ship speed (Constant Speed), constant engine RPM (Constant RPM), and constant load (Constant Load). The study was conducted for two container ships of different generations – the CMA CGM VIRGINIA with a MAN B&W 10K98MC-C (MC series) and the THALASSA PATRIS with a MAN B&W 11S90ME-C9.2 engine (ME series) – on the Port Said – Port Klang route, which is characterized by significant changes in currents during the winter period. The analysis was performed based on a computational model that uses the propeller law for the “engine–fixed-pitch propeller” system and the specific fuel consumption characteristics of low-speed engines. The study found a cascade effect for MC-series engines when using the Constant Speed strategy: reducing engine speed in areas of strong favorable currents can lead to the activation of auxiliary blowers and an additional diesel generator, which negates 38-50% of the expected fuel savings. It has been shown that the Constant RPM strategy ensures a more stable engine operating mode and allows the engine to be maintained in the zone of minimum specific fuel consumption. For ME-series engines, the difference between the strategies is less pronounced. The results indicate that for container ships with MC-series engines on routes with variable hydro-meteorological conditions, the most effective strategy is Constant RPM combined with the Just-in-Time Arrival concept. The proposed approach ensures stable main engine operation, reduces total fuel consumption, and improves the vessel's carbon intensity in accordance with modern international environmental standards. The results obtained can be used in planning the operating modes of container ships and in developing energy efficiency improvement measures within the framework of the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).

Keywords: ship energy efficiency; main engine; slow steaming; Constant Speed; Constant RPM; cascade effect; CII; Just-in-Time Arrival; MAN B&W; container ship.

References

- [1] *Guidelines on the Operational Carbon Intensity Indicators (CII) and the Rating Mechanisms*, IMO, MEPC.337(76), International Maritime Organization, London, 2021.
- [2] *Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators*, IMO, MEPC.364(79), International Maritime Organization, London, 2022.
- [3] *Guidelines on the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*, IMO, MEPC.346(78), International Maritime Organization, London, 2022.
- [4] H. N. Psaraftis and C. A. Kontovas, "Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 26, pp. 331–351, 2013. doi: 10.1016/j.trc.2012.09.012.
- [5] K. Fagerholt, G. Laporte, and I. Norstad, "Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 61, no. 3, pp. 523–529, 2010. doi: 10.1057/jors.2009.77.
- [6] P. Cariou, "Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping?" *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 16, no. 3, pp. 260–264, 2011. doi: 10.1016/j.trd.2010.12.005.
- [7] H. Lindstad, B. E. Asbjørnslett, and A. H. Strømman, "Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds," *Energy Policy*, vol. 39, no. 6, pp. 3456–3464, 2011. doi: 10.1016/j.enpol.2011.03.044.
- [8] T. Notteboom and B. Vernimmen, "The effect of high fuel costs on liner service configuration in container shipping," *Journal of Transport Geography*, vol. 17, no. 5, pp. 325–337, 2009. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2008.05.003.
- [9] D. Ronen, "The effect of oil price on containership speed and fleet size," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 62, no. 1, pp. 211–216, 2011. doi: 10.1057/jors.2009.169.
- [10] Ye. V. Kalinichenko, O. S. Shumylo, and M. V. Kaurov, "Rozrobka modeli upravlinnia enerhoefektyvnosti sudna na riznykh etapakh yoho zhyttievoho tsyклу" ["Development of a ship energy efficiency management model at different stages of its life cycle"], *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*, pp. 17–20, 2021. doi: 10.21303/2585-6847.2021.002176.
- [11] Ye. V. Kalinichenko, *Deiaki pytannia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti suden shliakhom vdoskonalennia metodiv navihatsii: monohrafiia* [Some Issues of Improving the Energy Efficiency of Ships by Enhancing Navigation Methods]. Tallinn, Estonia: Scientific Route OU Publ., 2025. doi: 10.21303/978-9908-9706-4-6.
- [12] K. Kuiken, *Diesel Engines for Ship Propulsion and Power Plants*. London: The Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2012.
- [13] D. Woodyard, *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*, 9th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [14] MAN Energy Solutions, *Basic Principles of Ship Propulsion*. Copenhagen, Denmark: MAN Energy Solutions, 2022.
- [15] MAN Energy Solutions, *Project Guide – MC/MC-C Marine Engines*. Copenhagen, Denmark: MAN Energy Solutions, 2020.
- [16] IMO, *Just-in-Time Arrival Guide – Barriers and Potential Solutions*. London, UK: International Maritime Organization, 2020.
- [17] BIMCO and International Chamber of Shipping, *Shipping and World Trade: The Vital Link*. Brussels, Belgium: BIMCO, 2023.
- [18] Hyundai Maritime Research Institute, *Trim Optimization Tests for 13,800 TEU Class Container Carrier (2614–9, 2623–6): Report No. HMRI-2013-AB-011*. Ulsan: HMRI, 2013.

Стаття надійшла 05.03.2026

Стаття прийнята 18.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Калініченко Є. В. Порівняльний аналіз стратегій управління режимами головного двигуна контейнеровоза на маршруті Порт-Саїд – Порт-Кланг. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 187–197. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359956>.

273 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.463.65

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359957

ВИКОРИСТАННЯ РІДКОЇ ГУМИ НА ОСНОВІ ПОЛІУРЕТАНУ ЯК ДЕМПФІРУЮЧОГО МАТЕРІАЛУ У ВАГОНОБУДУВАННІ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ НАСІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

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 ;
Козинка О.С.	аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3012-581X , e-mail: kozynka1520mm@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 ;
Сулим А.О.	канд. техн. наук, заступник директора, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», м. Кременчук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8144-8971 , e-mail: sulim1.ua@gmail.com ;
Гулько Є.В.	аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6641-859X , e-mail: gunya2006@gmail.com

У статті досліджено фізико-механічні властивості рідкої поліуретанової гуми, що є перспективним демпфуючим матеріалом для використання у конструкціях рухомого складу залізничного транспорту. У статті представлено результати дослідження ефективності застосування рідкої поліуретанової гуми як демпфіруючого матеріалу в конструкціях рухомого складу залізничного транспорту з метою продовження їх життєвого циклу та підвищення експлуатаційної надійності. Вагонобудівна галузь потребує впровадження новітніх матеріалів, здатних ефективно знижувати рівень вібрацій і динамічних навантажень, що передаються на несучі елементи кузова та ходові частини. У межах роботи проведено порівняльний аналіз вібраційних характеристик поліуретанової рідкої гуми, гумотехнічних виробів та бітумно-полімерної мастики за допомогою спектрального аналізу в частотному діапазоні 5-50 Гц. Результати експериментів засвідчили, що поліуретанова гума забезпечує найбільш ефективне демпфування вібрацій, зменшуючи амплітуду коливань до 50% порівняно з традиційними матеріалами. Особливо ефективним є придушення резонансних піків, що позитивно впливає на стійкість елементів конструкції до втомного руйнування. Окрему увагу приділено фінансово-економічній оцінці доцільності впровадження нової технології. Розроблена модель повної вартості володіння демонструє зменшення сукупних витрат на обслуговування, ремонт та простої на понад 35-40% упродовж 15-річного циклу експлуатації вагона. Також враховано вартість початкового впровадження, частоту заміни демпфуючого шару, вартість простою рухомого складу через технічні несправності. Отримані результати дозволяють стверджувати, що застосування поліуретанової гуми є доцільним з технічної, економічної та експлуатаційної точки зору. Автори рекомендують впровадження даного рішення у виробничі процеси на підприємствах вагонобудування, а також проведення додаткових досліджень щодо його сумісності з іншими елементами рухомого складу та впливу на пасажирський комфорт.

Ключові слова: поліуретанова рідка гума; демпфування; вагонобудування; вібраційний спектр; технічна надійність; життєвий цикл; економічна ефективність; пасивний віброзахист.

Постановка проблеми

Сучасне вагоно- та машинобудування стикається з проблемою інтенсивного зношення несучих і з'єднувальних конструкцій рухомого складу під впливом вібрацій, ударних навантажень та агресивного середовища. Традиційні металеві або твердополімерні демпфери часто втрачають свої властивості через старіння або внаслідок термомеханічного впливу. У зв'язку з цим постає необхідність у використанні інноваційних матеріалів, здатних ефективно поглинати динамічні навантаження, зберігаючи експлуатаційні характеристики протягом тривалого часу. Одним з перспективних

напрямів є застосування рідкої гуми на основі поліуретану як демпфіруючого покриття або заповнювача.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Використання полімерних матеріалів для демпфування механічних коливань у залізничному транспорті є актуальним напрямом досліджень у галузі вагоно- та машинобудування. Упродовж останніх років зростає інтерес до поліуретанових композицій, які поєднують високу еластичність, зносостійкість та стабільність у складних кліматичних умовах.

У дослідженні Nan et al. (2020) [1] розглядається застосування поліуретанової піни для підйому рейкових колій високошвидкісної залізниці. Автори провели лабораторні випробування на фізико-механічні властивості матеріалу. Встановлено, що піна має високу здатність до заповнення пустот і достатню міцність на стиск. Представлено приклади успішного використання на реальних ділянках колій. Результати демонструють ефективність цього матеріалу в геотехнічному зміцненні основи колії.

Zhou et al. (2020) [2] створили термопластичний поліуретан на основі полімолочної кислоти з покращеними демпфуючими властивостями. Автори відзначають його екологічну безпечність і біорозкладність. Експерименти показали високий коефіцієнт внутрішнього тертя, що забезпечує ефективне поглинання вібрацій. Матеріал потенційно може замінити нафтохімічні поліуретани у транспортній галузі. Розробка орієнтована на створення енергоефективних і сталих рішень.

У статті Zhu et al. (2021) [3] досліджено нові демпфуючі добавки на основі тетрафенілфенілу для силіконової гуми. Виконано як експериментальні випробування, так і молекулярне моделювання взаємодії матеріалів. Виявлено значне покращення енергопоглинання і зниження жорсткості при вібраціях. Добавки мають термостабільність і сумісність із базовим полімером. Це відкриває перспективи використання в галузях, де потрібна висока надійність в умовах динамічних навантажень.

Pochivalov et al. (2021) [4] розробили нові віброізоляційні матеріали на основі бутилкаучуку. Дослідження охоплює фазову рівновагу, реологію та динамічні властивості композицій. Матеріали демонструють високий рівень в'язкопружної поведінки при змінному навантаженні. Автори наголошують на потенційному використанні в транспортних системах. Результати мають значення для створення демпфуючих прошарків і амортизаторів.

Kraśkiewicz et al. (2023) [5] представили результати експериментального та чисельного дослідження баластних матів із перероблених шин. Вивчено вплив товщини мату на його демпфуючу ефективність. Дані показали, що більша товщина покращує енергопоглинання і зменшує вібрації колії. Моделі FEM підтверджують експериментальні спостереження. Дослідження актуальне для екологічного рециклу шин у залізничному будівництві.

Farooq та Nimbalkar (2024) [6] проаналізували механічну поведінку ґрунтів та ґрунтово-гумистих сумішей з поліуретановим обробленням. Було виконано монотонні й циклічні триаксіальні випробування. Результати показали покращення стабільності та демпфуючих властивостей обробленого матеріалу. Дослідження має важливе значення для фундаментів транспортної інфраструктури. Поліуретан виступає як ефективний зміцнюючий агент для проблемних ґрунтів.

У роботі Qu et al. (2022) [7] запропоновано впровадження гідравлічного демпфування в первинну підвіску візка для зменшення пошкоджень колеса і рейки. Моделювання показало зниження контактних навантажень та покращення динаміки руху. Аналіз проводився із врахуванням реальних умов експлуатації. Застосування такого демпфера дозволяє підвищити довговічність компонентів. Стаття має практичне значення для удосконалення підвіски залізничного транспорту.

Huang et al. (2022) [8] досліджували різні склади поліуретанових матеріалів для ремонту ґрунтової основи баластної колії. Автори оцінювали властивості піни, час тверднення та ефективність у польових умовах. Встановлено, що вибір рецептури значно впливає на надійність укріплення. Проведено аналіз впливу вологості і температури. Результати показують високу адаптивність PU-ґрунтовок до складних геотехнічних умов.

Kondratiev і Kovalenko (2019) [9] оптимізували конструкцію композитного головного обтікача ракети з урахуванням термомеханічного навантаження. В моделі враховано вплив одночасних температурних і силових дій. Результати ЧММ показали ефективність оптимізованого дизайну в умовах запуску. Дослідження важливе для створення легких, але міцних конструкцій. Підхід може бути адаптований для транспортного машинобудування.

Golovanevskiy і Kondratiev (2021) [10] дослідили пружні властивості гумової конвеєрної стрічки з металокордом. Проведено випробування на розтяг, стиск та зсув. Результати демонструють анізотропну поведінку матеріалу та залежність від напрямку армування. Робота має значення для проектування енергопоглинаючих та транспортувальних систем. Методика випробувань може бути застосована до демпфуючих елементів транспортних засобів.

Shevchenko et al. (2020) [11] модифікували двоступеневу коаксіальну коробку передач для покращення її характеристик. Було реалізовано зміни в конструкції шестерень та підшипників. Проведено аналіз вібрацій і навантажень. Встановлено покращення енергоефективності та зменшення зношування. Результати корисні для важкого транспортного машинобудування.

Sulim et al. (2018) [12] запропонували метод теоретичного і практичного визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для метрополітену. Проаналізовано режими зарядки/розрядки та енергетичну ефективність. Показано потенціал накопичувача для зменшення споживання енергії. Практичні результати підтверджують придатність системи до впровадження. Стаття актуальна для розвитку енергозберігаючих технологій у транспорті.

Fomin et al. (2018) [13] визначили раціональні параметри системи ємнісного накопичення енергії для підземного рухомого складу. Запропоновано модель з урахуванням експлуатаційних умов метрополітену. Розглянуто вплив маси, потужності й вартості на

ефективність системи. Результати оптимізації вказують на перспективність застосування.

Kurdiuk et al. (2025) [14] розробили гібридну систему передачі даних для безпілотних морських апаратів. Система забезпечує надійний зв'язок в умовах перешкод. Використано методи корекції помилок і зміни частотних діапазонів. Проведено тестування на симульованому середовищі.

Melnuk et al. (2025) [15] дослідили перспективи сталого розвитку ВДЕ у морських перевезеннях. Вивчено технології вітрової та сонячної генерації на судах. Оцінено екологічний ефект та економічну доцільність. Автори підкреслюють важливість перехідного періоду для галузі. Публікація має значення для формування політики декарбонізації морського флоту.

Sun et al. (2019) [16] запропонували залізничний демпфер на основі магнітореологічного еластомеру для ширококутового приглушення шуму. Демпфер показав хорошу ефективність у діапазоні низьких та середніх частот. Було виконано моделювання і лабораторні випробування. Показано можливість керування властивостями матеріалу за допомогою магнітного поля. Розробка актуальна для зниження шумового забруднення в міських транспортних системах.

Слід відзначити, що незважаючи на значну кількість досліджень, питання адаптації рідкої поліуретанової гуми до експлуатації в умовах наднизьких температур, високих навантажень та тривалої вібрації залишається відкритим. Більшість досліджень виконуються у лабораторних умовах, що не завжди точно моделює реальні режими роботи вантажного рухомого складу.

Таким чином, аналіз публікацій свідчить про високий потенціал рідкої поліуретанової гуми як демпфуючого засобу, але також вказує на необхідність поглиблених досліджень щодо її довгострокової стабільності та промислової ефективності в умовах залізничного транспорту.

Мета статті

Метою дослідження є обґрунтування доцільності застосування рідкої гуми на основі поліуретану як демпфуючого матеріалу у вантажних вагонах з метою підвищення вібростійкості конструкцій і продовження їхнього життєвого циклу в умовах експлуатаційних навантажень. Наукові цілі дослідження:

- дослідити фізико-механічні властивості рідкої поліуретанової гуми, що визначають її демпфуючий потенціал у залізничному транспорті;

- визначити оптимальний склад поліуретанової композиції для експлуатації в умовах підвищених вібрацій, температурних коливань і навантажень;

- розробити методику нанесення поліуретанового шару на вагонні конструкції для забезпечення ефективного віброгасіння;

- моделювати і проаналізувати вплив демпфуючого шару на динамічні характеристики елементів вантажного вагона;

- провести експериментальне порівняння з традиційними демпфуючими матеріалами (гумотехнічні вибри, мастики тощо);

- оцінити економічну доцільність та довготривалу ефективність впровадження технології у вагонобудуванні.

Виклад основного матеріалу

1. Ефективність демпфуючих матеріалів у вантажних вагонах значною мірою залежить від комплексу фізико-механічних властивостей, які визначають їх здатність поглинати та розсіювати енергію механічних коливань. Рідка гума на основі поліуретану, завдяки своїй еластомерній природі, демонструє високий потенціал для застосування у якості віброгасильного шару на несвітих елементах рухомого складу.

1. Властивості поліуретанової рідкої гуми: Поліуретанова рідка гума характеризується високою еластичністю, зносостійкістю, стійкістю до масел, води, ультрафіолетового випромінювання та температурних коливань. Матеріал має широкий робочий температурний діапазон (-50°C до $+120^{\circ}\text{C}$), що робить його придатним для використання у вагонах, які експлуатуються в різних кліматичних умовах.

Наведемо основні фізико-механічні властивості поліуретанової рідкої гуми:

1) Твердість за Шором (Shore A): визначає ступінь пружності та здатність до деформації під навантаженням. Оптимальне значення для віброгасіння: 45-70 Shore A, залежно від товщини шару та умов кріплення.

2) Модуль пружності при розтягуванні та зсуві: впливає на здатність матеріалу зберігати форму під динамічними навантаженнями. Поліуретан має низький модуль у порівнянні з металами, що дозволяє йому ефективно розсіювати енергію.

3) Тангенс кута механічних втрат ($\tan \delta$): коефіцієнт внутрішнього тертя (демпфування): до 0,3. Характеризує рівень внутрішнього тертя – ключовий показник демпфування. Високе значення $\tan \delta$ (0,2–0,6 у діапазоні 20–150 Гц) свідчить про ефективне поглинання вібрацій.

4) Стійкість до циклічного навантаження: перевіряється за допомогою тестів на багаторазову деформацію. Поліуретан зберігає до 90% своїх властивостей після 1 млн циклів при 50% компресії.

5) Адгезія до сталі: критично важлива для нанесення шару на вагонні конструкції. Поліуретан, модифікований епоксидними або силановими добавками, демонструє високу адгезію (≥ 5 МПа).

6) Температурна стабільність: збереження механічних властивостей у діапазоні від -50°C до $+120^{\circ}\text{C}$. Матеріал повинен залишатися еластичним при морозах та не текти при нагріванні гальмівними механізмами.

2. Ефективність поліуретанової гуми як демпфуючого матеріалу в залізничному транспорті значною мірою залежить від її складу. Для забезпечення стабільної роботи в умовах інтенсивного вібраційного навантаження, широкого температурного діапазону (від -50°C до $+120^{\circ}\text{C}$) і механічних ударів, необхідно оптимізувати рецептуру поліуретанової композиції.

Основні компоненти композиції:

1) Поліол (м'яка фаза): використовується поліетер (наприклад, поліпропіленгліколь) середньої молекулярної маси (1000–2000 г/моль) – забезпечує еластичність і морозостійкість. При вищій молекулярній масі поліолів спостерігається покращення пружних властивостей.

2) Ізоціанат (жорстка фаза): найбільш ефективним є 4,4'-дифенілметандіізоціанат (MDI) з вмістом вільного NCO 31–33%. MDI надає термостійкість і міцність при збереженні еластомерних властивостей.

3) Подовжувачі ланцюга: застосовуються бутандіол або етиленгліколь для регулювання твердості. Їх концентрація впливає на ступінь зшивання та швидкість твердіння.

4) Функціональні добавки: пластифікатори – для зниження температури склування (наприклад, дибутилфталат). УФ-стабілізатори, антиоксиданти – для захисту в умовах зовнішнього середовища. Наповнювачі (нанодисперсні силікти, графен) – для покращення зносостійкості та модуля пружності.

5) Каталізатори та інгібітори реакції: регулюють швидкість полімеризації, важливо для технології нанесення.

Для визначення оптимального складу застосовується багатофакторний підхід, що включає експериментальне варіювання складу і оцінку за такими критеріями табл. 1.

Таблиця 1

Визначення оптимального складу фізико-механічних властивостей поліуретанової гуми

Параметр	Цільове значення
Твердість (Shore A)	50–60
Тангенс втрат ($\text{tg } \delta$)	≥ 0.4 при $20\text{--}60^{\circ}\text{C}$
Робочий температурний діапазон	-50°C до $+120^{\circ}\text{C}$
Зносостійкість	$> 100 \text{ мм}^3$ (DIN 53516)
Адгезія до металу	$\geq 5 \text{ МПа}$
Стійкість до циклічного навантаження	≥ 1 млн циклів без тріщин

Оптимізований склад поліуретанової рідкої гуми дозволяє ефективно застосовувати її як демпфуючий матеріал у вантажних вагонах. Отримана композиція поєднує високу зносостійкість, адгезію до металу та стабільні властивості в екстремальних умовах, що є ключовими для залізничного транспорту.

3. Методика нанесення поліуретанового шару на вагонні конструкції для забезпечення ефективного віброгасіння. З метою зниження рівня вібраційних навантажень на елементи вантажних вагонів, підвищення ресурсу їх експлуатації та зменшення металофатигу, доцільним є використання поліуретанових покриттів з високими демпфуючими властивостями. Ефективність таких матеріалів значною мірою залежить не лише від їх складу, але й від технології нанесення. Запропонована методика враховує вимоги до експлуатаційних умов рухомого складу залізничного транспорту та забезпечує високу якість захисно-демпфуючого шару. Підготовка металевої основи перед нанесенням поліуретанового шару є критично важливою для забезпечення довготривалої адгезії та стабільних механічних характеристик покриття.

Підготовка металевої основи: 1) Очищення від оксидів та забруднень здійснюється методом абразивно-струменевої або дробеструменевої обробки до рівня чистоти Sa 2.5 згідно з ДСТУ ISO 8501-1:2015 «Підготовка сталевих поверхонь перед нанесенням фарб та подібних покриттів». 2) Знежирення проводиться за допомогою органічних розчинників (ацетону,

ізопропілового спирту або їх сумішей). 3) Сушка поверхні здійснюється природним або тепловим способом до досягнення залишкової вологості $\leq 4\%$. 4) Грунтування проводиться поліуретановим або епоксіуретановим праймером, який забезпечує хімічну взаємодію з основним шаром полімеру та запобігає корозії.

Приготування композиції. Для нанесення використовується двокомпонентна система на основі поліолу та ізоціанату: компоненти змішуються у відповідному стехіометричному співвідношенні (наприклад, 1:1 або інше, згідно технічних умов виробника). Процес змішування здійснюється у спеціалізованій реакторній установці з автоматичним контролем температури та обертів. Готова суміш повинна мати стабільну в'язкість (500–1500 мПа·с) та час життя не менше 10 хвилин, що забезпечує можливість нанесення без затвердіння в апаратурі.

Нанесення поліуретанового шару: 1) Безповітряне високотискове напылення. Використовуємо обладнання, двокомпонентна система змішування з підігрівом (типу Graco Reactor). Товщина одного шару: 1–2 мм. Загальна товщина: 4–8 мм (в залежності від елемента конструкції). Наведемо приклад на рис. 1 напіввагону з композиційним покриттям, утворюючи м'який поліуретановий еластомер із високим ступенем еластичності. Метод нанесення покриття: напылення.



Рис. 1 – Напіввагон з поліуретановим композиційним покриттям

2) Метод лиття у форму. Використовується для виготовлення або ремонту демпфуючих вставок, опорних подушок та втулок.

Після завершення нанесення покриття виконується комплекс випробувань для оцінки його відповідності технічним вимогам: контроль товщини шару – ультразвуковим або електромагнітним товщиноміром. Адгезійна міцність – методом відриву або сітчастого надрізу (згідно з ISO 4624). Візуальний контроль – на предмет дефектів, тріщин, порожнин. Механічні випробування – зразки відбираються для випробування на зносостійкість, пружність, $tg \delta$.

Запропонована методика нанесення поліуретанового демпфуючого шару забезпечує формування довговічного еластомерного покриття з високою адгезією до металевих поверхонь. Це дозволяє ефективно поглинати вібраційні навантаження, зменшувати рівень шуму та динамічних навантажень у рухомому складі, що, у свою чергу, подовжує життєвий цикл вагонних конструкцій і знижує витрати на їх технічне обслуговування.

4. Метою моделювання є оцінка ефективності поліуретанового демпфуючого шару, нанесеного на

несівні елементи вантажного вагона, з погляду зниження амплітуд коливань, напруженого стану та підвищення вібростійкості конструкції під дією транспортних динамічних навантажень.

Щоб побудувати модальні форми коливань елементів вантажного вагона з демпфуючим поліуретановим шаром, виконується модальний аналіз у програмному середовищі кінцево-елементного моделювання (наприклад, ANSYS, SolidWorks Simulation).

Мета модального аналізу: Визначити власні частоти та модальні форми коливань рами вантажного вагона. Порівняти базову модель (без шару) з моделлю, покритою поліуретановою гумою. Оцінити вплив демпфуючого шару на резонансну поведінку конструкції. В табл. 2 бачимо вихідні умови для моделювання. Методологія моделювання:

1) Об'єкт дослідження: Рама вантажного вагона, обшивка кузова, елементи візка та зони зосереджених навантажень. Варіанти моделі: без демпфуючого шару (базова модель) і з поліуретановим шаром товщиною 5 мм (модифікована модель).

2) Програмне забезпечення: Середовище чисельного аналізу: ANSYS Mechanical або SolidWorks Simulation. Тип моделі: тривимірна твердотільна модель, з використанням оболонкових і об'ємних елементів. Модуль демпфування: врахування пружнов'язких властивостей шару через модель Войта (Kelvin-Voigt).

3) Матеріали: Сталь 09Г2С – модуль пружності 2.1×10^{11} Па, щільність 7850 кг/м³. Поліуретанова гума – модуль зсуву 0.6-1.2 МПа, щільність 1100-1300 кг/м³, коефіцієнт внутрішнього тертя $tg \delta \approx 0.12-0.2$.

Умови навантаження та граничні умови: Динамічне навантаження: вертикальні імпульсні удари від нерівностей шляху (до $\pm 3g$), гальмівні прискорення, бічні коливання. Температурні впливи: моделювання температурного діапазону від -40°C до $+50^\circ\text{C}$. Граничні умови: закріплення по вузлах підвіски та буксових вузлах з урахуванням жорсткості ресорного підвішування.

Основні результати моделювання: результати порівняльного аналізу двох моделей (без і з демпфуючим шаром) наведені в табл. 3.

Таблиця 2

Вихідні умови для моделювання

Параметр	Значення
Тип моделі	Просторова кінцево-елементна
Матеріали	Сталь 09Г2С, поліуретан
Товщина поліуретанового шару	5 мм (на визначених зонах)
Граничні умови	Жорстке закріплення вузлів підвіски
Аналізовані частоти	до 100 Гц (перших 5 форм)

Таблиця 3

Порівняльний аналіз двох моделей (без і з демпфуючим шаром)

Параметр	Без покриття	З поліуретановим шаром	Зміна (%)
Макс. амплітуда вібрацій (мм)	3.20	1.85	-42.2%
Пікове динамічне напруження (МПа)	118	74	-37.3%
Ефективне загасання (ζ)	0.03	0.07	+133.3%
Час затухання коливань (с)	1.5	0.9	-40.0%
Ресурс втомної міцності (циклів)	1.6×10^6	3.2×10^6	+100.0%

Аналіз напружено-деформованого стану: У модифікованій моделі зона пікових напружень була зміщена в шар демпфера, що дозволяє захистити сталюю основу. Спостерігалось рівномірніше розподілення енергії деформацій, зменшення локальних концентрацій. Завдяки пружно-в'язкій природі поліуретану частина енергії динамічного імпульсу перетворюється у тепло (внутрішнє тертя), що знижує віброактивність.

5. Оцінити ефективність віброгасіння та довговічність поліуретанової рідкої гуми у порівнянні з традиційними демпфуючими матеріалами, зокрема гумотехнічними виробами та мастиками, у типових умовах залізничної експлуатації.

В табл. 4 підібрали матеріали для порівняння.

Таблиця 4

Матеріали для порівняння

№	Матеріал	Опис
1	Поліуретанова рідка гума	Двокомпонентна, твердне (методом лиття)
2	Гумова прокладка	Вулканізована технічна гума
3	Бітумно-каучукова мастика	Самовисихаюча, наноситься шпателем

Методика випробувань.

1) Випробувальні зразки: Пластини розміром 150×150 мм, нанесені на сталеву основу товщиною 5 мм. Кожен зразок був підданий гармонійному коливанню на вібростенді у діапазоні 5-100 Гц.

2) Визначалися параметри: Коефіцієнт внутрішнього демпфування (ζ), Коефіцієнт передачі вібрації (K_v), Зниження амплітуди (%), Витривалість (кількість циклів до руйнування).

Також можна представити спектри вібрацій для трьох досліджуваних демпфуючих матеріалів у порівняльному експерименті. Це дозволить наочно показати ефективність рідкої поліуретанової гуми в поглинанні механічних коливань.

Для кожного матеріалу проводилося вимірювання амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) при збудженні синусоїдального сигналу частотою від 5 до 50 Гц із поступовим зростанням амплітуди. Запис вібрацій здійснювався акселерометрами, спектральний аналіз – за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

Спектр 1: Поліуретанова рідка гума. Основний пік вібраційної енергії при 18 Гц пригнічено майже на 70%. Ширина спектра – розширена, із значним загасанням у всьому діапазоні (5-50 Гц). Супутні гармоніки згладжені, пік високочастотного шуму пригнічений. Можна зробити висновок: Високе демпфування, плавне зниження амплітуди, придушення резонансів.

Спектр 2: Гумотехнічний виріб. Пік на 18 Гц знижується лише на ~30%. Чітко виражена друга гармоніка на 36 Гц. У діапазоні 40-50 Гц – ріст шуму. Можна зробити висновок: Обмежена ефективність у вузькому частотному діапазоні, схильність до резонансів.

Спектр 3: Бітумно-полімерна мастика. Пік на 18 Гц практично не пригнічений. Значне підсилення сигналу в зонах 30-35 Гц. Спостерігається затухання лише після 45 Гц. Можна зробити висновок: Слабка демпфуюча здатність, погане придушення низькочастотних коливань, неефективність у транспортних вібраційних діапазонах.

Зображемо на рис. 2 порівняльний спектр вібрацій демпфуючих матеріалів.

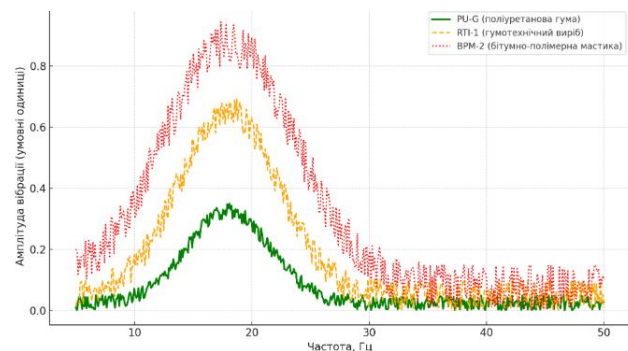


Рис. 2 – Залежність амплітуди від частоти

Бачимо графік, який ілюструє порівняння спектрів вібрацій для трьох демпфуючих матеріалів: Поліуретанова рідка гума – демонструє найменші амплітуди вібрацій у всьому діапазоні частот. Гумотехнічний виріб – помірна здатність до поглинання, помітний резонансний пік. Бітумно-полімерна мастика – слабе демпфування, особливо в діапазоні 30-40 Гц.

Результати експериментів наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати експериментів				
Матеріал	Коефіцієнт внутрішнього демпфування (ζ)	Коефіцієнт передачі вібрації (K_t)	Зниження амплітуди (%)	Ресурс ($\times 10^6$ циклів)
Поліуретанова рідка гума	0.065	0.42	-58.3	4.2
Гумова прокладка (ГТВ)	0.034	0.68	-32.0	1.1
Бітумно-каучукова мастика	0.048	0.57	-43.1	0.6

Поліуретанова рідка гума показала найкращий демпфуючий ефект – зниження амплітуди майже на 60% і мінімальний коефіцієнт передачі вібрації. Завдяки хімічній адгезії до металу та рівномірному покриттю, поліуретан забезпечив високу стійкість до розшарування під навантаженням і циклічним впливом. Гумотехнічні вироби виявилися менш ефективними в умовах високих температурних коливань (спостерігалось зниження еластичності при $<-20^\circ\text{C}$). Мастика швидко деградувала при механічному стиранні та не забезпечувала стабільного контакту.

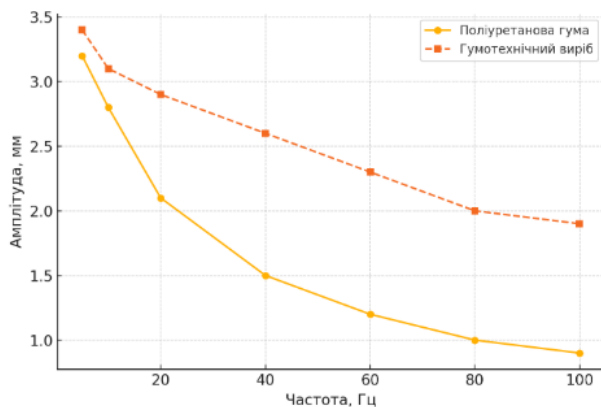


Рис. 3 – Залежність амплітуди від частоти

На рис. 3 зображена залежність амплітуди коливань від частоти.

Залежність амплітуди коливань від частоти рис. 4. Показує, як поліуретанова рідка гума ефективніше знижує амплітуду при зростанні частоти вібрацій у порівнянні з гумотехнічним виробом.

Залежність коефіцієнта демпфування ζ від температури. Демонструє, що поліуретан зберігає або покращує свої демпфуючі властивості в широкому температурному діапазоні, тоді як традиційна гума їх втрачає.

На рис. 5 зображений графік порівняння довговічності демпфуючих матеріалів.

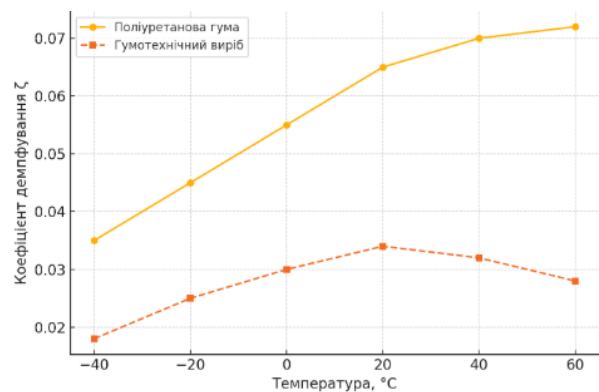


Рис. 4 – Залежність коефіцієнта демпфування від температури

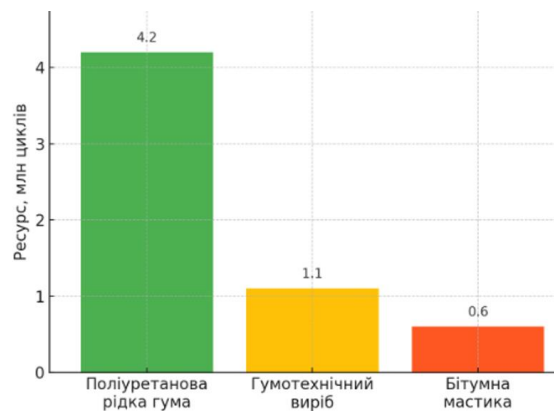


Рис. 5 – Порівняння довговічності демпфуючих матеріалів

На цьому графіку видно, що поліуретанова рідка гума має суттєво вищий ресурс – понад 4 мільйони циклів, що у 4-7 разів перевищує довговічність традиційних демпфуючих матеріалів, таких як гумотехнічні вироби, мастики або стрічки. Це підтверджує її ефективність і перспективність для застосування у вантажному вагонобудуванні.

6. Оцінка економічної доцільності та довготривалої ефективності впровадження поліуретанової рідкої гуми як демпфіруючого матеріалу у вагоно- та локомотивобудуванні передбачає порівняння вартості,

ресурсної економії, витрат на обслуговування та загального впливу на життєвий цикл конструкції. В табл. 6 покажемо економічну доцільність, довготривалу ефективність та вартість впровадження.

Прямі витрати на впровадження поліуретану у 1,5-2,5 рази більші, проте вони компенсуються за рахунок довшого терміну служби та менших витрат на ремонт.

Економія за життєвий цикл. Умовний приклад для 1 вагона на 15 років експлуатації наведений в табл. 7.

Таблиця 6

Економічна доцільність і довготривала ефективність матеріалів

Показник	Поліуретан	Традиційна гума	Мастика
Собівартість матеріалу, грн/кг	180–220	80–100	40–60
Середня витрата на 1 вагон, кг	25–30	20–25	18–20
Вартість нанесення (з роботою), грн	~8 000	~5 000	~3 000
Загальні стартові витрати/вагон	~12 000 грн	~7 000 грн	~4 500 грн

Таблиця 7

Умовний приклад економії за життєвий цикл для 1 вагона на 15 років експлуатації

Показник	Поліуретанова гума	Традиційна гума	Мастика
Початкові витрати на матеріал і монтаж, грн	12 000	7 000	4 500
Вартість ремонтів/обслуговування, грн/15 років	6 000	15 000	25 000
Збитки від простою (10 днів × 2 тис. грн/день)	20 000	40 000	50 000
Загальні витрати	38 000	62 000	79 250

Загальна економія порівняно з традиційною гумою – 24 000 грн (38,71%).

На рис. 6 побудований графік загальної вартості використання для одного вагона протягом 15 років: поліуретанова гума: ~38 000 грн, традиційна гума: ~62 000 грн, мастика: ~79 250 грн.

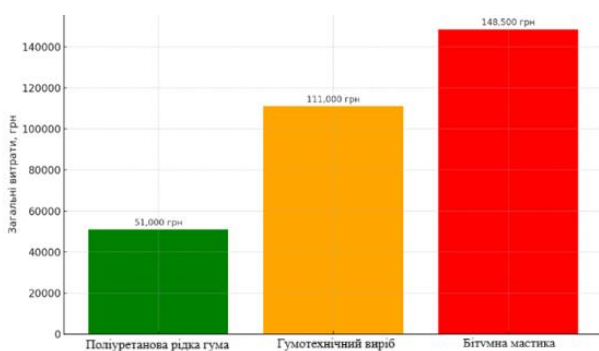


Рис. 6 – Загальна вартість використання

Впровадження поліуретанової рідкої гуми дозволяє економити до 24 000 грн на кожному вагоні протягом життєвого циклу завдяки меншій кількості замін, техобслуговування та простоїв.

Висновки

Отримані дані свідчать, що рідка поліуретанова гума за рахунок поєднання еластичності, високого внутрішнього тертя та термостійкості може ефективно використовуватися як демпфуючий шар у вузлах вантажних вагонів, підвищуючи їхню надійність та довговічність.

Поліуретанова рідка гума є ефективним демпфіруючим матеріалом для застосування в несучих конструкціях рухомого складу. Вона значно знижує рівень вібрацій і захищає конструкції від передчасного зносу, що дозволяє подовжити життєвий цикл вагонів без суттєвих капіталовкладень у ремонт. Використання такого матеріалу є перспективним напрямком у підвищенні надійності елементів вагона, особливо в умовах підвищених механічних навантажень та вібрацій.

Введення шару поліуретанової гуми з пружно-в'язкими характеристиками суттєво змінює динамічні властивості елементів вантажного вагона, зменшуючи амплітуду та тривалість коливань. Демпфуючий шар значно знижує динамічні напруження, що позитивно впливає на втомну міцність і подовжує ресурс основних несівних елементів. Моделювання довело доцільність застосування такого покриття в критичних зонах впливу вібрацій та ударних навантажень, особливо в

зонах підвищеного зносу (візки, балки, зони стикування).

Рідка поліуретанова гума значно перевищує традиційні матеріали за показниками поглинання вібрації та збереження функціональності у складних умовах експлуатації. Її застосування у вагонобудуванні дозволяє зменшити вібраційні навантаження на конструкції та подовжити термін їх експлуатації щонайменше в 2-3 рази. Враховуючи довговічність та стабільність властивостей, доцільним є впровадження поліуретанових систем для модернізації вузлів амортизації та гасіння коливань у вантажних вагонах.

Попри вищу початкову вартість, використання поліуретанової рідкої гуми є економічно доцільним у довготривалій перспективі, особливо в умовах інтенсивної експлуатації вагонного парку: зниження сукупних витрат на 40-60% протягом життєвого циклу, підвищення ресурсу конструкцій на 20-25%, зменшення витрат на технічне обслуговування і ремонти. Додатково: зменшення шуму та вібрацій – покращення умов для обладнання та пасажирів, підвищення безпеки – зниження ризику руйнування зварних з'єднань, менше навантаження на докільця – через зниження частоти заміни та утилізації матеріалів.

Перелік використаних джерел

- [1] Study on properties of polyurethane grouting foam material for high speed railway track lifting / Han W., Zhu Y., Cui Y., Tang J. // *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics* / edited by E. Tutumluer, X. Chen, Y. Xiao. Singapore: Springer, 2020. Pp. 527-543. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2349-6_33.
- [2] Bio-based thermoplastic polyurethane derived from polylactic acid with high damping performance / Zhou X. et al. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 154. Article 112619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112619>.
- [3] Tetraphenylphenyl modified damping additives for silicone rubber: Experimental and molecular simulation investigation / L. Zhu et al. *Materials & Design*. 2021. Vol. 202. Article 109551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109551>.
- [4] Development of vibration damping materials based on butyl rubber: Phase equilibrium, rheological and dynamic properties / K.V. Pochivalov et al. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. Vol. 138. Article 50196. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.50196>.
- [5] Experimental and numerical testing of prototypical under ballast mats produced from deconstructed tires: Effect of mat thickness / Kraśkiewicz C., Zbiciak A., Pełczyński J., Al Sabouni Zawadzka A. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 369. Article 130559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130559>.
- [6] Farooq M.A., Nimbalkar S. Monotonic and cyclic tri-axial testing of untreated and polyurethane-treated soil and soil-rubber mixtures. *Acta Geotech*. 2024. Vol. 19. Pp. 605-630. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02100-2>.
- [7] Reducing wheel-rail surface damage by incorporating hydraulic damping in the Bogie primary suspension / C. Qu. *Vehicle System Dynamics*. 2022. Vol. 61(8). Pp. 1916-1936. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2092012>.
- [8] Polyurethane grouting materials with different compositions for the treatment of mud pumping in ballastless track subgrade beds: properties and application effect / Z. Huang et al. *Railway Engineering Science*. 2022. Vol. 30. Pp. 204-220. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00270-x>.
- [9] Kondratiev A.V., Kovalenko V.O. Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space science and technology*. 2019. Vol. 25, no. 4(119). Pp. 3-21. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.003>.
- [10] Golovanevskiy V., Kondratiev A. Elastic properties of steel-cord rubber conveyor belt. *Experimental Techniques*. 2021. Vol. 45, iss. 2. Pp. 217-226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00439-3>.
- [11] Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. Modification of Two-Stage Coaxial Gearbox. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2020; Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 1. Pp. 28-35. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_4.
- [12] Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock / Sulim A.O., Fomin O.V., Khozha P.O., Mastepan A. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Iss. 5(1). Pp. 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>.
- [13] Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2, no. 1(92). Pp. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>.
- [14] Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions / S. Kurdiuk et al. *Drones*. 2025. Vol. 9(3). Article 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.
- [15] Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects / O. Melnyk et al. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. Pp. 165-188. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
- [16] A magnetorheological elastomer rail damper for wide-band attenuation of rail noise and vibration / S. Sun et al. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2019. Vol. 31(2). Pp. 220-228. DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X19873406>.

USE OF POLYURETHANE-BASED LIQUID RUBBER AS A DAMPING MATERIAL IN RAILCAR MANUFACTURING TO EXTEND THE SERVICE LIFE OF LOAD-BEARING STRUCTURES

Fomin O.V.	D.Sc. (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2387-9946 , e-mail: fomin1985@ukr.net ;
Kozynka O.S.	postgraduate student, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3012-581X , e-mail: kozynka1520mm@gmail.com ;
Melnyk O.M.	D.Sc. (Engineering), professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9228-8459 , e-mail: m.onmu@ukr.net ;
Sulym A.O.	PhD (Engineering), deputy director, State enterprise «Ukrainian scientific railway car building research institute», Kremenchuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8144-8971 , e-mail: sulim1.ua@gmail.com ;
Gunko I.V.	postgraduate student, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6641-859X , e-mail: gunya2006@gmail.com

The article investigates the physico-mechanical properties of liquid polyurethane rubber, which is a promising damping material for use in the structural components of railway rolling stock. This article presents the results of a study on the effectiveness of using polyurethane-based liquid rubber as a damping material in the structural components of railway rolling stock, with the aim of extending their service life and improving operational reliability. The railcar manufacturing industry requires the integration of modern materials capable of effectively reducing vibration levels and dynamic loads transmitted to the load-bearing elements of the car body and bogies. The study includes a comparative analysis of the vibration characteristics of polyurethane liquid rubber, traditional rubber-based materials, and bitumen-polymer mastic using spectral analysis within the 5–50 Hz frequency range. Experimental results indicate that polyurethane rubber provides the most effective vibration damping, reducing oscillation amplitudes by up to 50% compared to conventional materials. It is particularly efficient in suppressing resonance peaks, which positively affects the structural fatigue resistance. Special attention is given to the financial and economic assessment of the feasibility of implementing this new technology. The developed Total Cost of Ownership (TCO) model demonstrates a reduction of over 35–40% in cumulative maintenance, repair, and downtime costs over a 15-year operational cycle. The analysis also accounts for the initial implementation cost, the replacement frequency of the damping layer, and the economic losses associated with equipment downtime due to technical failures. The results confirm that the use of polyurethane rubber is technically, economically, and operationally justified. The authors recommend adopting this solution in railcar production processes and suggest further research into its compatibility with other components of rolling stock and its influence on passenger comfort.

Keywords: polyurethane liquid rubber; damping; railcar manufacturing; vibration spectrum; structural reliability; service life; economic efficiency; passive vibration protection.

References

- [1] W. Han, Y. Zhu, Y. Cui, and J. Tang, "Study on properties of polyurethane grouting foam material for high speed railway track lifting," in *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics*, E. Tutumluer, X. Chen, Y. Xiao, Eds., Singapore: Springer, 2020, pp. 527-543. doi: 10.1007/978-981-15-2349-6_33.
- [2] X. Zhou, T. Shou, R. Liang, S. Hu, P. Yu, and L. Zhang, "Bio based thermoplastic polyurethane derived from polylactic acid with high damping performance," *Industrial Crops and Products*, vol. 154, article 112619, 2020. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112619.
- [3] L. Zhu et al., "Tetraphenylphenyl modified damping additives for silicone rubber: Experimental and molecular simulation investigation," *Materials & Design*, vol. 202, article 109551, 2021. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109551.
- [4] K.V. Pochivalov et al., "Development of vibration damping materials based on butyl rubber: Phase equilibrium, rheological and dynamic properties," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 138, article 50196, 2021. doi: 10.1002/app.50196.
- [5] C. Kraśkiewicz, A. Zbiciak, J. Pełczyński, and A. Al Sabouni Zawadzka, "Experimental and numerical testing of prototypical under ballast mats produced from deconstructed tires: Effect of mat thickness," *Construction and Building Materials*, vol. 369, article 130559, 2023. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130559.
- [6] M.A. Farooq, and S. Nimbalkar, "Monotonic and cyclic triaxial testing of untreated and polyurethane-treated soil and soil–rubber mixtures," *Acta Geotech*, vol. 19, pp. 605-630, 2024. doi: 10.1007/s11440-023-02100-2.
- [7] C. Qu et al., "Reducing wheel–rail surface damage by incorporating hydraulic damping in the Bogie primary suspension," *Vehicle System Dynamics*, vol. 61(8),

- pp. 1916-1936, 2022. doi: **10.1080/00423114.2022.2092012**.
- [8] Z. Huang, Q. Su, J. Huang, M. Dong, D. Li, and T. Liu, "Polyurethane grouting materials with different compositions for the treatment of mud pumping in ballastless track subgrade beds: properties and application effect," *Railway Engineering Science*, vol. 30, pp. 204-220, 2022. doi: **10.1007/s40534-021-00270-x**.
- [9] A.V. Kondratiev, and V.O. Kovalenko, "Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading," *Space science and technology*, vol. 25, no. 4(119), pp. 3-21, 2019. doi: **10.15407/knit2019.04.003**.
- [10] V. Golovanevskiy, and A. Kondratiev, "Elastic properties of steel-cord rubber conveyor belt," *Experimental Techniques*, vol. 45, iss. 2, pp. 217-226, 2021. doi: **10.1007/s40799-021-00439-3**.
- [11] S. Shevchenko, A. Mukhovaty, and O. Krol, "Modification of Two-Stage Coaxial Gearbox," in *Proc. of the 6th Int. Conf. on Industrial Engineering ICIE 2020, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, A.A. Radionov, Ed., 2020, vol. 1, pp. 28-35. doi: **10.1007/978-3-030-54814-8_4**.
- [12] A.O. Sulim, O.V. Fomin, P.O. Khozya, and A. Mastepan, "Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock," *Scientific Bulletin of National Mining University*, iss. 5 (1), pp. 79-87, 2018. doi: **10.29202/nvngu/2018-5/8**.
- [13] O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovsky, P. Khozia, and V. Ishchenko, "Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock," *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol. 2, no. 1(92), pp. 63-71, 2018. doi: **10.15587/1729-4061.2018.126080**.
- [14] S. Kurdiuk et al., "«Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions," *Drones*, vol. 9(3), article 174, 2025. doi: **10.3390/drones9030174**.
- [15] O. Melnyk, M. Bulgakov, O. Fomin, S. Onyshchenko, O. Onishchenko, and I. Pulyaev, "Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects," *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, vol. 127, pp. 165-188. doi: **10.20858/sjsutst.2025.127.10**.
- [16] S. Sun et al., "A magnetorheological elastomer rail damper for wideband attenuation of rail noise and vibration," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 31(2), pp. 220-228, 2019. doi: **10.1177/1045389X19873406**.

Стаття надійшла 03.10.2025

Стаття прийнята 29.11.2025

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Використання рідкої гуми на основі поліуретану як демпфіруючого матеріалу у вагобудуванні для збільшення життєвого циклу насінних конструкцій / О.В. Фомін та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 198–208. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359957>.

ПІДХОДИ ДО ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ ТЕПЛОВОЗНИХ ДИЗЕЛІВ
ПРИ ОБМЕЖЕННІ ВИХІДНИХ ДАНИХ

Фалендиш А.П.	д-р техн. наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3602-7945 , e-mail: faphiit@gmail.com ;
Терещак Ю.В.	канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2603-3535 , e-mail: Yurii.V.Tereshchak@lpnu.ua ;
Іванченко Д.А.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3024-3930 , e-mail: ivanchenko_d_a@pstu.edu ;
Джус О.В.	зав. лабораторії, Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, м. Львів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7577-4049 , e-mail: djusov22@gmail.com ;
Грицишин П.М.	провідний науковий співробітник, Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, м. Львів, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5909-947X , e-mail: p.hrytsyshyn@gmail.com

Визначення причини непрацездатності та відмов рухомого складу після планового ремонту є складним завданням. Це пояснюється різноманітністю факторів, що їх спричиняють, та складністю самого рухомого складу. В основу роботи покладено практичні дослідження по визначенню причин виникнення несправностей тепловозного двигуна. В роботі запропоновані підходи по виявленню несправностей тепловозних дизелів при наявності різних обмеженнях вихідних даних. Визначено причини відмов дизелів, до яких належать особливості конструкції їх та рухомого складу різних типів, особливості несправностей та поломок для конкретних серій та моделей вузлів і агрегатів. Наведено та проаналізовано основні причини пошкоджень дизельних двигунів тепловозів, які можна визначити з високою достовірністю, якщо використовувати просту методику, в якій усі відомі ознаки пошкоджень. Дані пошкодження дизельних енергетичних установок поділяються на основні, підтверджуючі та уточнюючі. Запропонована процедура пошуку та усунення несправності тепловозного дизеля. Розроблений порядок розслідування причин виникнення відмов дизеля та його систем включає етапи визначення та опису об'єкта дослідження, висування гіпотез причин відмов та їх перевірку і розробку заходів та рекомендацій по причинах виходу зі строю та їх обґрунтуванню. На конкретному прикладі проведено аналіз наявності та важливості цих ознак при дослідженні причин відмови дизельного двигуна маневрового локомотива після проведеного йому планового ремонту у стороннього виконавця. Аналіз при цьому виконувався за допомогою діаграм Ісікави та Парето. Як основну гіпотезу первопричини виходу зі строю шатунно-поршневої групи дизеля запропоновано визнати порушення геометрії блоку циліндрів. Проведене дослідження дозволило вибрати версію причини несправності, яка потім також швидко підтверджується та уточнюється за іншими ознаками – підтверджуючими та уточнюючими.

Ключові слова: рухомий склад; локомотивна енергетична установка; відмова; працездатний стан; ремонт; експлуатація тепловозів.

Постановка проблеми

Для підвищення ефективності надання послуг залізничним транспортом на залізницях України проводять реформи. Одним з напрямків реформування є реформування локомотивного господарства, яке буде розділено на частини. Планується виділити ряд дочірніх підприємств, які будуть представляти послуги в постачанні рухомого складу, його експлуатації та ремонті. Оскільки ці підприємства будуть незалежними один від одного, то при виникненні причин виходу його зі строю постане питання визначення первопричин його виходу. Це можуть бути і конструктивні недоліки, і погана експлуатація. А враховуючи, що в результаті реформування до інфраструктури залізниць для перевезень будуть допущені ще інші власники локомотивів, то питання визначення первопричин виходу зі строю рухомого складу набуває важливого значення.

Важливим фактором, що заважає отриманню такої інформації, є відсутність методик, які могли би використовуватися для визначення причини несправностей із необхідним ступенем достовірності. Суттєво це стосується тяжких ушкоджень при повністю зруйнованих деталей або коли доступність пошкодженого рухомого складу з певних причин є неможливою. Усе це є перешкоджанням правильному виявленню причинно-наслідкових зв'язків. Питання визначення первопричини несправності та непрацездатності рухомого складу залізниць на даний час залишається невирішеним до кінця та представляє великий інтерес для науковців. Більшість досліджень в цьому напрямку мають теоретичний характер по причині багатфакторного впливу на рухомий склад та його технічної складності. Розробка та впровадження точних методик по визначенню первопричин потребує багато часу та ресурсів.

Для вирішення даної проблеми необхідно розробити підходи по виявленню несправностей тепловозів при обмеженні вихідних даних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питанням визначення першопричин несправності рухомого складу на другому етапі життєвого циклу приділяється багато уваги різними науковими, науково-навчальними та науково-дослідними закладами та промисловими підприємствами.

Так, симбіоз робіт науковців з Харкова, Києва та Луганська багато уваги приділяє оцінці міцності вагонів та його основних вузлів [1-5]. Роботи під керівництвом Фоміна О. та Ловської А. направлені на визначення раціональних конструкцій вагонів та його складових. Роботи в цьому напрямку виконуються вченими і в University of Zilina. Так, в працях [6-12] розглядаються питання визначення несправності конструкції вагонів на основі моделювання міцності механічної частини вагонів.

В працях вчених [13-17] розглядаються питання виявлення несправності паливної апаратури і причини їх виходу зі строю в більшій мірі з точки зору їх діагностики. Також з точки зору діагностики виявлення несправності, а не виявлення первопричин її виникнення, в роботі [18] при діагностиці пропонується використовувати тепловізійне обладнання.

Немаловажне значення дана проблема має і для вирішення судових спорів при з'ясуванні причин появи несправності залізничного транспорту. Даним питанням займаються працівники Львівського науково-дослідного інституту судових експертиз, деякі результати їх робіт висвітлені в працях [19-22]. Так, в праці [22] автори розглядають питання встановлення технічного стану рухомого складу залізниць на момент виникнення транспортної події. У відповідності з ДСТУ 2860-94 визначається об'єкт дослідження, його основна і допоміжна функції та його технічний стан і несправність. Для прикладу вони розглядають інцидент з тепловозом 2М62 і оцінюють стан гальмівної системи.

Але основні дослідження інституту судових експертиз припадають на оцінку стану гальмівних систем локомотивів, а відповідно і розрахунку гальмівного шляху поїздів, які викладені в розробленій методиці [23]. Питанню виявлення причин відмов дизелів в експлуатації приділяється набагато менше уваги.

Мета статті

Зі зробленого аналізу слідує, що питанням визначення первопричин виходу зі строю рухомого складу залізниць приділяється недостатньо уваги і вони, в основному, направлені на визначення міцності конструкції або діагностику виявлення вже самої несправності рухомого складу. Тому метою даної статті є розробка методик та підходів по визначенню першопричин виходу зі строю рухомого складу під час його експлуатації.

Матеріали та методи

На вихід зі строю рухомого складу впливає дуже багато факторів. Це і конструкція рухомого складу, і якість виготовлення та матеріали, і правильність експлуатації та обслуговування, і якість ремонту. Охопити одночасно всі ці фактори в моделі представляє дуже важку задачу.

Тому в статті розглянемо визначення причин відмови лише силових установок тепловозів. Як приклад візьмемо випадок виходу з ладу силової установки К6S310DR маневрового тепловоза ЧМЕЗ, яка сталася під час проведення реостатних випробувань тепловоза після проведеного йому планового ремонту.

В цьому випадку об'єктом нашого дослідження є процес функціонування силових установок тепловозів в експлуатації та при проведенні реостатних випробувань після планових видів ремонту. Предметом дослідження є методики та підходи по визначенню причин відмов дизелів тепловозів в експлуатації та при проведенні їм реостатних випробувань.

При розробці методики використовуються методи аналізу ієрархій, методи оцінки технічного рівня транспортних засобів, методи аналізу та синтезу. При проведенні розрахунків та моделюванні використовуються програмні продукти Microsoft Office.

Виклад основного матеріалу

Розробляти технологію пошуку причин несправності дизеля маневрового тепловозу будемо по процедурі, яка враховує усунення несправностей тепловозних дизелів при ремонті та представлена на рис. 1.

- I. Фіксація інформації по виходу зі строю тепловозу
- II. Перевірка стану базових систем дизеля
- III. Перевірка стану дизеля по причинах виходу
- IV. Діагностика дизеля з використанням інструментів та приборів
- V. Визначення причин несправності дизеля
- VI. Усунення несправності дизеля.
- VII. Контрольний запуск дизеля та перевірка параметрів його роботи

Рис. 1 – Процедура пошуку та усунення несправностей тепловозного дизеля

Розглянемо більш детально етапи пошуку несправності тепловозного дизеля (V пункт процедури).

Оскільки наша країна збирається вступати в ЄС, нам необхідно дотримуватись Директив ЄС стосовно розслідування транспортних подій [24]. Тому подальші наші дослідження будемо вести з врахуванням вимог ДСТУ EN IEC 31010:2022 та ДСТУ EN

62740:2022 [25-26]. Нами пропонується наступна методика визначення першопричин (RCA) виходу зі строю дизеля тепловоза, яка враховує стандарт [25], згідно з яким виділяється п'ять етапів.

На першому етапі визначення причин несправності дизеля виконується фіксація виявлених несправностей по конструктивним ознакам МПко (явні поломки дизеля та його системи) або по непрямим ознакам. Непрямі ознаки можна описати масивом зовнішніх ознак МПзо та масивом параметрів двигуна МПпд:

- МПко = {розбитий корпус; розбита клапанна коробка};
- МПзо = {димність; сторонні шуми; вібрації};
- МПпд = {потужність; запуск; перегрів масла; перегрів води; витрата масла; витрата води}.

При цьому необхідно зафіксувати умови, при яких появилася або появляється несправність: холостий хід; робота під навантаженням; виникнення до моменту прогріву; виникнення після прогріву.

Оскільки причина виникнення несправності на першому етапі невідома, тому необхідно розглянути кілька найімовірніших гіпотез по відмові. Інформацію у встановленні причин несправності можна отримати від інженерно-технічного складу підприємства. Джерелами встановлення причин виникнення несправностей можуть бути також інші нормативні документи: технічні та рекламацийні акти, технічні звіти, бюлетені з доопрацювання вузлів, агрегатів та деталей.

При невідомості причин виникнення несправності треба зазначити кілька найімовірніших причин. Інженерно-технічний склад підприємства може надати допомогу у встановленні причин несправності. Джерелами встановлення цих причин можуть бути також рекламацийні та технічні акти, технічні звіти, бюлетені з доопрацювання вузлів, агрегатів та деталей.

Залежно від причини виникнення несправності можна класифікувати на конструктивно-виробничі; експлуатаційні; ремонтні.

Конструктивно-виробничі несправності обумовлені недосконалістю застосованих методів конструювання, помилками конструктора, невідповідністю матеріалу до заданих вимог, недосконалістю технологічного процесу або його порушенням. Експлуатаційні несправності обумовлені недотриманням встановлених правил технічного обслуговування чи експлуатації. Ремонтні несправності обумовлені недосконалістю чи порушенням технології ремонту, низькою якістю ремонту.

Згідно Стандарту [25] для ідентифікації, аналізу, представлення можливих причин виникнення відмови дизеля, взаємозв'язку між подією та усіма факторами, які можуть на неї впливати, доцільно використовувати методику RCA «Діаграма риб'ячої кістки (Fishbone) або діаграму Ісікави (Ishikawa Diagram)». Дана методика всебічно розглянута в [27], а результати щодо виявлення причини несправності двигуна представлені у вигляді схеми Ісікава (рис. 2) для подальшого аналізу.

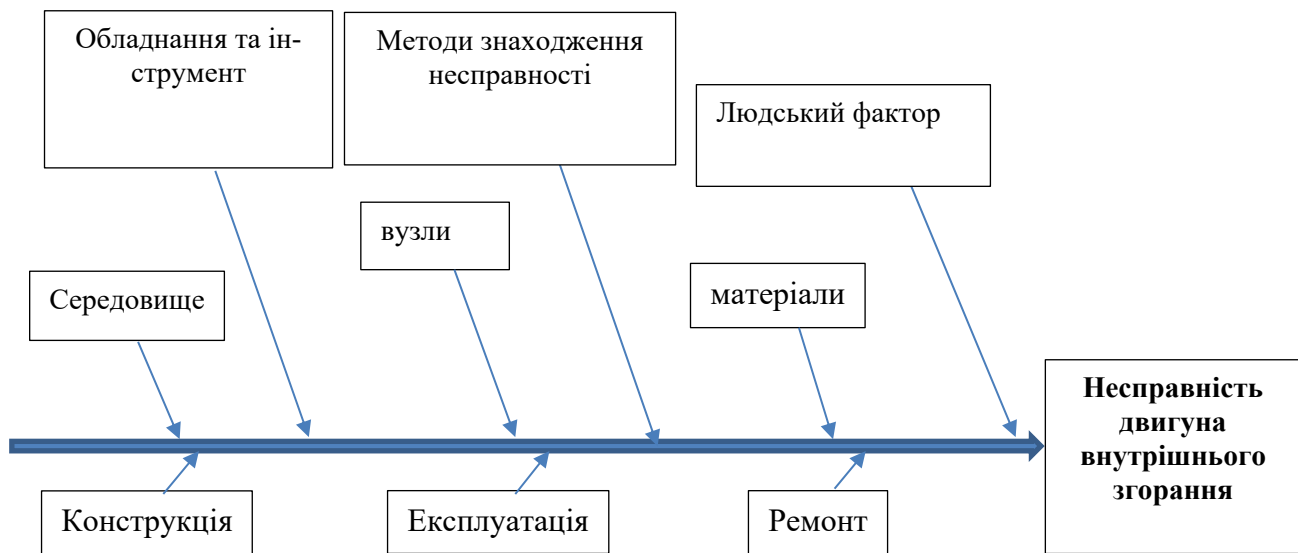
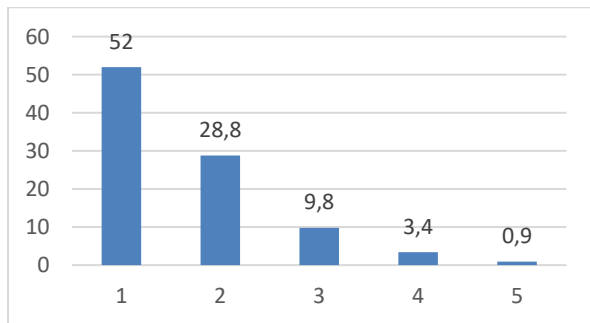


Рис. 2 – Діаграма Ісікави для оцінки несправностей та відмов силової установки тепловозу

У встановленні розподілу відмов та несправностей за системами, вузлами, агрегатами, видами (тріщини, знос, негерметичність) та класифікаційними групами проведений аналіз отриманих даних дозволив виділити колінчастий вал та шатунно-поршкову групу, як одні з очевидних причин аварії дизеля тепловоза. На

основі досліджень [27-28] були виявлені ненадійні агрегати шатунно-поршнєвої групи і найпоширеніші у них види несправностей. Для наочності результат аналізу представлений у вигляді діаграм Парето (рис. 3).



1 – руйнування шатунного або корінного підшипника; 2 – деформація та руйнування стрижня шатуна; 3 – руйнування клапана; 4 – руйнування поршневого пальця; 5 – інші руйнування

Рис. 3 – Діаграма Парето розподілу основних відмов шатунно-поршневої групи дизеля за видами.

Зважаючи на даний аналіз, подальші дослідження проводилися з корінними та шатунними підшипниками двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). При цьому складно, а в деяких випадках і неможливо провести перевірочні розрахунки несправностей, пов'язані зі порушенням роботи ущільнень, зносом пар, що труться, руйнуванням деталей складної форми і т. п., тому що у цих випадках складно врахувати та визначити сукупність впливу різних факторів на механізм

виникнення несправності: вивчити та описати конструкцію об'єкта, скласти опис та топографію несправності, умови роботи та експлуатації, обставин, при яких виникла несправність, тим самим методи її виявлення, рівень діючих навантажень, скласти ескізи деталей.

При виконанні цього етапу роботи найбільшою складністю є вивчення величин діючих зовнішніх навантажень та експлуатаційних умов роботи підшипника. Спеціальна технічна література з питань надійності, міцності та довговічності подібних вузлів, рекомендаційні акти можуть надати відповіді на ці питання.

Дослідження по визначенню первопричин виникнення несправності у тепловозному дизелі запропоновано проводити за блок-схемою, наведеною на рис. 4.

Як приклад, проведемо аналіз факторів, що можуть стати причиною виходу підшипників колінчастого валу дизеля з ладу.

Можливість провести випробування з різним впливом на них різних факторів дозволяє отримати об'єктивні експлуатаційні дані щодо виходу підшипників з ладу.

Враховуючи практичну неможливість цього, подальше дослідження проводиться, спираючись на викладки з [3] щодо проведення повноцінних польових випробувань дизельних двигунів, що випускаються в США.

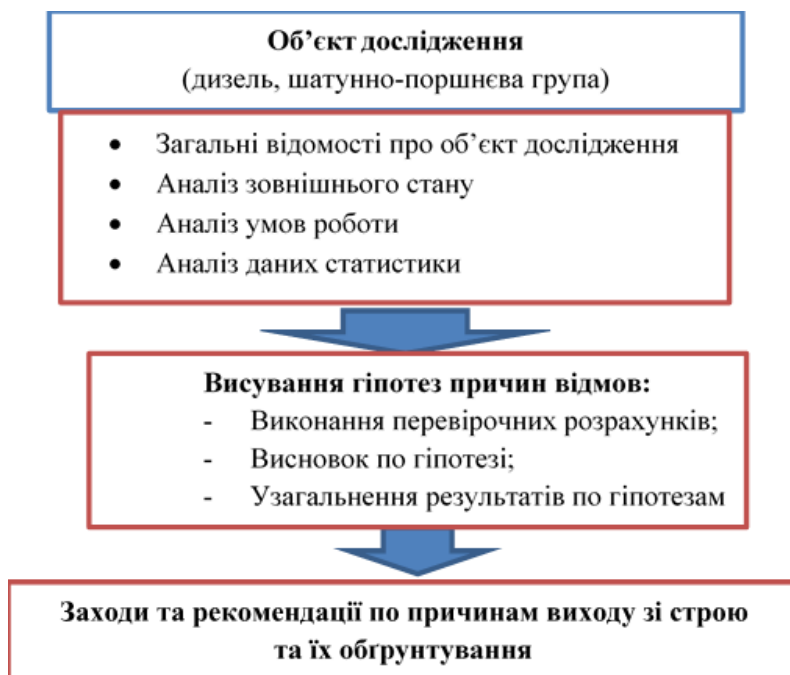


Рис. 4 – Порядок розслідування причин виникнення відмов дизеля та його систем

Як показав аналіз, підшипники дизельних двигунів можуть працювати 1,6 млн км і більше без заміни. При тому, щоб досягти такого терміну служби, потрібна комбінація кількох факторів:

- Підшипники необхідно правильно встановити.

- Колінчастий вал повинен бути виготовлений із правильними контурами шийок з відповідною якістю обробки поверхні.

- Необхідно виконувати належне технічне обслуговування за термінами заміни повітряного та масляного фільтрів.

- Необхідно дотримуватися рекомендацій виробника двигуна по технічному обслуговуванню щодо інтервалів заміни олії.

- Виконувати роботи по запобіганню потрапляння в моторне масло палива та охолоджуючої рідини.

- Використання олії відповідних стандарту якості API та градацій в'язкості SAE.

- Контролювати експлуатаційні умови двигуна для унеможливлення сильного навантаження, надмірних оборотів, перегріву двигуна необхідність.

Найбільший інтерес представляють стендові або експлуатаційні випробування підшипників двигуна. Особливий інтерес представляє не тільки знос підшипників, а і їх корозія під впливом різних факторів. Проведені стендові випробування підшипників дизеля Cummins на корозію (тест Mask T-9) та випробування підшипників на знос для бензинового двигуна (тест L-38) показали непогані результати. За період спостережень було зібрано багато інформації по виходу моторних підшипників із ладу. Але аналіз причин, які спричиняють відмову дизельного двигуна в експлуатації, показав наступне.

1. Витік охолоджуючої рідини може призвести до корозії підшипників. Кородують всі мідно-свинцеві підшипники (шатунні, корінні та підшипники опори валу), а також масляний радіатор.

2. Витік олова із покривного шару в основному відбувається при відносно малому пробігу (до 450 000 км). Дослідження показали, що два різних постачальника постачали дані двигуна підшипниками, і підшипники одного з них виходили з ладу частіше і в динамометричних, і в польових випробуваннях. Усі вони демонстрували видалення покривного шару.

3. Втрата підшипником покривного шару через незначні витоки охолоджувальної рідини.

4. Відділення мідно-свинцевого металу вкладиша від сталевій основі за рахунок порушення зчеплення в підшипнику.

5. Абразивний знос покривного слою. Це один з найпоширеніших механізмів аварії підшипників. При цьому цей тип аварій на сьогодні з успіхом усувається за умов застосування чудових систем фільтрації моторного масла. Проте, поломки підшипників, що обумовлені брудом, відбуваються в дуже потужних двигунах. Алумінієво-оловяні покриття більш стійкі до зносу та втоми, але мають меншу поглинальну здатність для бруду. Від чистоти двигуна та очисної системи моторного масла більшою мірою залежить їх безаварійна робота.

Результати та їх обговорення

З використанням запропонованої методики було визначено першопричини виходу зі строю дизеля

тепловозу ЧМЕЗ при проведенні реостатних випробувань після виконаних ремонтних робіт.

На першому етапі була зібрана інформація про вихід зі строю дизеля K6S310DR. Спочатку була зібрана інформація про дизель K6S310DR тепловозу ЧМЕЗ та особливості проведення реостатних випробувань для нього. Потім зібрана інформація про момент виникнення відмови дизеля. Так, при проведенні реостатних випробувань тепловозу після виконаних ремонтних робіт на 6-тій позиції контролера машиніста виник сторонній звук. Після припинення випробувань та зупинки дизеля було виконано його часткове розбирання та огляд, який показав, що в одному випадку виникло підклинювання поршня (рис. 5), в іншому – обрив гільзи (рис. 6).



Рис. 5 – Заклинювання поршню в гільзі циліндру: а – поршень, який заклинило; б – сліди заклинювання на гільзі циліндру



Рис. 6 – Обрив гільзи циліндру

Аналіз проведених ремонтних робіт по дизелю K6S310DR на тепловозі ЧМЕЗ показав, що було проведено заміну трьох циліндрових гільз (перший, третій та п'ятий циліндри) на нові. Заміна шатунно-поршневої групи не проводилась.

Після цього було проведено огляд дизеля та заміри поршня та циліндрової гільзи першого циліндру (рис. 7).



Рис. 7 – Обмір параметрів циліндро-поршневої групи

При огляді дизеля були виявлені пошкодження бокової площини блока циліндрів. На бічній поверхні поршня та внутрішній поверхні гільзи виявлено сліди «прихвату» поршня до гільзи та наволочення алюмінію. Проведені вимірювання поршня підтвердили відповідність його геометричних параметрів встановленим ЦТ-0187 «Правилами технічного обслуговування і поточних ремонтів тепловозів серії ЧМЕЗ, ЧМЕЗТ, ЧМЕЗЕ» [29]. Вимірювання циліндрової гільзи виявили овальність нижнього поясу гільзи. Сліди підклинювання поршня в гільзі у вигляді смуг алюмінієвого шару розташовані рівномірно по всій поверхні гільзи з характерними потовщенням на рівні поясу гумових ущільнюючих кілець.

В результаті перевірки перпендикулярності площини посадочних буртів до осей циліндричних розточень під циліндрову втулку першого циліндру вимірювання зазорів між встановленою новою гільзою та нижньою посадочною поверхнею виявлена нерівномірність радіального зазору, який складає від 0,04 мм до 0,14 мм. Отримана величина свідчить про неспіввідповідність посадочних місць під циліндрову втулку на 0,1 мм (повинна бути не більше 0,05 мм на довжині 480 мм згідно ЦТ-0124 «Правила капітальних ремонтів КР-1, КР-2 тепловозів серії ЧМЕЗ, ЧМЕЗТ, ЧМЕЗЕ» [30]).

На другому етапі за результатами проведеного дослідження була зроблена попередня гіпотеза, що причиною виходу зі строю циліндро-поршневої групи дизеля К6С310DR («прихвату» поршня до гільзи) є порушення геометрії блоку дизеля в наслідок замерзання охолоджуючої води в дизелі.

На наступному етапі була виконана повна перевірка геометрії блоку циліндрів, яка показала невідповідність отриманих замірів Правилам [30]. Відповідно, цих правил, блок дизеля не підлягає ремонту та потребує заміни на справний.

Висновки

В результаті виконаних робіт та аналізу розробленої діаграми Ісікави встановлено, що первопричиною виходу зі строю циліндро-поршневої групи дизеля

К6С310DR є порушення геометрії блоку дизеля. А первопричиною виходу дизеля тепловозу в цілому являється порушення правил експлуатації та ремонту тепловозу в зимовий період, яке проявилось в замерзанні охолоджуючої води в дизелі.

В основу цієї роботи покладено практичні дослідження по визначенню причин виникнення несправності тепловозного двигуна, що має основний вплив на рівень надійності тепловоза. Зроблено аналіз причин виходу з ладу силової установки тепловоза.

Виконаний комплексний аналіз розподілу відмов та несправностей за системами, вузлами, агрегатами, типами (тріщини, знос, витіки) та класифікаційними групами з використанням діаграм Ісікави та Парето.

Запропоновано блок-схему дослідження причин несправності в колінчасто-поршневій дизельній групі та дизелю в цілому.

На основі наявних даних про реостатні випробування дизеля К6С310DR, а також висновків технічної експертизи щодо визначення причин виходу з ладу циліндро-поршневої групи дизеля тепловозу ЧМЕ-3 показано, що первопричиною виходу дизеля зі строю являється порушення правил експлуатації та ремонту тепловозу в холодний період року.

Отримані результати надають змогу в подальшому раціонально проводити експертизи по визначенню причин виходу зі строю силових агрегатів тепловозів. Це дозволить підвищити надійність та ефективність використання дизелів тепловозів в різних умовах їх експлуатації.

Перелік використаних джерел

- [1] Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills / O. Fomin et al. *Materials*. 2021. Vol. 14(8). Article 1915. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>.
- [2] Calculation of Loads on Carrying Structures of Articulated Circular-Tube Wagons Equipped with New Draft Gear Concepts / Lovska A., Fomin O., Kučera P., Pištěk V. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(21). Article 7441. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10217441>.
- [3] Adapting the load-bearing structure of a gondola car for transporting high-temperature cargoes / O. Fomin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 2(7(116)). Pp. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253770>.
- [4] Fomin O., Lovska A. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2(7(110)). Pp. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>.
- [5] Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam / O. Fomin et al. *Materials*. 2021. Vol. 14(12). Article 3420. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>.

- [6] Software analysis for modeling the parameters of shunting locomotives chassis / Falendysh A., Volodarets M., Hatchenko V., Vykhopen I. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. Article 03003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711603003>.
- [7] Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages / Vatulia G., Falendysh A., Orel Ye., Pavliuchenkov M. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. Pp. 301-307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.379>.
- [8] Investigation of Ride Properties of a Rail Vehicle with Whell Defects / Dižo J., Blatnický M., Steišūnas S., Falendysh A. *Transport Means: Proceedings of the International Conference, Trakai, Lithuania, 3–5 October 2018*. Pp. 104-109.
- [9] Fundamentals of modelling the multibody system of a wagon with a deformable component / J. Dižo et al. *Transport Means: Proceedings of the International Conference, Palanga, Lithuania, 02-04 October 2019*, pp. 738-743.
- [10] Modification and analyses of structural properties of a goods wagon bogie frame / Dizo J., Blatnický M., Harušinec J., Falendysh A. *DIAGNOSTYKA*. 2019. Vol. 20, № 1. Pp. 41-48. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/99853>.
- [11] Blatnický M., Dizo J., Falendysh A. Design of a storage mechanism designed for a railway vehicles producer. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7(4.3). Pp. 643-649. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.20723>.
- [12] Calculation of Basic Indicators of Running Safety on the Example of a Freight Wagon with the y25 Bogie / Dižo J., Blatnický M., Molnár D., Falendysh A. *COMMUNICATIONS*. 2022/3. Vol. 24(3). Pp. B259-B266. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2022.3.B259-B266>.
- [13] Хрульова А. Є., Кочуренка Ю. В. Методика оцінки технічного стану дизельних двигунів локомотивів за параметрами робочого процесу. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Транспортне машинобудування. 2017. № 14(1236). С. 52–60.
- [14] Mc Geehan J. A., Ryason P. Million Mile Bearings: Lessons From Diesel Engine Bearing Failure Analysis. *SAE Technical Paper*. 1999. Vol. 108. Pp. 2068-2089. DOI: <https://doi.org/10.4271/1999-01-3576>.
- [15] Проектування, випробовування та експлуатація тягового рухомого складу залізниць. Частина 1. Удосконалення методів та моделей визначення техніко-економічних показників гібридних маневрових тепловозів: кол. моногр. / А. П. Фалендиш та ін. Львів: СПОЛОМ, 2024. 240 с.
- [16] Improvement of diesel injector nozzle test techniques // D. Aulin et al. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. Article 012031. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012031>.
- [17] Розрахунковий комплекс оцінки ефективності використання ресурсозберігаючих технологій очищення систем дизеля та тепловоза / Аулін Д. О., Каграманян А. О., Фалендиш А. П., Рудковський О. В. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 6. С. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i6.119917>.
- [18] Sumtsov A., Falendysh A., Kletska O. Thermal imaging diagnostics locomotives. *MATEC Web Conferences. 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles*, Bydgoszcz, Poland, 25-26 September 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818201004>.
- [19] Сокол Э. Н. Железнодорожно-транспортное происшествие и его механизм (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики). Монография. Львів : ПАІС, 2011. 376 с.
- [20] Болжеларский Я. В. История, тенденции и перспективы судебных железнодорожно-транспортных исследований в Украине. Криминалистика и судебная экспертиология. *Наука, обучение, практика* : сб. материалов Межд. научно-практической конференции, Паланга, Литва, 14-16 сентября 2017. Часть 2. С. 371–389.
- [21] Експертиза залізнично-транспортних пригод: навчальний посібник / М. І. Березовий та ін. 2023. 158 с. DOI: <https://doi.org/10.15802/978-617-8314-48-4>.
- [22] Бобирь Д. В., Болжеларський Я. В. Установлення технічного стану рухомого складу залізниць у судовій залізнично-транспортній експертизі. *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики*. 2010. Вип. 10. С. 484-491.
- [23] Методика розрахунку зупиночного шляху поїзда у судовій залізнично-транспортній експертизі. Реєстраційний код 10.0.08.2014.
- [24] Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on railway safety. 2016. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2016/798/oj> (дата звернення: 11.10.2025).
- [25] ДСТУ EN 62740:2022. Аналіз першопричини (RCA) (EN 62740:2015, IDT; IEC 62740:2015, IDT). [Чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 38 с.
- [26] ДСТУ EN IEC 31010:2022. Керування ризиками. Методи оцінювання ризику (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT). [На заміну ДСТУ IEC/ISO 31010:2013; чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 196 с.
- [27] Двигуни внутрішнього згоряння : підручник : у 6 т. Т. 1 : Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / за ред. А. П. Марченка, А. Ф. Шеховцова. Харків : НТУ «ХПІ», 2004. 464 с.
- [28] Хрулев А. Э., Кочуренко Ю. В. Методика определения причины неисправности ДВС при тяжелых эксплуатационных повреждениях. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2017. №1. С. 52-60. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2017.1.10>.
- [29] ЦТ-0187. Правила технічного обслуговування і поточних ремонтів тепловозів серії ЧМЕЗ, ЧМЕЗТ,

ЧМЕЗЕ : Наказ № 367-Ц від 24.06.2009. Київ, 2009. 380 с.

[30] ЦТ-0124. Правила капітальних ремонтів КР-1, КР-2 тепловозів серії ЧМЕЗ, ЧМЕЗТ, ЧМЕЗЕ : Наказ № 691-ЦЗ від 13.12.2005. Київ, 2005. 231 с.

APPROACHES TO DETECTION OF DIESEL ENGINE FAILURES WITH LIMITED OUTPUT DATA

Falendysh A.P.	D.Sc. (Engineering), professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3602-7945 , e-mail: faphiit@gmail.com ;
Tereshchak Yi.V.	PhD (Engineering), associate professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2603-3535 , e-mail: Yurii.V.Tereshchak@lpnu.ua ;
Ivanchenko D.A.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3024-3930 , e-mail: ivanchenko_d_a@pstu.edu ;
Dzhus O.V.	head of laboratory, Lviv Research Institute of Forensic Science of the Ministry of Justice of Ukraine, Lviv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7577-4049 , e-mail: djusov22@gmail.com ;
Hrytsyshyn P.M.	leading researcher, Lviv Research Institute of Forensic Science of the Ministry of Justice of Ukraine, Lviv, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5909-947X , e-mail: p.hrytsyshyn@gmail.com

Determining the cause of inoperability and failures of rolling stock after scheduled repairs is a difficult task. This is explained by the variety of factors that cause them and the complexity of the rolling stock itself. The work is based on practical research to determine the causes of diesel locomotive engine malfunctions. The work proposes approaches to detecting diesel locomotive diesel engine malfunctions in the presence of various input data limitations. The causes of diesel engine failures are determined, which include the design features of them and rolling stock of different types, the features of malfunctions and breakdowns for specific series and models of units and assemblies. The main causes of damage to diesel locomotive engines are presented and analyzed, which can be determined with high reliability if a simple method is used in which all known signs of damage are used. These damage to diesel power plants are divided into main, confirming and clarifying. A procedure for searching for and eliminating a diesel locomotive diesel engine malfunction is proposed. The developed procedure for investigating the causes of diesel engine failures and its systems includes the stages of defining and describing the object of study, putting forward hypotheses about the causes of failures and their verification, and developing measures and recommendations for the reasons for the outage and their justification. On a specific example, the presence and importance of these signs were analyzed when investigating the causes of the failure of a diesel engine of a shunting locomotive after it underwent scheduled repairs at a third-party contractor. The analysis was performed using Ishikawa and Pareto diagrams. As the main hypothesis of the root cause of the failure of the connecting rod and piston group of a diesel engine, it was proposed to recognize a violation of the geometry of the cylinder block. The study made it possible to choose a version of the cause of the malfunction, which is then also quickly confirmed and clarified by other signs - confirming and clarifying.

Keywords: rolling stock; locomotive power plant; failure; serviceable condition; repair; operation of diesel locomotives.

References

- [1] O. Fomin, M. Gorbunov, A. Lovska, J. Gerlici and K. Kravchenko, "Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills," *Materials*, vol. 14(8). article 1915, 2021. doi: 10.3390/ma14081915.
- [2] A. Lovska, O. Fomin, P. Kučera, and V. Píštěk, "Calculation of Loads on Carrying Structures of Articulated Circular-Tube Wagons Equipped with New Draft Gear Concepts," *Applied Sciences*, vol. 10(21), article 7441, 2020. doi: 10.3390/app10217441.
- [3] O. Fomin, A. Lovska, M. Khara, I. Nikolaienko, A. Lytvynenko, and S. Sova, "Adapting the load-bearing structure of a gondola car for transporting high-temperature cargoes," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2(7(116)), pp. 6–13, 2022. doi: 10.15587/1729-4061.2022.253770.
- [4] O. Fomin, and A. Lovska, "Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2(7(110)), pp. 6–14, 2021. doi: 10.15587/1729-4061.2021.220534.
- [5] O. Fomin, M. Gorbunov, J. Gerlici, G. Vatulia, A. Lovska, and K. Kravchenko, "Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls

- Filled with Aluminium Foam,” *Materials*, vol. 14(12), article 3420, 2021. doi: **10.3390/ma14123420**.
- [6] A. Falendysh, M. Volodarets, V. Hachenko, and I. Vykhopen, “Software analysis for modeling the parameters of shunting locomotives chassis,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 116, article 03003, 2017. doi: **10.1051/mateconf/201711603003**.
- [7] G. Vatulia, A. Falendysh, Ye. Orel, and M. Pavliuchenkov, “Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages,” *Procedia Engineering*, vol. 187, pp. 301-307, 2017. doi: **10.1016/j.proeng.2017.04.379**.
- [8] J. Dižo, M. Blatnický, S. Steišūnas, and A. Falendysh, “Investigation of Ride Properties of a Rail Vehicle with Wheel Defects,” in *Proc. of the Int. Conf. «Transport Means»*, Trakai, Lithuania, Oct. 3–5, 2018, pp. 104-109.
- [9] J. Dižo, M. Blatnický, J. Harušinec, A. Falendysh, R. Melnik, and M. Kostrzewski, “Fundamentals of modelling the multibody system of a wagon with a deformable component,” in *Proc. of the Int. Conf. «Transport Means»*, Palanga, Lithuania, Oct. 02-04, 2019, pp. 738-743.
- [10] J. Dizo, M. Blatnický, J. Harušinec, and A. Falendysh, “Modification and analyses of structural properties of a goods wagon bogie frame,” *DIAGNOSTYKA*, vol. 20, № 1, pp. 41-48, 2019. doi: **10.29354/diag/99853**.
- [11] M. Blatnický, J. Dizo, and A. Falendysh, “Desing of a storage mechanism designed for a railway vehicles producer,” *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7(4.3), pp. 643-649, 2018. doi: **10.14419/ijet.v7i4.3.20723**.
- [12] 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*, vol. 24(3), pp. B259-B266, 2022. doi: **10.26552/com.C.2022.3.B259-B266**.
- [13] A. Ye. Khrulova, and Yu. V. Kochurenka, “Metodyka otsinky tekhnichnogo stanu dyzelnykh dvyhuniv lokomotyviv za parametry robochoho protsesu” [“Methodology for assessing the technical condition of diesel locomotive engines based on work process parameters”], *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Transportne mashynobuduvannia – Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Transport Engineering*, № 14(1236), pp. 52–60, 2017. (Ukr.)
- [14] J. A. Mc Geehan, and P. Ryason, “Million Mile Bearings: Lessons From Diesel Engine Bearing Failure Analysis,” *SAE Technical Paper*, vol. 108, pp. 2068-2089, 1999. doi: **10.4271/1999-01-3576**.
- [15] A. P. Falendysh, M. V. Volodarets, O. V. Kletska, D. A. Ivanchenko, and V. O. Karashchuk, *Proektuvannia, vyprovovuvannia ta ekspluatatsiia tiahovoho rukhomoho skladu zaliznyts. Chastyna 1. Udoskonalennia metodiv ta modelei vyznachennia tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv hibrydnykh manevrovnykh teplovoziv: kol. monohr.* [Design, testing and operation of railway traction rolling stock. Part 1. Improvement of methods and models for determining technical and economic indicators of hybrid shunting diesel locomotives: collective monograph], A. P. Falendysh, Ed., Lviv, Ukraine: SPOLOM, 2024. (Ukr.)
- [16] D. Aulin, O. Klymenko, A. Falendysh, O. Kletska and J. Dizo, “Improvement of diesel injector nozzle test techniques,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 985, article 012031, 2020. doi: **10.1088/1757-899X/985/1/012031**.
- [17] D. Aulin, A. A. Kagramanian, A. P. Falendysh, and O. V. Rudkovskiy, “Rozrakhunkovyi kompleks otsinky efektyvnosti vykorystannia resursozberihaiuchykh tekhnolohii ochyshchennia system dyzelia ta teplovoza” [“Estimated complex for assessing the efficiency of using resource-saving technologies for cleaning diesel and diesel locomotive systems”], *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information and control systems at railway transport*, № 6, pp. 9–15, 2017. doi: **10.18664/ikszt.v0i6.119917**. (Ukr.)
- [18] A. Sumtsov, A. Falendysh, and O. Kletska, “Thermal imaging diagnostics locomotives,” in *Proc. of the 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles MATEC Web Conferences.*, Bydgoszcz, Poland, Sept. 25-26, 2018. doi: **10.1051/mateconf/201818201004**. (Ukr.)
- [19] E. N. Sokol, *Zheleznodorozhno-transportnoe proysshestvie y ego mekhanizm (Sudebnaia ekspertyza. Elementy teoryi y praktyky). Monohrafiia* [Railway Accident and Its Mechanism (Forensic Examination. Elements of Theory and Practice). Monograph]. Lviv, Ukraine: PAIS, 2011. (Rus.)
- [20] Ya. V. Bolzhelarskyi, “Ystoryia, tendentsyy y perspektyvi sudebnikh zheleznodorozhno-transportnykh yssledovanyi v Ukraini. Krymynalistyka y sudebnaia ekspertolohiya” [“History, Trends, and Prospects of Forensic Railway Investigations in Ukraine. Forensic Science and Forensic Expertise”], in *Proc. of the Int. Sci.-Pract. Conf. «Science, education, practice»*, Palanga, Lithuania, Sept. 14-16, 2017, vol. 2, pp. 371–389. (Rus.)
- [21] M. I. Berezovyi, D. M. Kozachenko, Ya. V. Bolzhelarskyi, T. V. Bolvanovska, and A. R. Milianych, *Ekspertyza zaliznychno-transportnykh pryhod: navchalnyi posibnyk* [Railway accident examination: training manual]. 2023. doi: **10.15802/978-617-8314-48-4**. (Ukr.)
- [22] D. V. Bobyr, and Ya. V. Bolzhelarskyi, “Ustanovleniia tekhnichnogo stanu rukhomoho skladu zaliznyts u sudovii zaliznychno-transportnii ekspertyzi” [“Determining the technical condition of railway rolling stock in forensic railway transport examination”], *Teoriia ta praktyka sudovoi ekspertyzy i krymynalistyky – Theory and practice of forensics and criminalistics*, vol. 10, pp. 484-491, 2010.
- [23] *Metodyka rozrakhunku zupynochnoho shliakhu poizda u sudovii zaliznychno-transportnii ekspertyzi*

- [Methodology for calculating the stopping distance of a train in forensic railway transport expertise]. Registration code 10.0.08.2014.
- [24] Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on railway safety, May 11, 2016. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2016/798/oj>. Accessed: Oct. 11, 2025.
- [25] Analiz pershoprychyny (RCA) [Root Cause Analysis (RCA)], DSTU EN 62740:2022 (EN 62740:2015, IDT; IEC 62740:2015, IDT), State Enterprise «UkrNDNC», 2022.
- [26] Keruvannya ryzykamy. Metody otsiniuvannya ryzyku [Risk management. Risk assessment methods], DSTU EN IEC 31010:2022 (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT), State Enterprise «UkrNDNC», 2022.
- [27] “Rozrobka konstruktivnykh forsovanykh dvyhuniv nazemnykh transportnykh mashyn” [“Development of designs of forced engines of land transport vehicles”], in *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia : pidruchnyk* [Internal combustion engines: textbook], A. P. Marchenko, A. F. Shekhovtsov, Eds., Kharkiv, Ukraine: NTU «KhPI» Publ., 2004. (Ukr.)
- [28] A. E. Khrulev, and Yu. V. Kochurenko, “Metodyka opredeleniya prychyni neyspravnosti DVS pry tiazhelikh ekspluatatsyonnikh povrezhdeniyakh” [“Method for determining the cause of the ice failure for severe damages in operation”], *Dvyhately vnutrenneho shoranyia – Internal Combustion Engines*, № 1, pp. 52-60, 2017. doi: 10.20998/0419-8719.2017.1.10.
- [29] Pravyla tekhnichnoho obsluhovuvannya i potochnykh remontiv teplovoziv serii ChME3, ChME3T, ChME3E [Rules for technical maintenance and current repairs of diesel locomotives of the ChME3, ChME3T, ChME3E series], Order of the Ministry of Transport and Communications of Ukraine No. 367-Ts, June 24, 2009. (Ukr.)
- [30] Pravyla kapitalnykh remontiv KR-1, KR-2 teplovoziv serii ChME3, ChME3T, ChME3E [Rules for capital repairs KR-1, KR-2 of diesel locomotives of the ChME3, ChME3T, ChME3E series], Order of Ukrzaliznytsia No. 691-TsZ, Dec. 13, 2005. (Ukr.)

Стаття надійшла 01.03.2026

Стаття прийнята 20.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Підходи до виявлення несправності тепловозних дизелів при обмеженні вихідних даних / А. П. Фалендиш та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2026. Вип. 53, том 2. С. 209–218. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359958>.

274 АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 62.3.01

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359960

**ПРУЖНО-ДИНАМІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ
МОТОРНО-ТРАНСМІСІЙНОЇ УСТАНОВКИ АВТОМОБІЛЯ**

- Подригало М.А.** д-р техн. наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>, e-mail: pmikhab@gmail.com;
- Подригало Н.М.** д-р техн. наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2426-0336>, e-mail: pnadm74@gmail.com;
- Вахнюк С.А.** аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3584-7730>, e-mail: vakhniuk.ser@gmail.com

У роботі розглянуто вплив показників енергетичного навантаження автомобіля на пружно-динамічний коефіцієнт корисної дії (ККД) моторно-трансмісійної установки. Енергоефективність автомобіля – це показник, який визначає, наскільки ефективно автомобіль використовує енергію (паливо або електроенергію) для виконання певного завдання. Для визначення показників енергоефективності автомобіля використовують ККД, а саме пружно-динамічний ККД автомобіля, що дозволяє врахувати втрати в трансмісії, які припадають на розгін мас, що обертаються і поступово рухаються (маса автомобіля), а також врахувати втрати, пов'язані з деформацією валів при передачі крутного моменту. З метою вдосконалення методів оцінки енергоефективності автомобілів шляхом використання пружно-динамічного ККД моторно-трансмісійної установки необхідно визначити вплив енергетичних і потужнісних показників двигуна і автомобіля на пружно-динамічний цикловий ККД моторно-трансмісійної установки, а також визначити миттєвий пружно-динамічний цикловий ККД моторно-трансмісійної установки з проведенням дослідження факторів, які на нього впливають. В результаті проведеного дослідження визначено, що на цикловий пружно-динамічний ККД моторно-трансмісійної установки впливають енергетичні і потужнісні показники двигуна і автомобіля. Використання циклового пружно-динамічного ККД моторно-трансмісійної установки автомобіля буде доцільним у випадку, якщо коливання цієї установки будуть відбуватися поблизу точки резонансу. При віддаленні частоти вимушених коливань від точки резонансу величина буде незначною мірою відрізнятися від одиниці. В процесі проведення дослідження був визначений вираз для миттєвого пружно-динамічного ККД моторно-трансмісійної установки, який впливає на його величину, зміни кута повороту колінчастого валу за час. Аналіз залежності миттєвого пружно-динамічного ККД від кута повороту колінчастого валу вказав на можливість виникнення його значень більше одиниці, тобто цей показник стає коефіцієнтом динамічності, що пояснюється циркуляцією потужності в моторно-трансмісійній установці. Результати дослідження можуть бути використані для розробки політики сталого розвитку у сфері автомобільного транспорту.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання; пружно-динамічний цикловий коефіцієнт корисної дії; миттєвий пружно-динамічний коефіцієнт корисної дії; коливання; моторно-трансмісійна установка; резонанс.

Постановка проблеми

Коефіцієнт корисної дії визначає показники енергоефективності автомобіля. Пружно-динамічний коефіцієнт корисної дії (ККД) автомобіля дозволяє врахувати втрати в трансмісії, що припадають на розгін мас, які обертаються, в трансмісії і маси автомобіля, що рухається поступово. Крім того, вказаний ККД дозволяє врахувати втрати, що пов'язані з деформацією валів, які передають крутний момент.

В цій статті розглянуто вплив показників енергетичного навантаження автомобіля на пружно-динамічний ККД моторно-трансмісійної установки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Вперше поняття динамічного ККД було введено в роботі Н.М. Подригало [1], а пружного – в роботі М.А. Подригало та О.С. Полянського [2]. В першому випадку враховувались втрати на розгін інерційних пар, а в другому – втрати на накопичення потенційної енергії деформуваних елементів трансмісії. В дослідженнях М.А. Подригало та О.С. Полянського, Н.М. Подригало [2, 3] отримано аналітичний вираз для визначення пружно-динамічного циклового ККД моторно-трансмісійної установки автомобіля. Коефіцієнт врахування частин трансмісії і двигуна, що обертаються, висвітлено в роботі В.П. Волкова [4]. Рівень енергетичного навантаження автомобіля, а також його зміни, в якості показника і критерію, запропоновано в

роботі О.С. Мазіна [5]. Вибір потужності двигуна на етапі проектування визначає енергетичну ефективність автомобіля та нормування показників енергетичної ефективності транспортних засобів [6].

Аналітичний вираз для визначення пружно-динамічного циклового ККД моторно-трансмісійної установки автомобіля, якій враховує як динамічні, так і пружні втрати енергії.

$$\eta_{\text{нод}}^{\text{цикл}} = 1 - \frac{A_{Mi} \left(1 - \frac{A_{Mi}}{2M_i}\right)}{J_{np}^* \omega_e \omega_m \pi \left(\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1\right)}, \quad (1)$$

де A_{Mi} – амплітуда коливань індикаторного моменту M_i двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), які викликані його нерівномірністю,

$$A_{Mi} = 0,5 \overline{M_i} K_1; \quad (2)$$

$\overline{M_i}$ – середнє за цикл коливань значення індикаторного крутного моменту роботи ДВЗ;

π – число Піфагора ($\pi=3,1416$);

K_1 – коефіцієнт нерівномірності індикаторного крутного моменту ДВЗ [2]

$$K_1 = \frac{M_{i \max} - M_{i \min}}{M_i}; \quad (3)$$

$M_{i \max}$, $M_{i \min}$ – максимальне і мінімальне значення індикаторного крутного моменту за цикл роботи ДВЗ;

J_{np}^* – приведений до колінчастого валу ДВЗ сумарний момент інерції всіх мас, тих що обертаються і поступально рухомих мас, враховуючи власні маси двигуна і поступальну масу автомобіля;

$\overline{\omega_e}$ – середнє за цикл коливань значення кутової швидкості;

ω_m – кругова частота коливань індикаторного крутного моменту ДВЗ [2, 3],

$$\omega_m = 0,5 \overline{\omega_e} i_u; \quad (4)$$

i_u – число циліндрів ДВЗ;

k – кругова частота власних (вільних) коливань вхідного елемента трансмісії

$$k = \sqrt{\frac{C_{np}^*}{J_{np}^*}}; \quad (5)$$

C_{np}^* – жорсткість трансмісії, приведена до колінчастого валу ДВЗ.

Однак в цих дослідженнях [2, 3] не визначено вплив енергетичних та потужнісних показників двигуна і автомобіля [7, 8] на пружно-динамічний ККД моторно-трансмісійної установки. Крім того в наведених роботах не визначено миттєвий пружно-динамічний ККД моторно-трансмісійної установки автомобіля.

Мета статті

Метою дослідження є вдосконалення методів оцінки енергоефективності автомобілів шляхом використання пружно-динамічного ККД моторно-трансмісійної установки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– визначити вплив енергетичних і потужних показників двигуна і автомобіля на пружно-динамічний цикловий ККД моторно-трансмісійної установки;

– визначити миттєвий пружно-динамічний цикловий ККД моторно-трансмісійної установки та провести дослідження факторів які на нього впливають.

Виклад основного матеріалу

Враховуючи відношення (2) та (4), приведемо вираз (1) до вигляду

$$\eta_{\text{нод}}^{\text{цикл}} = 1 - \frac{A_{Mi} \left(1 - \frac{A_{Mi}}{2M_i}\right)}{\frac{J_{np}^* \omega_e^2}{2} \pi i_u \left(\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1\right)}. \quad (6)$$

Вираз $\frac{J_{np}^* \omega_e^2}{2}$ представляє собою сумарну кінетичну енергію автомобіля і частин трансмісії, що обертаються. Тому буде вірна рівність

$$\frac{J_{np}^* \omega_e^2}{2} = \frac{m_a v_a^2}{2} \delta_{\text{обер}}, \quad (7)$$

де m_a , v_a – маса і швидкість автомобіля;

$\delta_{\text{обер}}$ – коефіцієнт врахування частин трансмісії і двигуна, що обертаються [4, 9],

$$\delta_{\text{обер}} = 1 + \sigma_1 + \sigma_2 u_k^2; \quad (8)$$

u_k – передатне число коробки передач;

σ_1 , σ_2 – коефіцієнти, $\sigma_1 = 0.03 - 0.05$, $\sigma_2 = 0.04 - 0.06$ [4].

Рівняння (6), з урахуванням рівності (7) і рівняння (2), набуде вигляду

$$\eta_{\text{нод}}^{\text{цикл}} = 1 - \frac{0,5 K_1 \left(1 - \frac{K_1}{4}\right)}{\frac{m_a v_a^2}{2 M_i} \delta_{\text{обер}} \pi i_u \left(\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1\right)}, \quad (9)$$

Рівняння (9) приводимо до вигляду

$$\eta_{\text{нод}}^{\text{цикл}} = 1 - \frac{0,5 K_1 \left(1 - \frac{K_1}{4}\right)}{\frac{m_a v_a^2}{2 N_e} \eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{цикл}} \delta_{\text{обер}} \overline{\omega_e} \pi i_u \left(\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1\right)}, \quad (10)$$

де $\overline{N_e}$ – середня ефективна потужність двигуна,

$$\overline{N_e} = \overline{N_i} \eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{цикл}} = \overline{M_i} \overline{\omega_e} \eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{цикл}}; \quad (11)$$

$\eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{цикл}}$ – цикловий механічний ККД двигуна внутрішнього згоряння;

$\overline{N_i}$ – середня за цикл роботи індикаторна потужність ДВЗ.

В роботі [5] в якості показника і критерія запропоновано рівень енергетичного навантаження автомобіля:

$$Y_w = \frac{2 N_{\text{etax}}}{m_{\text{полн}} v_{\text{max}}^2}, \quad (12)$$

де $m_{\text{полн}}$ – повна маса автомобіля;

v_{max} – максимальна швидкість автомобіля;

N_{etax} – максимальна ефективна потужність автомобіля [6, 9].

Аналіз зміни параметра Y_w , проведений в роботі [5], показав його зміни в вузьких межах незалежно від класу автомобіля і року випуску [10, 11]. Цей показник змінювався в межах від 0,037 Вт/Дж до 0,052 Вт/Дж.

Рівняння (10) з урахуванням відношення (12) набуде вигляду

$$\eta_{\text{под}}^{\text{цикл}} = 1 - \frac{0,5K_1(1-\frac{K_1}{4})}{\eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{цикл}} \delta_{\text{обер}} \bar{\omega}_e \pi i_{\text{ц}}} \cdot \frac{Y_w}{\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1}. \quad (13)$$

В роботах [2, 3] показано, що від умов стійкості роботи моторно-трансмісійної установки потрібно проектувати машину таким чином, щоб при $K_1 \leq 4$ власна колова частота коливань моторно-трансмісійної установки повинна бути більше колової частоти ω_m крутного моменту M_i , тобто повинно бути $\frac{k}{\omega_m} > 1$. Це означає, що коливання моторно-трансмісійної установки повинні відбуватися у до резонансній зоні [12-14]. При $K_1 > 4$ коливання моторно-трансмісійної установки повинні відбуватися в зарезонансній зоні, тобто при $\frac{k}{\omega_m} < 1$. Розрахунки пружно-динамічного циклового ККД моторно-трансмісійної установки автомобіля, виконані для широкого діапазону зміни параметра $\frac{k}{\omega_m}$, вказали на те, що значення $\eta_{\text{под}}^{\text{цикл}}$ близькі до одиниці. Це означає, що використання вказаного ККД можливо в тих випадках, коли його величина на перевищить величини 0,90. В цьому випадку пружно-динамічний цикловий коефіцієнт втрат повинен бути більше або рівним 0,1, тобто

$$\psi_{\text{под}}^{\text{цикл}} = 1 - \eta_{\text{под}}^{\text{цикл}} = \frac{0,5K_1(1-\frac{K_1}{4})}{\eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{цикл}} \delta_{\text{обер}} \bar{\omega}_e \pi i_{\text{ц}}} \cdot \frac{Y_w}{\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1} \geq 0,1. \quad (14)$$

Останнє можливо у випадку коливань моторно-трансмісійної установки в зоні, близькій до резонансу.

Допустиму ступінь наближення коливань до резонансної зони можливо визначити з нерівності (14):

$$\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1 \leq \frac{5K_1(1-\frac{K_1}{4})Y_w}{\eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{цикл}} \delta_{\text{обер}} \bar{\omega}_m \pi i_{\text{ц}}} \quad (15)$$

або

$$\frac{k}{\omega_m} \leq \sqrt{1 + \Delta\left(\frac{k}{\omega_m}\right)^2}, \quad (16)$$

де $\Delta\left(\frac{k}{\omega_m}\right)$ – відхилення величини $\frac{k}{\omega_m}$ від точки резонансу.

Таким чином

$$\Delta\left(\frac{k}{\omega_m}\right) \leq \sqrt{\frac{5K_1(1-\frac{K_1}{4})Y_w}{\eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{цикл}} \delta_{\text{обер}} \bar{\omega}_m \pi i_{\text{ц}}}}. \quad (17)$$

Аналіз виразу (17) вказує на те, що з ростом показника енергетичного навантаження автомобіля Y_w , зменшенням циклового механічного ККД двигуна, зменшенням середньої за цикл кутової швидкості колінчастого валу, зменшенням числа циліндрів ДВЗ відбувається збільшення параметра $\Delta\left(\frac{k}{\omega_m}\right)$. При $k_i = 2$ ми маємо максимум функції $K_1(1-\frac{K_1}{4})$ (див. залежність (17)).

Таким чином, нами визначено, що використання циклового пружно-динамічного ККД моторно-трансмісійної установки автомобіля доцільно при коливаннях останніх поблизу точки резонансу. Визначена зона відхилень

$$-\Delta\left(\frac{k}{\omega_m}\right) \leq \frac{k}{\omega_m} \leq +\Delta\left(\frac{k}{\omega_m}\right), \quad (18)$$

поблизу якої величина циклового пружно-динамічного ККД знижується до 0,9.

Визначення миттєвого пружно-динамічного ККД.

В роботі [3] визначені потужність $N_{\text{пр}}$, яка витрачається на створення деформацій пружних елементів трансмісії та потужність яка реалізується $N_{\text{вх}}$ двигуном внутрішнього згоряння за один цикл коливань крутного моменту

$$N_{\text{пр}} = [M_{\text{онор}} - A_{Mi} \cos(\omega_m t)] \frac{A_{Mi} \sin(\omega_m t)}{J_{\text{мр}}^* \omega_m (\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1)}, \quad (19)$$

$$N_{\text{вх}} = [M_{\text{онор}} - A_{Mi} \cos(\omega_m t)] \left[\bar{\omega}_{\text{вх}} + \frac{A_{Mi} \sin(\omega_m t)}{J_{\text{мр}}^* \omega_m (\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1)} \right], \quad (20)$$

де $\bar{\omega}_{\text{вх}}$ – середня кутова швидкість вхідного валу трансмісії.

Миттєвий пружно-динамічний коефіцієнт втрат у моторно-трансмісійній установці автомобіля

$$\psi_{\text{под}}^{\text{мим}} = \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{вх}}} = \frac{1}{1 + \bar{\omega}_{\text{вх}} \frac{J_{\text{мр}}^* \omega_m}{A_{Mi} \sin(\omega_m t)} (\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1)} = 1 - \eta_{\text{под}}^{\text{мим}}. \quad (21)$$

В нашому випадку $\bar{\omega}_{\text{вх}} = \bar{\omega}_e$. З рівняння (21) визначаємо миттєвий пружно-динамічний ККД моторно-трансмісійної установки

$$\eta_{\text{под}}^{\text{мим}} = 1 - \frac{1}{1 + \bar{\omega}_e \frac{J_{\text{мр}}^* \omega_m}{A_{Mi} \sin(\omega_m t)} (\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1)}. \quad (22)$$

Враховуючи співвідношення (2), (4), (7), за аналогією з перетвореннями для циклового пружно-динамічного ККД, отримаємо

$$\eta_{\text{под}}^{\text{мим}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{m_a V_a^2}{2N_e} \delta_{\text{сп}} \bar{\omega}_e \frac{i_{\text{ц}} \eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{мим}}}{0,5K_1 \sin(0,5\bar{\omega}_e i_{\text{ц}} t)} (\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1)}. \quad (23)$$

Враховуючи співвідношення (12), а також

$$\phi_B = \bar{\omega}_e t, \quad (24)$$

де ϕ_B – кут повороту колінчастого валу за час t , отримуємо

$$\eta_{\text{под}}^{\text{мим}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2\delta_{\text{сп}} \bar{\omega}_e i_{\text{ц}} \eta_{\text{ДВЗ}}^{\text{мим}}}{Y_w K_1} \csc\left(\frac{\phi_B i_{\text{ц}}}{2}\right) (\frac{k^2}{\omega_m^2} - 1)}. \quad (25)$$

Аналіз залежності (25) вказує, що при зміні кута ϕ_B значення $\eta_{\text{под}}^{\text{мим}}$ можуть бути більше або менше одиниці. В роботі [3] запропоновано для подібних випадків використовувати універсальний показник – параметр динамічного навантаження P_D . При отриманні $P_D > 1$, $P_D = K_D$ (K_D – коефіцієнт динамічності [15]). При отриманні $P_D < 1$, $P_D = \eta_{\text{под}}^{\text{мим}}$.

На рисунку 1 приведені графіки залежності $P_D(\phi_B)$, побудовані для ДВЗ з числом циліндрів $i_{\text{ц}} = 4$ (крива 1) та для ДВЗ з числом циліндрів $i_{\text{ц}} = 6$ (крива 2). Криві побудовані для випадку, коли $\frac{k}{\omega_m}$ незначно відрізняється від одиниці. В іншому випадку, при збільшенні зміщення $\frac{k}{\omega_m}$ від одиниці, параметр P_D практично прирівнюється одиниці при всіх значеннях кута повороту колінчастого валу.

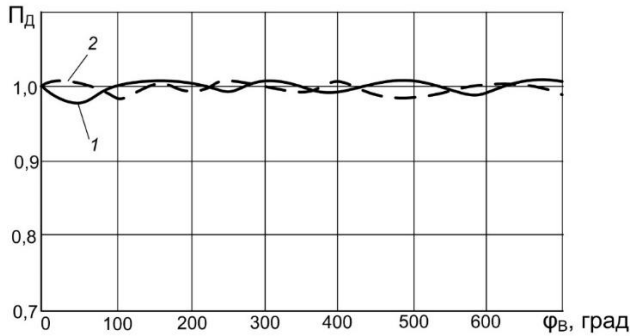


Рис. 1 – Залежність параметра динамічного навантаження Π_d від кута φ_B повороту колінчастого валу:

1 – двигун $i_u = 4$, $Y_w = 0,045 \frac{Bm}{D_{ж}}$, $\bar{\omega}_e = 420 c^{-1}$, $\frac{k}{\omega_m} = 1,001$;
 2 – двигун $i_u = 6$, $Y_w = 0,045 \frac{Bm}{D_{ж}}$, $\bar{\omega}_e = 420 c^{-1}$, $\frac{k}{\omega_m} = 0,999$

Висновки

1. В результаті проведеного дослідження визначено вплив енергетичних і потужносних показників двигуна і автомобіля на цикловий пружно-динамічний ККД моторно-трансмісійної установки.

2. Використання циклового пружно-динамічного ККД моторно-трансмісійної установки автомобіля буде доцільним у випадку, якщо коливання цієї установки будуть відбуватися поблизу точки резонансу. При віддаленні частоти вимушених коливань ω_m від точки резонансу величина $\eta_{по}^{цикл}$ буде незначною мірою відрізнятися від одиниці.

3. Визначено вираз для миттєвого пружно-динамічного ККД моторно-трансмісійної установки (25) і вплив на його величину різних факторів.

4. Аналіз залежності миттєвого пружно-динамічного ККД від кута повороту колінчастого валу вказав на можливість виникнення його значень більше одиниці, тобто цей показник стає коефіцієнтом динамічності, що пояснюється циркуляцією потужності в моторно-трансмісійній установці.

Перелік використаних джерел

- [1] Подригало Н. М. Обґрунтування та вибір структури і основних параметрів трансмісії модульних землерийно-транспортних та навантажувальних машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04. Харків, 2001. 20 с.
- [2] Динаміка машин з пружними ланками. На прикладі автомобілів і тракторів. Монографія / за ред. М. А. Подригало, О. С. Полянського. Харків: Естет Прінт, 2024. 272 с.
- [3] Подригало Н. М. Концепція забезпечення ефективності та контролю функціональної стабільності

моторно-трансмісійних установок транспортно-тягових засобів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.20. Харків, 2016. 36 с.

- [4] Волков В. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля. Навчальний посібник. Харків : ХНАДУ, 2003. 292 с.
- [5] Мазін О. С. Підвищення енергоефективності автомобілів при маневруванні зниженням непродуктивних втрат енергії: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Харків, 2020. 20 с.
- [6] Бажинов О. В., Кравченко О. П. Надійність автомобільних поїздів: монографія. Луганськ: Видавництво «Нолідж», 2009. 412 с.
- [7] Анісімов В. Ф., Дмитрієва А. В., Севостьянов С. М. Тепловий та динамічний розрахунок автомобільних двигунів. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 130 с.
- [8] Böge G., Böge W. Physik. *Handbuch Maschinenbau*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. Pp. 97-144. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-12529-5_7.
- [9] Сирота В. І., Сахно В. П. Автомобілі. Основи конструкції, теорія: Навчальний посібник. К.: Арістей, 2007. 288 с.
- [10] Автомобілі. Теорія експлуатаційних властивостей : навчальний посібник / Біліченко В. В., Добровольський О. Л., Огневий В. О., Смирнов С. В. Вінниця : ВНТУ, 2015. 163 с.
- [11] Буренніков Ю. А., Кашканов А. А., Ребедаєло В. М. Автомобілі: робочі процеси та основи розрахунку : навчальний посібник МОНМС України. Вінниця : ВНТУ, 2013. 283 с.
- [12] Liu C., Orzechowski I. Axle imbalance measurement and balancing strategies. *SAE Technical Paper*. 2007. Article 2007-01-2238. DOI: <https://doi.org/10.4271/2007-01-2238>.
- [13] Progress and Recent Trends in the Torsional Vibration of Internal Combustion Engine / Liang X., Shu G., Wang B., Yang K. *Advances in Vibration Analysis Research*. 2011. DOI: <https://doi.org/10.5772/16222>.
- [14] Mathematical modeling of torsional vibrations of the wheel-motor unit of mains diesel locomotive UZTE16M / S. Mamaev et al. *Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering: Proceedings of the V International Scientific Conference*, Tashkent, Uzbekistan, 26-28 April 2023. Vol. 401. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340105014>.
- [15] Подригало Н. М. Параметри динамического нагружения трансмиссий тягово-транспортных машин. *Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво*. 2013. № 1(36), т. 1. С. 102-107.

ELASTIC-DYNAMIC EFFICIENCY OF A VEHICLE'S ENGINE-TRANSMISSION SYSTEM

- Podrygalo M.** D.Sc. (Engineering), professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>, e-mail: pmikhab@gmail.com;
- Podrygalo N.** D.Sc. (Engineering), associate professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2426-0336>, e-mail: pnadm74@gmail.com;
- Vakhniuk S.** postgraduate student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3584-7730>, e-mail: vakhniuk.ser@gmail.com

This paper examines the influence of a vehicle's energy load parameters on the elastic-dynamic efficiency of the engine-transmission system. A vehicle's energy efficiency is a measure of how effectively the vehicle uses energy (fuel or electricity) to perform a specific task. To determine a vehicle's energy efficiency indicators, efficiency is used, specifically the vehicle's elastic-dynamic efficiency, which allows for accounting for transmission losses attributable to the acceleration of rotating and gradually moving masses (the vehicle's mass), as well as losses associated with shaft deformation during torque transmission. To improve methods for assessing vehicle energy efficiency through the use of the elastic-dynamic efficiency of the engine-transmission system, it is necessary to determine the influence of the engine's and vehicle's energy and power parameters on the elastic-dynamic cycle efficiency of the engine-transmission system, as well as to determine the instantaneous elastic-dynamic cycle efficiency of the engine-transmission unit by investigating the factors that influence it. As a result of the study, it was determined that the cycle elastic-dynamic efficiency of the engine-transmission unit is influenced by the energy and power characteristics of the engine and the vehicle. It is appropriate to use the cyclic elastic-dynamic efficiency of a vehicle's engine-transmission assembly if the vibrations of this assembly occur near the resonance point. When the frequency of forced vibrations is far from the resonance point, the value will differ only slightly from one. During the study, an expression was derived for the instantaneous elastic-dynamic efficiency of the engine-transmission unit, which is influenced by changes in the crankshaft angle over time. An analysis of the dependence of the instantaneous elastic-dynamic efficiency on the crankshaft rotation angle indicated the possibility of values exceeding one; that is, this indicator becomes a dynamism coefficient, which is explained by power circulation within the engine-transmission unit. The results of the study can be used to develop sustainable development policies in the field of automotive transport.

Keywords: internal combustion engine; elastic-dynamic cycle efficiency; instantaneous elastic-dynamic efficiency; vibrations; engine-transmission assembly; resonance.

References

- [1] N. M. Podrygalo, "Obgruntuvannia ta vybir struktury i osnovnykh parametriv transmisii modulnykh zemleryno-transportnykh ta navantazhuvalnykh mashyn" ["Justification and selection of the structure and main parameters of the transmission of modular earthmoving and loading machines"], Ph.D. thesis, Kharkiv, Ukraine, 2001. (Ukr.)
- [2] *Obgruntuvannia ta vybir struktury i osnovnykh parametriv transmisii modulnykh zemleryno-transportnykh ta navantazhuvalnykh mashyn* [Dynamics of machines with elastic links. On the example of cars and tractors. Monograph], M. A. Podrygalo, O. S. Polianskyi, Eds., Kharkiv, Ukraine: Estet Print Publ., 2024. (Ukr.)
- [3] N. M. Podrygalo, "Kontseptsii zabezpechennia efektyvnosti ta kontroliu funktsionalnoi stabilnosti motoro-transmisiinykh ustanovok transportno-tiahovykh zasobiv" ["The concept of ensuring the efficiency and control of the functional stability of motor-transmission installations of transport and traction vehicles"], D.Sc. thesis, Kharkiv, Ukraine, 2016. (Ukr.)
- [4] V. P. Volkov, *Teoriia ekspluatatsiinykh vlastyvostei avtomobilia. Navchalnyi posibnyk* [Theory of vehicle performance. Textbook]. Kharkiv, Ukraine: KhNADU Publ., 2003. (Ukr.)
- [5] O. S. Mazin, "Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti avtomobiliv pry manevruvanni znyzhenniam neproduktivnykh vtrat enerhii" ["Increasing the energy efficiency of vehicles during maneuvering by reducing unproductive energy losses"], Ph.D. thesis, Kharkiv, Ukraine, 2020. (Ukr.)
- [6] O. V. Bazhynov, and O. P. Kravchenko, *Nadiinist avtomobilnykh poizdiv: monohrafiia* [Reliability of road trains: monograph]. Luhansk, Ukraine: Knowledge Publ., 2009. (Ukr.)
- [7] V. F. Anisimov, A. V. Dmytriieva, and S. M. Sevostianov, *Teplovyi ta dynamichniy rozrakhunok avtomobilnykh dvyhuniv. Navchalnyi posibnyk* [Thermal and dynamic calculation of automobile engines. Textbook]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2009. (Ukr.)
- [8] G. Böge, and W. Böge, "Physik", in *Handbuch Maschinenbau*, Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg Publ., 2017, pp. 97-144. doi: 10.1007/978-3-658-12529-5_7.

- [9] V.I. Syrota, and V.P. Sakhno, *Avtomobili. Osnovy konstrukttsii, teoriia: Navchalnyi posibnyk* [Automobiles. Fundamentals of design, theory: Textbook]. Kyiv, Ukraine: Aristei Publ., 2007. (Ukr.)
- [10] V. V. Bilichenko, O. L. Dobrovolskyi, V. O. Ohnevyi, and Ye. V. Smyrnov, *Avtomobili. Teoriia ekspluatatsiinykh vlastyvostei : navchalnyi posibnyk* [Cars. Theory of operational properties: a textbook]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2015. (Ukr.)
- [11] Yu. A. Buriennikov, A. A. Kashkanov, and V. M. Rebedailo, *Avtomobili: robochi protsesy ta osnovy rozrakhunku : navchalnyi posibnyk MONMS Ukrainy* [Automobiles: Workflows and Calculation Basics: Textbook of the Ministry of Education, Science and Technology of Ukraine]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2013. (Ukr.)
- [12] C. Liu, and I. Orzechowski, "Axle imbalance measurement and balancing strategies," *SAE Technical Paper*, article 2007-01-2238, 2007. doi: 10.4271/2007-01-2238.
- [13] X. Liang, G. Shu, B. Wang, and K. Yang, "Progress and Recent Trends in the Torsional Vibration of Internal Combustion Engine," *Advances in Vibration Analysis Research*, 2011. doi: 10.5772/16222.
- [14] S. Mamaev, A. Anna, S. Tursunov, D. Nigmatova, and T. Tursunov, "Mathematical modeling of torsional vibrations of the wheel-motor unit of mains diesel locomotive UZTE16M", in *Proc. of the V Int. Sci. Conf. «Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering»*, Tashkent, Uzbekistan, April 26-28, 2023, vol. 401. doi: 10.1051/e3sconf/202340105014.
- [15] N. M. Podrygalo, "Parametri dynamycheskoho nahruzhennia transmyssyi tiahovo-transportnykh mashyn" ["Dynamic Loading Parameters for Traction and Transport Machine Transmissions"], *Zbirnyk naukovykh prats. Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo – Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, № 1(36), vol. 1, pp. 102-107, 2013. (Rus.)
- Стаття надійшла 08.01.2026
Стаття прийнята 30.01.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Подригало М. А., Подригало Н. М., Вахнюк С. А. Пружно-динамічний коефіцієнт корисної дії моторно-трансмісійної установки автомобіля. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 2. С. 219–224. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359960>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАСАЖИРОПОТОКІВ МІСЬКОГО ТРАНСПОРТУ
НА ПРИКЛАДІ М. ЧЕРКАСИ

Тарандушка Л.А.	д-р техн. наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1410-9088 , e-mail: tarandushkal@ukr.net ;
Шльончак І.А.	канд. техн. наук, доцент, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5096-2414 , e-mail: Igor_Shlionchak@ukr.net ;
Мурований І.С.	канд. техн. наук, доцент, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9749-980X , e-mail: Igor_lntu@ukr.net

В роботі розглянута методика визначення пасажирських і транспортних формувань кореспонденцій на підставі аналізу транзакцій безготівкової оплати проїзду в міському транспорті. Запропоновано алгоритм встановлення поїздок пасажирів та відповідних пасажирських кореспонденцій. Алгоритм було сформовано з урахуванням множини квитків (магнітних карт) безготівкового розрахунку пасажирів. Розглянутий алгоритм визначення поїздок пасажирів (транспортних кореспонденцій), а також пасажирських кореспонденцій, що можуть включати кілька поїздок, реалізовано у вигляді комп'ютерної програми, розробленої із застосуванням відповідного програмного забезпечення Microsoft Access. Використання стандартних програмних компонентів забезпечує можливість інтеграції та використання більшості сучасних баз даних без необхідності суттєвого доопрацювання. У результаті застосування алгоритму визначення кореспонденцій формується множина кореспонденцій, яка використовується як основа для апроксимації параметрів генеральної сукупності кореспонденцій. Для оцінювання генеральної сукупності пасажирських кореспонденцій доцільно застосувати відповідні параметри лінійної апроксимації. Доведено, що питома вага безготівкових розрахунків в міському транспорті відповідає нормальному закону розподілу. В дослідженнях використовувались теоретичні методи наукових досліджень, методи математичного моделювання та метод обчислювального експерименту. В результаті проведених досліджень було виявлено, що виявлення закономірностей мобільності населення є одним із ключових завдань при розв'язанні широкого спектра транспортних і містобудівних проблем.

Ключові слова: міський транспорт загального користування; методика оцінки пасажиропотоків; кореспонденція населення; безготівкова оплата проїзду; транзакція.

Постановка проблеми

Ефективне управління міським пасажирським транспортом загального користування є ключовою передумовою його конкурентоспроможності на тлі інтенсивного збільшення кількості приватних транспортних засобів. Забезпечення таких конкурентних властивостей досягається шляхом підвищення ефективності оперативного управління перевезеннями та вдосконалення транспортного планування [1, 2].

Ключовим є отримання даних про рух пасажирів у реальному часі. Дані про пасажиропотоки можуть бути отримані шляхом аналізу транзакцій безготівкової оплати проїзду. У цій області відсутня систематизована база знань щодо обробки даних і точності моніторингу [3, 4].

Необхідно зазначити, що обробку даних, що поступають від джерела зберігання інформації про транзакції, можна виконувати з розрахунку міжрайонної матриці кореспонденцій. В зв'язку з цим постає завдання дослідити пасажиропотоки міського транспорту загального користування в м. Черкаси з урахуванням даних безготівкової оплати проїзду.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідженням пасажирських потоків великих міст в транспорті загального користування з

урахуванням безготівкового розрахунку займаються ряд закордонних та вітчизняних науковців.

Так, дослідження [1] присвячене моделюванню безконтактних транзакцій у міському транспорті та визначенню структури даних, що генеруються під час оплати проїзду. Показано потенціал використання цих даних для аналізу пасажиропотоків.

Автор наукової роботи [3] розглянув розвиток цифрових платіжних технологій у транспорті та їх роль у зборі даних про поїздки. Підкреслено значення таких даних для управління транспортними системами.

Автори [4] пропонують новий метод оплати проїзду на основі NFC та QR-кодів. Описано технічну архітектуру системи та можливості збору даних про пасажирів.

Автори статей [5-7] аналізують фактори вибору пасажирями способу оплати проїзду. Зазначається висновок про те, що механізми та ключові фактори, що впливають на вибір пасажирів щодо оплати квитків за допомогою нових каналів електронної оплати недостатньо вивчені. У роботах застосовано методи машинного навчання для аналізу впровадження цифрових платежів у транспорті. Доведено, що володіння проїзною карткою, рід діяльності, місце проживання, мета подорожі, рівень освіти та стать є важливим та

впливовими факторами, які можуть ефективно впливати на уподобання пасажирів щодо способу оплати проїзду.

Зацікавленість з наукової точки зору представляє стаття [8]. Дослідження описує методи визначення пасажиропотоку за допомогою Bluetooth і смартфонів. Дані мобільних пристроїв використовуються для аналізу посадки та висадки пасажирів.

Роботи [9, 10] є дослідженням пасажиропотоків як способу вивчення поведінки користувачів через мережу загального користування з метою розробки нових об'єктів та послуг. При цьому зазначається ефективне використання технології Bluetooth та смартфонів. Автори досліджують мобільність пасажирів за допомогою ідентифікації та автентифікації рахунків користувачів. В роботах представлено модель прогнозування пасажиропотоків із використанням нейронних мереж. Враховуються часові та просторові залежності в даних.

Автори [11-13] представляють дослідження бібліометричного аналізу досліджень у сфері моделювання пасажиропотоків. Визначено основні тенденції та джерела даних у сучасних дослідженнях. В роботах проаналізовано впровадження безконтактних платіжних технологій у транспорті. Розглядається їх вплив на поведінку пасажирів і управління транспортними системами.

Мета статті

В роботі висунуто гіпотезу, що формування об'єктивної моделі пасажирських кореспонденцій є можливим завдяки обробці інформації, отриманої в результаті безготівкових розрахунків за проїзд.

Відповідно, метою дослідження є розробка підходу до моніторингу пасажирських кореспонденцій у місті Черкаси, який базується на обробці інформації, отриманої з транзакцій безготівкової оплати проїзду в громадському транспорті.

Об'єктом дослідження є сукупність переміщень населення в межах міста Черкаси.

Виклад основного матеріалу

Дослідження закономірностей пересування населення відіграє ключову роль у вирішенні різноманітних завдань у сфері транспорту та містобудування, зокрема пов'язаних із розвитком вулично-дорожньої мережі, а також розробкою й оптимізацією маршрутів пасажирського транспорту [5].

Значна трудомісткість більшості методів натурального обстеження рухливості населення звужує можливість їх практичного використання, що зумовлює доцільність застосування розрахункових методів для оцінювання коливань рухливості на основі вибірових інструментальних спостережень. Внаслідок цього існуючі моделі не відзначаються достатнім рівнем адекватності, що зумовлює ризик прийняття неефективних управлінських рішень у сфері розвитку транспортної системи. Розрахункові методи визначення рухливості

населення не забезпечують необхідної точності для розв'язання багатьох транспортних задач, у зв'язку з чим їх застосовують у поєднанні з натурними методами для побудови моделі нормування вибіркової сукупності кореспонденцій з подальшою оцінкою генеральної сукупності [14].

Об'єктивна оцінка рухливості населення можлива за умови проведення інструментального моніторингу протягом достатньо тривалого періоду. Водночас у процесі моделювання пасажирських кореспонденцій необхідно враховувати взаємний вплив параметрів функціонування транспортної системи та характеристик рухливості населення. Про це, наприклад, свідчить відомий ефект, названий «порочним кругом транспортної мобільності», відповідно до якого недостатній рівень розвитку громадського транспорту призводить до зниження рухливості населення, яке зменшує рівень застосування пасажирського транспорту.

Таким чином, обґрунтовується необхідність здійснення безперервного інструментального вимірювання пасажирських кореспонденцій населення з метою ефективного вирішення актуальних завдань у сфері транспорту. Запропонований підхід забезпечує розв'язання низки актуальних завдань, серед яких – підвищення адекватності моделей розрахунку рухливості населення на основі аналізу узгодженості результатів із різних джерел, а також забезпечення об'єктивної оцінки динаміки параметрів функціонування транспортної системи [7].

На сучасному етапі частка безготівкових розрахунків у міському пасажирському транспорті досягає приблизно 50%, що дає підстави вважати вибірку, сформовану на основі транзакцій, репрезентативною для оцінювання генеральної сукупності пасажирських кореспонденцій. Діючі тарифні умови обумовлюють формування певного набору параметрів у транзакціях безготівкової оплати проїзду в міському пасажирському транспорті, зокрема:

- унікальний ідентифікатор проїзного квитка (магнітної картки);
- дата та час здійснення операції оплати;
- зупинний пункт, на якому виконано посадку;
- номер маршруту та напрямку руху транспортного засобу;
- модель транспортного засобу.

На сучасному етапі в міському пасажирському транспорті використовуються два основні підходи до оплати проїзду (включаючи безготівкову форму): а) оплата під час посадки в транспортний засіб; б) оплата під час висадки з транспортного засобу.

Інший варіант сплати за поїздки практикується в автобусах невисокої місткості. У місті Черкаси це автобуси марки «Ataman». Таким чином, транзакцію можна виразити наступним чином:

$$r = (k, t, g, i, m), \quad (1)$$

де k – визначник транзакції;

t – момент дії;
 g – маршрут;
 i – місце зупинки;
 m – марка транспорту.

Пасажирська кореспонденція може бути реалізована як однією, так і кількома поїздками, сукупність яких позначимо $T(b, e)$. Далі розглядається алгоритм визначення транспортних і пасажирських кореспонденцій, що формується на основі аналізу множини транзакцій безготівкової оплати конкретного пасажирів. Основною алгоритму є впорядкування транзакцій у часі для n -го проїзного квитка [15].

Параметри однієї транзакції дають можливість ідентифікувати лише один із пунктів поїздки – початковий або кінцевий залежно від моменту оплати. У випадку оплати під час посадки визначається початковий пункт, а під час висадки – кінцевий. Визначення іншого пункту здійснюється на основі суміжної транзакції: наступної (для оплати на початку) або попередньої (для оплати в кінці поїздки). При цьому необхідно оцінити, чи є такі транзакції взаємопов'язаними, тобто чи формують вони послідовність [16].

Логічно припустити, що транзакції, які є послідовними, повинні задовольняти певну умову:

а) у випадку оплати на початку поїздки розглядається підмножина зупинок маршруту поточної транзакції, що слідують після пункту оплати. Серед них має бути зупинка, розташована в межах пішохідної доступності від пункту оплати наступної транзакції, за умови, що в цій транзакції оплата також виконана на початку поїздки:

$$l(ij, b_{j+1}) = \min l(Ij, b_{j+1}), \quad (2)$$

де ij – з множини зупинок маршруту поточної транзакції, що слідують після пункту оплати, обирається та, яка розташована на найменшій відстані від пункту оплати наступної транзакції b_{j+1} ;

Ij – підмножина зупинок маршруту поточної транзакції, що йдуть за місцем оплати їздки;

б) у випадку оплати в кінці поїздки розглядається підмножина зупинок маршруту поточної транзакції, що передують пункту оплати. Серед них має бути зупинка, розташована в межах пішохідної доступності від пункту оплати попередньої транзакції, за умови, що в ній оплата також здійснена наприкінці поїздки:

$$l(ij, b_{j-1}) = \min l(Ij, b_{j-1}), \quad (3)$$

де ij – із множини зупинок маршруту поточної транзакції, що передують пункту оплати поїздки, обирається та, яка має мінімальну відстань до пункту оплати наступної транзакції b_{j-1} ;

Ij – розглядається підмножина зупинок маршруту поточної транзакції, що передують пункту оплати поїздки. Відповідно, умову пов'язаності транзакцій доцільно подати в такому вигляді:

$$a) l(ij, b_{j+1}) < L_{\text{піш}}$$

$$б) l(ij, b_{j-1}) < L_{\text{піш}}$$

де $L_{\text{піш}}$ – відстань пішохідної доступності зупинок, м.

Розрахунок відстаней між зупинками здійснюватиметься на основі їхніх глобальних координат. Підмножина зупинок маршруту поточної транзакції з відстанню до зупинки наступної або попередньої транзакції можна розрахувати за допомогою SQL запиту будь-якої реляційної системи управління базами даних.

Як було відзначено вище, пасажирська кореспонденція може включати одну або декілька поїздок, утворюючи впорядковану множину. При цьому дві послідовні поїздки, що входять до цієї множини, мають відповідати певним вимогам:

а) зупинка, що знаходиться на закінченні попередньої поїздки повинна знаходитися в зоні пішохідної доступності від зупинки початку наступної поїздки:

$$l(e_{j-1}, b_j) < L_{\text{піш}}; \quad (4)$$

б) проміжок часу між завершенням попередньої поїздки та початком наступної має бути меншим або рівним встановленому інтервалу пересадки:

$$\tau(e_{j-1}, b_j) < \tau_{\text{пер}}. \quad (5)$$

На підставі вищевикладеного можна сформулювати наступний алгоритм рішення задачі. Є множина квитків (магнітних карт) безготівкового розрахунку пасажирів, впорядкована будь-яким чином.

Крок 1. З усіх квитків послідовно обирається черговий квиток, причому на початку розрахунку використовується перший.

Крок 2. Вибирається поточна j -а транзакція даного проїзного квитка.

Крок 3. Визначення поїздки пасажирів.

Крок 4. Визначення пасажирської кореспонденції.

Розглянутий алгоритм визначення транспортних і пасажирських кореспонденцій, які можуть складатися з однієї або кількох поїздок, було реалізовано у вигляді програмного забезпечення, розробленого мовою Delphi із застосуванням реляційної системи управління базами даних Microsoft Access. Варто зазначити, що стандартні компоненти програми дозволяють без значних змін використовувати різні сучасні СУБД, такі як Oracle Database, Microsoft SQL Server, InterBase, IBM Db2 тощо.

Зниження частки розпізнаних транзакцій наприкінці звітного періоду обумовлене «крайовим ефектом»: через наявність пасажирів, які здійснюють поїздки з інтервалом у кілька днів, частина транзакцій не знаходить свого завершення в межах одного календарного місяця. Для коректної інтерпретації таких даних необхідно залучати інформацію про поїздки на початку

наступного місяця, тому розрахунок середніх показників питомої ваги розпізнаних оплат та коефіцієнта пересадочності було обмежено першими 25 днями. Аналіз добового розподілу безготівкових оплат (рис. 1) свідчить про високу стабільність процесу: середня кількість поїздок у будні становить 234,2 тис. при незначних коливаннях у межах від 223,9 до 243,2 тис. Така рівномірність динаміки, що загалом корелює із загальними показниками пасажиропотоку, підтверджує репрезентативність вибірки безготівкових розрахунків для адекватної оцінки генеральної сукупності поїздок у межах транспортної мережі.

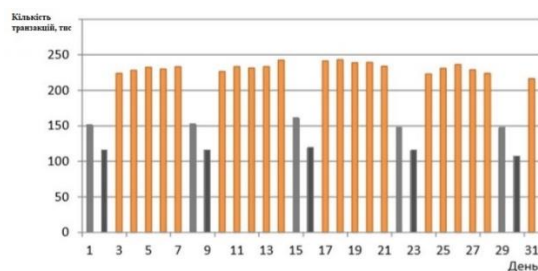


Рис. 1 – Динаміка добової кількості транзакцій безготівкової оплати протягом місяця

На рис. 2 наведено динаміку пасажиропотоку в розрізі годинної активності протягом доби, яка була визначена на основі проведених безготівкових транзакцій за січень 2025 року і за результатами суцільного обстеження пасажирських перевезень, яке було виконане в січні 2024 року.

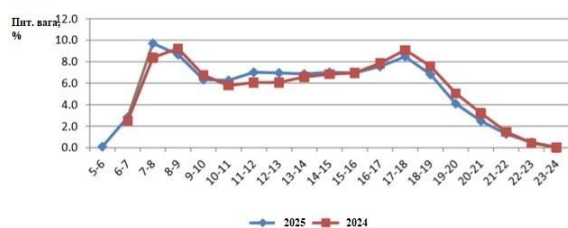


Рис. 2 – Динаміка пасажиропотоку в розрізі годинної активності протягом доби

Аналіз графічних даних свідчить про високу кореляцію між часовим розподілом безготівкових оплат та реальною структурою пасажирських перевезень протягом доби.

Графічна інтерпретація розподілу пасажирських перевезень упродовж доби (рис. 2) базується на поєднанні статистики безготівкових оплат та даних загального моніторингу пасажирських потоків. З графіку можна зробити висновок, що характер розподілу пасажирських потоків за годинами доби, отриманий з транзакцій безготівкового розрахунку, відповідає генеральній сукупності пасажирських кореспонденцій.

На основі множини кореспонденцій H_0 , отриманої в результаті роботи запропонованого алгоритму,

проводиться статистичне оцінювання параметрів генеральної сукупності H . Оцінювання характеристик загального пасажиропотоку здійснюватиметься із застосуванням таких параметрів лінійної апроксимації:

коефіцієнт безготівкового розрахунку:

$$\alpha_T = \frac{R}{N_T}, \quad (5)$$

де R – кількість транзакцій безготівкового розрахунку;

N_T – кількість транспортних кореспонденцій.

Коефіцієнт пересадок:

$$\alpha_P = \frac{N_T}{N_P}, \quad (6)$$

де N_P – кількість пасажирських кореспонденцій.

Коефіцієнт розпізнаних транзакцій :

$$\alpha_R = \frac{N_T}{R}, \quad (7)$$

де N_T – кількість розпізнаних безготівкових транзакцій, що характеризує обсяг виявлених транспортних кореспонденцій. Для розрахунку коефіцієнта безготівкової оплати α_T використовуються дані, отримані в ході автоматизованого моніторингу пасажирських потоків.

На основі проведеного обстеження добовий обсяг перевезень пасажирів на i -му маршруті визначався за такою залежністю:

$$Q_i = \frac{\sum_j Q_{ij} \cdot Z_i}{Z_i^0}, \quad (8)$$

де Q_{ij} – число пасажирів, що скористалися i -м маршрутом на j -у рейсі обстеження;

Z_i^0 – число виконаних обстежених рейсів за i -м маршрутом;

Z_i – загальна кількість рейсів, виконана за i -м маршрутом.

Вибіркова множина оцінок коефіцієнта безготівкової оплати α_T формувалася як:

$$\alpha_T = \frac{R_i}{Q_i}, \quad (9)$$

де R_i – фактична чисельність безготівкових розрахунків, зафіксована на i -му маршруті в день моніторингу пасажиропотоків.

Цілковито обґрунтованим є твердження, що показник α_T не є константою. У довгостроковій перспективі прогнозується поступове зростання частки безготівкових транзакцій у загальній структурі оплат. Для ідентифікації параметра α_T , окрім вибірових натурних обстежень, доцільно використовувати звітну документацію перевізників щодо пасажиромісткості та фактичного завантаження маршрутів. Таким чином,

базуючись на отриманих коефіцієнтах лінійної апроксимації, запропоновано модель розрахунку параметрів генеральної сукупності пасажирських кореспонденцій. Реалізація розробленого алгоритму дозволяє сформувати вибірку множини поїздок T_0 та пасажирських кореспонденцій H_0 , які репрезентують відповідні генеральні сукупності T та H . При цьому під пасажирською кореспонденцією розуміємо:

$$h_i = [t_1, \dots]. \quad (10)$$

Під час опрацювання масиву транзакцій певна частка транспортних і пасажирських кореспонденцій залишається неідентифікованою. Цей чинник враховується в розрахунках за допомогою коефіцієнта розпізнавання транзакцій α_p .

Розв'язання транспортних задач потребує ідентифікації таких параметрів генеральної сукупності пасажирських кореспонденцій, як обсяги кореспонденцій між вузлами мережі (зупинками або транспортними районами), диференційовані за часовими інтервалами (матриці кореспонденцій), а також потужність потоків, пасажирообіг, кількість перевезених пасажирів і обсяг транспортної роботи. Розрахунок цих показників базується на репрезентативній вибірці з масиву ідентифікованих транспортних або пасажирських зв'язків. Відтак, ключовим завданням є визначення потужності генеральної сукупності на основі наявної вибірки, що реалізується із застосуванням встановлених коефіцієнтів лінійної апроксимації

Формування вибірки для оцінювання параметрів генеральної сукупності пасажирських кореспонденцій здійснюється за допомогою відповідної характеристичної функції. Зокрема, вибірка сукупності для визначення обсягу перевезень у часовому інтервалі τ визначається умовою $tbi \subset \tau$, що означає належність моменту початку i -ї транспортної кореспонденції до вказаного інтервалу. За таких умов розрахунок кількості перевезених пасажирів за період τ виконується за наступною залежністю:

$$Q_\tau = \frac{|Q_\tau^0|}{\alpha_T \alpha_P}, \quad (11)$$

де $|Q_\tau^0|$ – потужність вибірки транспортних кореспонденцій, ідентифікованих за даними безготівкових транзакцій;

α_P – коефіцієнт розпізнаних транзакцій;

α_T – коефіцієнт безготівкового розрахунку.

Варто підкреслити, що функціональні можливості мови SQL у сучасних реляційних СУБД дозволяють ефективно реалізувати характеристичні функції для формування необхідних підмножин даних. Це значно спрощує процес розрахунку параметрів генеральної сукупності пасажирських кореспонденцій через гнучке налаштування умов вибірки. Як приклад, розглянемо процедуру побудови матриці пасажирських сполучень між вузлами транспортної мережі.

Число пасажирських кореспонденцій між вузлами i та j в проміжку часу τ можна розрахувати:

$$|H_{ij\tau}| = \frac{|H_{ij\tau}^0|}{\alpha_T \alpha_P}, \quad (12)$$

де $|H_{ij\tau}^0|$ – сукупність розпізнаних кореспонденцій між транспортними районами i та j , що зафіксовані в системі безготівкового розрахунку протягом часу τ .

Інформаційною базою для статистичного аналізу слугувала сукупність коефіцієнтів безготівкової оплати проїзду, визначених шляхом автоматизованого обстеження пасажиропотоків. У межах дослідження було сформовано масив даних щодо питомої ваги електронних розрахунків у системі міського громадського транспорту. Сукупність отриманих значень питомої ваги – це значення спостережень x_i (коефіцієнти безготівкового розрахунку за проїзд), де $0,24 \ll x_i \ll 0,45$, а об'єм вибірки складає $n = 122$.

Візуалізація результатів серії вимірювань за допомогою гістограми (рис. 3) дозволяє наочно продемонструвати частотний розподіл отриманих значень досліджуваної величини.

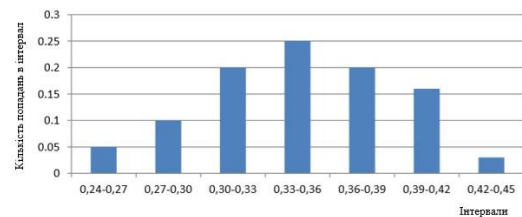


Рис. 3 – Графік експериментальної функції щільності ймовірності

Алгоритм побудови гістограми передбачає поділ усього діапазону значень на рівні інтервали та підрахунок частоти потрапляння вимірюваної величини в кожен із них. На кожному відрізку будується прямокутник, основа якого відповідає ширині інтервалу, а висота – кількості спостережень у ньому. Аналіз конфігурації отриманої гістограми дозволяє зробити висновок про характер розподілу випадкової величини X . Фактично, гістограма є графічним представленням експериментальної функції щільності ймовірності, що за своєю формою наближається до теоретичної кривої нормального розподілу

Графічну інтерпретацію отриманої функції наведено на рис. 4.

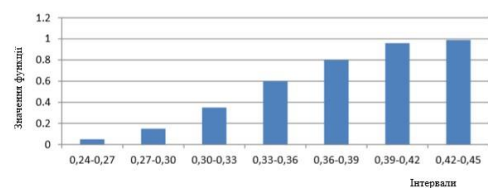


Рис. 4 – Графік емпіричної функції розподілу

Далі необхідно розрахувати параметри вибірки – математичне очікування, дисперсію, середнє квадратичне відхилення. Як репрезентативне значення x_i для кожного з інтервалів обрано його серединну точку (табл. 1). Такий підхід дозволяє перейти від інтервального ряду до дискретного для подальших статистичних розрахунків.

Таблиця 1

Результати розрахунків параметрів вибірки

№	Інтервал	x_i^*	n_i	$x_i n_i$	$(\bar{x} - x_i)^2 n_i$
1	0,24-0,27	0,255	6	1,53	0,05
2	0,27-0,30	0,285	12	3,42	0,05
3	0,30-0,33	0,315	24	7,56	0,03
4	0,33-0,36	0,345	31	10,70	0,00
5	0,36-0,39	0,375	25	9,38	0,02
6	0,39-0,42	0,405	20	8,10	0,06
7	0,42-0,45	0,435	4	1,74	0,03
	Сума		122	42,42	0,24

Спостережуване значення статистики $\chi^2_{\text{спост}} = 9,1$. Знайдемо критичне значення статистики. Число ступенів свободи $l = 7 - 2 - 1 = 4$. По таблиці розподілів χ^2 при рівні значущості $\alpha = 0,05$ отримаємо: $\chi^2_{\text{кр}}(4; 0,05) = 14,9$. Висновок. Оскільки отримане спостережуване значення статистичного критерію менше критичного значення, $\chi^2_{\text{спост}} = 9,1 < \chi^2_{\text{кр}} = 14,9$, то нульова гіпотеза про нормальний розподіл з параметрами $\mu = 0,35$ і $\sigma = 0,002$ приймається при рівні значущості $\alpha = 0,05$. В результаті проведених теоретичних досліджень можливо побудувати графік теоретичної функції розподілу (рис. 5).

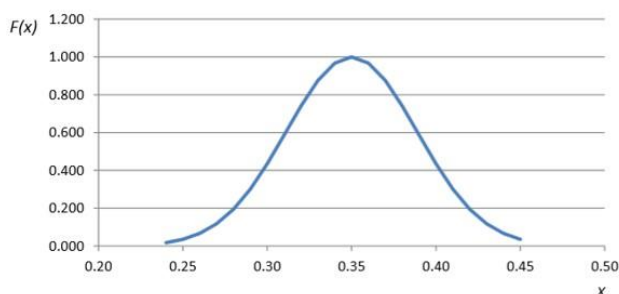


Рис. 5 – Графік емпіричної функції розподілу

Отже, вибіркова сукупність складала 122 виміри автобусних маршрутів. У табл. 2 представлені статистичні параметри оцінки α_T для автобусних перевезень міста Черкаси.

Таблиця 2

Статистичні параметри оцінки α_T для міста Києва

Параметр	Автобус
Дисперсія	0,002
Математичне очікування	0,35
Середнє квадратичне відхилення	0,04
Інтервал (P = 95%)	0,35±0,007

Висновки

Проведені дослідження підтверджують, що ідентифікація закономірностей рухливості населення є фундаментальним аспектом у розв'язанні широкого спектра транспортних та містобудівних задач.

У роботі обґрунтовано методику визначення пасажирських і транспортних кореспонденцій на основі аналізу транзакцій безготівкового розрахунку в муніципальному транспорті.

Розроблений алгоритм ідентифікації поїздок та складних пасажирських сполучень (що охоплюють одну або декілька транспортних ланок) програмно реалізовано в середовищі Delphi із застосуванням реляційної СУБД. Сформовані масиви даних у поєднанні з коефіцієнтами лінійної апроксимації дозволяють масштабувати вибіркові показники до параметрів генеральної сукупності. При цьому процедура виділення необхідних підмножин даних формалізована через відповідні характеристичні функції.

Перелік використаних джерел

- [1] Contactless ICT transaction model of the urban transport service / Pavlović Z., Banjanin M., Vukmirović J., Vukmirović D. *Transport*. 2020. Vol. 35, № 6. Pp. 621–634. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2020.12529>.
- [2] Markowska K., Jamka M. Performing a road transport service on the example of a transportation and forwarding company. *WUT Journal of Transportation Engineering*. 2018. Vol. 120. Pp. 279–286. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.4780>.
- [3] Mogaji E., Nguyen P. Evaluating the emergence of contactless digital payment technology for transportation. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024. Vol. 203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123378>.
- [4] Chen S., Yang X. A new public transport payment method based on NFC and QR code. *IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering*, Beijing, China, 11–13 September 2020. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITE50838.2020.9231356>.
- [5] Determinants of passengers' ticketing channel choice: New evidence of e-payment behaviors from Xian, China / Xiaowei Li et al. *Transport Policy*. 2023. Vol. 140. Pp. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.06.015>.
- [6] Digital payment adoption in public transportation: Mediating role of mode choice segment in developing cities / Wani S. A., Pani A., Mohan R., Bhowmik B. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2025. Vol. 191. Article 104319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104319>.
- [7] Fraczek B., Urmanek A. Financial inclusion as an important factor influencing digital payments in passenger transport. A case study of EU countries. *Research in Transportation Business and Management*.

2021. Vol. 41. Article 100691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100691>.
- [8] Cheng Z., Trepanier M., Sun L. Incorporating travel behavior regularity into passenger flow forecasting. arXiv:2004.00992. 2020. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.00992>.
- [9] Is not the truth the truth?: Analyzing the Impact of User Validations for Bus In/Out Detection in smartphone-based Surveys / V. Servizi et al. arXiv:2202.11961. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11961>.
- [10] Lee B., Garn W., Fakhimi M., Ryman-Tubb N. F. Improving public transport through machine learning influence flow analysis (MIFA): Southern England bus case study. *Public Transport*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-024-00387-2>.
- [11] Multi-graph convolutional-recurrent neural network (MGC-RNN) for short-term forecasting of transit passenger flow / He Y., Li L., Zhu X., Tsui K. L. arXiv:2107.13226. 2021. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.13226>.
- [12] Review of passenger flow modelling approaches based on a bibliometric analysis / Hecht J., Li W., Li Z., Dehbi Y. arXiv:2511.13742. 2025. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.13742>.
- [13] Scháno M., Nový J., Dvořáčková A. The Behavioral Impact of public transport unreliability: A Performance indicator based approach. *Transportation research procedia*. 2025. Vol. 91. Pp. 203-210 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.10.027>.
- [14] Шльончак І., Лук'янченко О. Формування альтернативних стратегій управління виробничими процесами автотранспортного підприємства. *Розвиток транспорту*. 2021. Вип. №3(10). С. 71-80. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2021.3-10.06>.
- [15] Тарандушка Л., Шльончак І., Тарандушка І. Оцінка якості обслуговування пасажирів міським транспортом загального користування в м. Черкаси. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36). С. 253-261. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.253-261](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.253-261).
- [16] Шльончак І., Лук'янченко О., Тарандушка І. Аналіз транспортних потоків та прогнозування інтенсивності руху різних видів транспорту на прикладі вулично-дорожньої мережі м. Черкаси. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36). С. 307-312. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.307-312](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.307-312).

RESEARCH ON PASSENGER FLOWS OF URBAN TRANSPORT ON THE EXAMPLE OF CHERKASY CITY

- | | |
|-------------------------|--|
| Tarandushka L.A. | D.Sc. (Engineering), professor, Cherkassy State Technological University, Cherkassy, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1410-9088 , e-mail: tarandushka@ukr.net ; |
| Shlonchak I.A. | PhD (Engineering), associate professor, Cherkassy State Technological University, Cherkassy, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5096-2414 , e-mail: Igor_Shlonchak@ukr.net ; |
| Murovanyi I.S. | PhD (Engineering), associate professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9749-980X , e-mail: Igor_Intu@ukr.net |

The paper considers a methodology for determining passenger and transport correspondences based on the analysis of cashless payment transactions for a trip in urban transport. An algorithm for determining passenger trips and passenger correspondences has been developed. The algorithm was formed taking into account the set of tickets (magnetic cards) for cashless passenger payment. The considered algorithm for determining passenger trips (transport correspondences), as well as passenger correspondences that may include several trips, was implemented in the form of a computer program developed in the Delphi programming language using the Microsoft Access relational database management system. It is worth noting that the use of standard software components provides the ability to integrate and use most modern systems without the need for significant modification. As a result of applying the correspondence definition algorithm, a set of correspondences is formed, which is used as a basis for approximating the parameters of the general set of correspondences. It is proven that the share of cashless payments in urban transport corresponds to the normal distribution law. The studies used theoretical methods of scientific research, mathematical modeling methods, and the method of computational experiment. As a result of the research, it was found that determining the patterns of population mobility is a key issue for solving a wide range of transport and urban planning problems. An algorithm for determining passenger trips (transport correspondences) and passenger correspondences (consisting of one or more trips) was developed, implemented in a computer program in the Delphi programming language. As a result of the research, it was found that the patterns of population mobility are a key issue for solving a wide range of transport and urban planning problems.

Keywords: public urban transport; passenger flow assessment methodology; seed correspondence; cashless fare payment; transaction.

References

- [1] Z. Pavlović, M. Banjanin, J. Vukmirović, and D. Vukmirović, "Contactless ICT transaction model of the urban transport service," *Transport*, vol. 35, № 6, pp. 621–634, 2020. doi: **10.3846/transport.2020.12529**.
- [2] K. Markowska, and M. Jamka, "Performing a road transport service on the example of a transportation and forwarding company," *WUT Journal of Transportation Engineering*, vol. 120, pp. 279–286, 2018. doi: **10.5604/01.3001.0014.4780**.
- [3] E. Mogaji, and P. Nguyen, "Evaluating the emergence of contactless digital payment technology for transportation," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 203, 2024. doi: **10.1016/j.techfore.2024.123378**.
- [4] S. Chen, and X. Yang, "A new public transport payment method based on NFC and QR code," in *Proc. of the IEEE 5th Int. Conf. on Intelligent Transportation Engineering*, Beijing, China, Sept. 11–13, 2020. doi: **10.1109/ICITE50838.2020.9231356**.
- [5] X. Li, et al., "Determinants of passengers' ticketing channel choice: New evidence of e-payment behaviors from Xian, China," *Transport Policy*, vol. 140, pp. 30–41, 2023. doi: **10.1016/j.tranpol.2023.06.015**.
- [6] S. A. Wani, A. Pani, R. Mohan, and B. Bhowmik, Digital payment adoption in public transportation: "Mediating role of mode choice segment in developing cities," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 191, article 104319, 2025. doi: **10.1016/j.tra.2024.104319**.
- [7] B. Fraczek, and A. Urmanek, "Financial inclusion as an important factor influencing digital payments in passenger transport. A case study of EU countries," *Research in Transportation Business and Management*, vol. 41, article 100691, 2021. doi: **10.1016/j.rtbm.2021.100691**.
- [8] Z. Cheng, M. Trepanier, and L. Sun, "Incorporating travel behavior regularity into passenger flow forecasting," 2020, *arXiv:2004.00992*. doi: **10.48550/arXiv.2004.00992**.
- [9] V. Servizi et al., "Is not the truth the truth?: Analyzing the Impact of User Validations for Bus In/Out Detection in smartphone-based Surveys," 2022, *arXiv:2202.11961*. doi: **10.48550/arXiv.2202.11961**.
- [10] B. Lee, W. Garn, M. Fakhimi, and N. F. Ryman-Tubb, "Improving public transport through machine learning influence flow analysis (MIFA): Southern England bus case study," *Public Transport*, 2025. doi: **10.1007/s12469-024-00387-2**.
- [11] Y. He, L. Li, X. Zhu, and K. L. Tsui, "Multi-graph convolutional-recurrent neural network (MGC-RNN) for short-term forecasting of transit passenger flow," 2021, *arXiv:2107.13226*. doi: **10.48550/arXiv.2107.13226**.
- [12] J. Hecht, W. Li, Z. Li, and Y. Dehbi, "Review of passenger flow modelling approaches based on a bibliometric analysis," 2025, *arXiv:2511.13742*. doi: **10.48550/arXiv.2511.13742**.
- [13] M. Scháno, J. Nový, and A. Dvořáčková, "The Behavioral Impact of public transport unreliability: A Performance indicator based approach," *Transportation research procedia*, vol. 91, pp. 203–210, 2025. doi: **10.1016/j.trpro.2025.10.027**.
- [14] I. Shlonchak, and O. Lukianchenko, "Formuvannia alternatyvnykh stratehii upravlinnia vyrobnychymy protsesamy avtotransportnoho pidpriemstva" ["Formation of alternative strategies for managing production processes of a motor transport enterprise"], *Rozvytok transportu – Transport Development*, no. 3(10), pp. 71–80, 2021. doi: **10.33082/td.2021.3-10.06**. (Ukr.)
- [15] L. Tarandushka, I. Shlonchak, and I. Tarandushka, "Otsinka yakosti obsluhovuvannia pasazhyriv miskym transportom zahalnoho korystuvannia v m. Cherkasy" ["Assessment of the quality of passenger service in public urban transport in Cherkasy"], *Tsentrالنoukraiński naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, no. 5(36), pp. 253–261, 2022. doi: **10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.253-261**. (Ukr.)
- [16] I. Shlonchak, O. Lukianchenko, and I. Tarandushka, "Analiz transportnykh potokiv ta prohnozuvannia intensyvnosti rukhu riznykh vydiv transportu na prykladi vulychno-dorozhnoi merezhi m. Cherkasy" ["Analysis of transport flows and forecasting traffic intensity of different transport modes on the example of the Cherkasy road network"], *Tsentrالنoukraiński naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, no. 5(36), pp. 307–312, 2022. doi: **10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.307-312**. (Ukr.)

Стаття надійшла 22.01.2026

Стаття прийнята 19.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Тарандушка Л. А., Шльончак І. А., Мурований І. С. Дослідження пасажиропотоків міського транспорту на прикладі м. Черкаси. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 225–232. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359962>.

275 ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 658

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359963

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРЕВІЗНИКІВ МАЛОГО ТА СЕРЕДНЬОГО БІЗНЕСУ США ТА УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

- Кічкіна О.І.** канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1077-5964>, e-mail: ki4kinaoi@ukr.net;
- Кічкін О.В.** ст. викладач, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5283-5403>, e-mail: kichkin@ukr.net

Стаття присвячена цифровізації малого та середнього бізнесу у сфері автомобільних вантажних перевезень із порівняльним аналізом досвіду США та України. Метою статті був аналіз та розробка методичних рекомендацій щодо застосування сучасних інформаційних технологій та штучного інтелекту для потреб середнього та малого бізнесу автомобільних перевезень, зокрема рефрижераторних. Дослідження проводить паралелі між досвідом США та України. Представлено порівняльний аналіз існуючих цифрових платформ та систем управління транспортом в США та Україні. Обґрунтовані переваги модульної цифрової архітектури, яка дозволяє невеликим компаніям ефективно інтегрувати спеціалізовані сервіси без значних витрат. Представлено поетапний процес створення інформаційного забезпечення діяльності компанії, що виконує перевезення рефрижераторних вантажів в США. Визначені задачі та методи для їх рішення на кожному етапі з зазначенням отриманих результатів. Особливу увагу приділено впровадженню штучного інтелекту, зокрема методів машинного навчання та нейронних мереж, для вирішення проблеми низької якості сканованих документів через інтелектуальне розпізнавання тексту, що мінімізує ручну працю. Перспективним є використання можливостей сучасних моделей транспортних засобів, оснащених бортовими комп'ютерами, програмним забезпеченням та засобами телематики, що дозволяє забезпечити технологію перевезень оперативною інформацією в реальному часі. У підсумку розроблено методичні рекомендації щодо розробки та впровадження інформаційних систем модульної цифрової архітектури для підприємств малого та середнього перевізного бізнесу, засновані на досвіді діяльності компанії перевізника в США. Використання основних тенденцій такого підходу для створення інформаційного забезпечення діяльності українських перевізників може бути підставою для подолання технологічного розриву та підвищення їх конкурентоспроможності.

Ключові слова: інформаційні технології; цифровізація перевізного бізнесу; автомобільні рефрижераторні перевезення; малий та середній бізнес; штучний інтелект; машинне навчання; нейронні мережі; модульна цифрова архітектура.

Постановка проблеми

Ефективне функціонування малого та середнього бізнесу автомобільних вантажних комерційних перевезень залежить від багатьох факторів. Серед них – інформаційне забезпечення автомобільних вантажних перевезень, що останнім часом набуває все більш вагомego значення. Аналіз досвіду застосування інформаційних систем в управлінні діяльністю компаній перевізників малого та середнього бізнесу в США дозволить зробити певні висновки та надати рекомендації щодо удосконалення інформаційного супроводу діяльності українських перевізників.

Системи управління транспортом (Transport Management Systems – TMS), що використовують у США, націлені на виконання переліку задач: планування та оптимізація перевезень, диспетчеризація, тарифікація та білінг, управління перевізними документами, інтеграція з брокерами, вантажовідправниками та державними установами. Натомість, для більшості малих і середніх автотранспортних компаній США

характерна модульна цифрова архітектура, а не єдина велика TMS. Такі системи формують інформаційний контур підтримки діяльності компанії з функціоналом: експлуатація, диспетчеризація, управління фінансами, платежі, інфраструктурні сервіси. Але децентралізований характер інформаційного забезпечення, характерний для більшості малих та середніх автотранспортних компаній США, ґрунтується на інтеграції спеціалізованих сервісів, а не на впровадженні монолітної TMS, хоча й забезпечує функціональну достатність при мінімальних витратах.

В Україні існують TMS-системи, які за базовим функціоналом і призначенням аналогічні американським TMS, але різняться за масштабом, глибиною автоматизації та технологічними можливостями. Типовий функціонал TMS-систем в Україні включає: планування маршрутів та оптимізацію завантаження транспорту, GPS-моніторинг руху автотранспорту та водіїв у реальному часі, автоматизацію документообігу (електронні перевізні документи, автоматичне формування звітів), аналітику та звітність і функції інтеграції із

зовнішніми системами. Отже, в Україні більшість TMS зосереджені на операційному рівні (планування маршрутів, контроль транспорту), тоді як інтелектуальні функції підтримки рішень та повна автоматизація документообігу залишаються недостатньо розвиненими. Це формує стійкий технологічний розрив між українським та американським ринками автоперевезень.

Однією з ключових проблем інформаційного забезпечення автоперевезень в Україні є висока частка ручної обробки перевізних документів, що призводить до помилок, затримок оплати, непорозумінь між суб'єктами перевізного процесу тощо. Тому рішення щодо автоматизованого розпізнавання, передачі перевізних документів та врахування досвіду використання штучного інтелекту та алгоритмів самонавчання в процесі диспетчеризації є необхідною умовою підвищення ефективності українських транспортних підприємств.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз публікацій щодо розробки інформаційних систем з використанням існуючих програмних сервісів для малого та середнього бізнесу автоперевізників в США та Україні показав, що цьому питанню приділяється незначна увага. Що стосується американських джерел, то в більшості з них приділяється увага великим TMS, використанню ШІ в системах планування маршрутів, диспетчеризації, контролю стану вантажів.

Проблемам та задачам впровадження цифрових технологій в перевізному бізнесі США присвячені роботи дослідників та практиків [1-3].

В роботі [1] досліджується, як штучний інтелект відкриває нові рівні ефективності, безпеки та прибутковості в транспортному секторі та яким чином він може бути застосований. Відзначаються можливості систем з використанням ШІ, а саме: вміння аналізувати величезні обсяги інформації про погоду, дорожній рух, поведінку водіїв та продуктивність транспортних засобів, оптимізувати та корегувати маршрути постачання, аналізувати дані датчиків транспортних засобів, запобігати аварійним ситуаціям. Але вказується, що повний потенціал ШІ може бути реалізований економічно ефективно лише у поєднанні із сучасним хмарним технологічним стеком та застосовуючи підхід «людина в циклі». В статті також надані приклади практичного застосування ШІ в транспортній сфері: системи автономного водіння на базі ШІ, системи коучингу водіїв, в диспетчеризації розподілу вантажів між водіями, в системі комунікації з клієнтами, в автоматизації діяльності бек-офісу. Але характер статті є декларативним без зазначення конкретних методик та алгоритмів створення систем з використанням ШІ.

Стаття [2] присвячена питанню створення та впровадження нових TMS, які б задовольняли потреби малого та середнього транспортного бізнесу США та надали б можливість зрівняти умови на ринку перевезень з їхніми більшими конкурентами. Відзначається, що використання таких цифрових платформ з ШІ

допоможе перевізникам малого та середнього бізнесу швидко та ефективно зіставляти вантажі з доступними потужностями.

В дослідженні [3] визначені стратегічні підходи, які дозволяють підприємствам з обмеженими IT-бюджетами та дефіцитом кваліфікованого персоналу успішно впроваджувати цифрові диспетчерські платформи та фіксувати економічні вигоди. Автор пропонує систематичну, поетапну методологію впровадження: від пілотного запуску базової телематики до повної інтеграції із зовнішніми системами обліку та модулями оплати. Запропоновано єдину дорожню карту, що включає вибір модельних тарифів, механізми залучення лідерів серед водіїв та диспетчерів, а також рекомендований набір із п'яти ключових показників ефективності. Автор зосереджується саме на вигідності застосування цифрових технологій та існуючих на ринку США програмних продуктів в діяльності саме невеликих транспортних компаній, дає обґрунтування витрат і вигоди з детальним аналізом. Це одна з небагатьох робіт, що націлена саме на економічне обґрунтування доцільності застосування цифрових технологій в діяльності компаній перевізників малого та середнього бізнесу США та зосереджена на методиці впровадження цих технологій, але в ній не висвітлюються методи та алгоритми розробки інформаційних систем для таких підприємств.

Аналізу міжнародного досвіду цифровізації процесів у транспортній галузі присвячені роботи науковців та практиків Гузенко С., Гаврикова Д.

В оглядовій статті [4] автор дає аналіз загальному стану диджиталізації перевезень, спираючись на дослідження американської компанії на ринку IoT і логістичного диджиталу Samsara. Виділяються задачі управління температурою під час рефрижераторних перевезень, контролю роботи водіїв, прокладання маршрутів і планування витрат на перевезення. Автор, із знанням реалій бізнесу перевізників США та інформаційного забезпечення їх діяльності, надає аналіз існуючих програмних продуктів, що забезпечують перевізний процес, та аналізує можливі шляхи диджиталізації процесів для транспортних компаній. Він визначає два шляхи: кастомна розробка (під індивідуальні потреби та бізнес-задачі конкретного замовника) або використання готового програмного забезпечення, і обґрунтовує чому саме компанії середнього та малого бізнесу обирають кастомну розробку. В цій же статті автор дає порівняльний аналіз впровадженню інформаційних технологій в транспортній галузі в Західній Європі, Північній Америці та Україні, і визначає що галузь IT почала формуватися в нашій країні на десятиліття пізніше, а отже, спирається на сучасніші технології.

В роботі [5] автор надає аналіз міжнародного досвіду впровадження цифрових технологій в транспортній галузі Німеччини, Франції, Швеції, США, Сінгапуру та Нідерландах, порівнюючи окремі цифрові технології та рішення. Розглядає використання в

цифровізації бізнес-процесів на транспорті ШІ, IoT, цифрових двійників та інші.

Вирішення задачі розпізнавання текстів документів присвячені роботи науковців R. Smith [6, 7], Daria Antonova, Dar-Shyang Lee [7], а зокрема, за допомогою штучного інтелекту присвячені роботи Коростіна О.О., Ткаченко К., Зуєнко О. [8,9].

В дослідженні [8] здійснено аналіз сучасних технологій оптичного розпізнавання текстів (OCR), визначені принципи роботи OCR-систем, оцінено їхні переваги та обмеження, а також надані рекомендації щодо підвищення ефективності їх використання. В дослідженні приводиться аналіз переваг та недоліків використання штучного інтелекту (ШІ) для процесу розпізнавання тексту, а також представлено алгоритм обробки текстових документів за допомогою ШІ. Дослідження націлено на використання цієї технології в сфері морських перевезень. Автор наводить приклади використання OCR-технологій в практичній діяльності в таких логістичних компаніях як Amazon, Maersk, UPS, FedEx.

Розгляд і аналіз загальних проблем та перспектив щодо розробки систем розпізнавання друкованих текстів на основі використання нейронних мереж представлено в роботі [9]. Автори представили власний підхід до розпізнавання текстів на основі нейронних мереж, що навчаються. Цей підхід базується на принципі навчання нейромережі графічними комбінаціями символів, які однозначно характеризують головні показники в великих за обсягом вантажних документах.

Аналіз літературних та наукових джерел показав, що на відміну від США, українські академічні роботи менш сфокусовані на цифровізації саме автоперевезень як бізнесу. Більшість авторів оцінюють цифрові інструменти у страхуванні, маркетингу, логістичних ланцюгах та загальному транспортному секторі, мало уваги приділено специфічним IT-платформам для малих автоперевізників, надаються загальні рекомендації щодо цифрових рішень у перевізному процесі.

Мета статті

Аналіз та розробка методичних рекомендацій щодо застосування сучасних інформаційних технологій та штучного інтелекту для потреб середнього та малого бізнесу автомобільних рефрижераторних перевезень.

Матеріали та методи

Об'єкт дослідження – процес цифровізації діяльності перевізників малого та середнього бізнесу США та України.

Предмет дослідження – інформаційно-технологічні рішення, пов'язані з вирішенням задач організації та інформаційного забезпечення перевезень рефрижераторних вантажів, зокрема методики розпізнавання документів.

В роботі акумульований досвід багаторічної практичної співпраці з американською транспортною компанією. Накопичення і систематизація даних здійснювалася за допомогою технології реляційних баз даних. Для розробки методики розпізнавання документів застосовувалися методи штучного інтелекту, зокрема метод «глибокого навчання з підкріпленням», математичною основою якого є метод зворотного поширення помилок.

Виклад основного матеріалу

Ситуація на ринку автомобільних перевезень у США склалася таким чином, що 96% автопарків у США мають у своєму складі менше ніж 20 вантажівок [3]. Дослідження в США проблеми цифровізації діяльності малих та середніх автоперевізних компаній (з автопарком 50 і менше автомашин) показало, що більшість з них не вважають саме інформаційні технології однією зі своїх головних проблем, але визнають, що вони впливають на успішність діяльності [10]. Проникнення цифрових транспортно-вантажних рішень у малий сектор залишається обмеженим: лише 25% автопарків з кількістю до 49 транспортних засобів впровадили програмні рішення для планування/диспетчеризації, що демонструє значний розрив між ринковими можливостями та фактичною цифровою готовністю малого бізнесу [11]. Основні причини, за яких представники малого та середнього перевізного бізнесу не дуже активно впроваджують інформаційні технології (типу великих TMS-систем), це – вартість, труднощі впровадження, необхідність утримання додаткового персоналу (інформаційний сектор), інтеграція з іншими системами, технічне забезпечення та також невизначеність чіткої рентабельності інвестицій.

Як показало дослідження [10], найпопулярнішими платформами програмного забезпечення для вантажних перевезень малого та середнього бізнесу в США є ті, що використовуються для оптимізації та відстеження мережі перевезень. 63% опитаних малих перевізників інвестували в системи управління автопарком або диспетчеризації. На другій позиції, відразу за системами управління автопарком, за популярністю використання йде програмне забезпечення для керування електронними реєстраторами (ELD). Серед невеликих перевізників цим програмним забезпеченням користується 61% [10]. Отже, опитування в рамках цього дослідження дає можливість зробити висновок, що перевізники з невеликим автопарком вважають за краще контролювати вантажівки та водіїв, планувати перевезення, бронювати вантажі та оптимізувати маршрути, здійснювати контроль за дорожніми сплатами, вести бухгалтерський облік з використанням повністю цифрового або частково цифрового рішення.

В Україні, за даними Міністерства інфраструктури України, на 2025 рік працюють близько 56 000 перевізників у сфері комерційних вантажних та пасажирських перевезень [12]. Серед них великі компанії-

перевізники складають приблизно – 5%, середні (від 50 до 20 автомобілів) приблизно до 15%, всі інші підприємства-перевізники мають у своєму складі менше 20 автомобілів або є індивідуальними підприємствами (ФОП). Такий розподіл є доволі приблизний та заснований на аналізі непрямой інформації у відкритих джерелах, але навіть такий неточний аналіз дає можливість зробити висновок, що проблема впровадження цифрових технологій в діяльність середніх та малих компаній-перевізників є актуальною для України.

Що стосується цифрових популярних рішень, які сьогодні найчастіше використовують для управління доставкою в Україні, автори статті [13] наводять топ-5 систем, але в рамках проблематики дослідження слід звернути увагу на чотири з них. Це – ANT-Logistics, ABM Rinkai TMS, Toscan TMS, 4logist. Порівнюючи ці інформаційні системи, можна сказати, що всі вони спрямовані на вирішення логістичних і транспортних задач, використовують хмарну платформу, пропонують широкий набір інструментів. Зокрема, ANT-Logistics дає можливість використання мобільного застосунку для водіїв, планування маршрутів як для внутрішніх, так і міжнародних перевезень, і ряд інших інструментів, спрямованих на контроль в реальному часі [13]. Що стосується ABM Rinkai TMS, ця система надає широкий перелік можливостей для автоперевізників середнього і великого бізнесу, пропонуючи функції формування та контролю маршрутів з урахуванням особливостей у реальному часі. Також в системі надається можливість підписання електронних ТТН у мобільному додатку водія [13]. Toscan TMS пропонує схожий набір функцій (планування, контроль, мобільний застосунок), а також – GPS-відстеження транспортних засобів [13]. 4logist TMS-платформа поєднує декілька модулів, серед яких модуль управління транспортом. Але ця система має більш широке застосування для управління логістичним процесом.

На підставі аналізу відкритих джерел можна зробити висновок, що в Україні середні компанії автоперевізники частково впроваджують TMS, GPS-системи, частина з них автоматизує документообіг, серед малих компаній автоперевізників більшість частково використовують базові інструменти (GPS, мобільні додатки), рідше – повноцінні TMS/ERP. Тобто при великому відсотку малих компаній в структурі перевізного ринку відсоток застосування цифрових технологій неприйнятно малий. В основному такі перевізники часто не мають повноцінної TMS, а обмежується Excel, месенджерами, базовими GPS-додатками. Отже, застосування досвіду США в створенні відповідної інформаційної системи для компаній перевізників середнього та малого бізнесу для розробки аналогічних систем в Україні є актуальним і доцільним.

Результатом майже 10-ти річного досвіду роботи авторів з американською компанією автоперевізником рефрижераторних вантажів стало вирішення декількох актуальних задач для створення інформаційної

системи підприємства, рішення яких здійснювалося поетапно.

На першому етапі була вирішена задача інтеграції відокремлених програмних сервісів в єдину інформаційну систему, яка б забезпечувала технологічний процес компанії.

В процесі своєї діяльності компанія використовувала декілька відокремлених цифрових сервісів. А саме: систему обліку та оплати паливно-мастильних матеріалів – FleetOne, обліку кредитних (дорожніх) чеків – ComData, обліку та оплати проїзду платними шляхами – Ipass&Ktag, обліку вантажних перевезень, документів та роботи з вантажними брокерами – ITS Dispatch, фінансового та бухгалтерського обліку – QuickBooks та Google сервісів для організації роботи офісу. Зростання парку транспортних засобів, обсягів перевезень, виникнення нових зобов'язань, що пов'язані з наданням послуг з диспетчеризації та обліку для сторонніх малих компаній перевізників, привели до необхідності створення іншого підходу до інформаційного забезпечення компанії. Процес створення нових інформаційних рішень для удосконалення технологічного процесу перевезень здійснювався поетапно з вирішенням відповідних задач на кожному етапі.

Задача інтеграції модульних інформаційних сервісів в технологічний процес компанії-перевізника була вирішена створенням корпоративної бази даних та відповідного застосунку, методика та алгоритм створення якої представлена авторами в попередніх публікаціях [14, 15].

Проектування корпоративної бази даних вимагало визначення ключових компонентів, які б дозволили забезпечити програмну реалізацію зв'язків між відповідними таблицями.

В якості таких ключових компонентів були визначені наступні поля відповідних SQL-таблиць корпоративної бази даних:

- номер вантажу – використовується для реалізації зв'язку таблиці LOAD-ITS (дані про вантаж) з таблицею COMDATA (дані про дорожні кредити) та таблицею INVOICES-QBO (фінансові транзакції з замовниками-брокерами);
- номер траку - використовується для реалізації зв'язку таблиць LOAD-ITS, INVOICES-QBO, COMDATA з таблицею FUEL-FLEETONE (інформація про витрати палива), таблицями IPASS та KTAG (платні шляхи), TEMP-SAMSARA (температура вантажу).

Наявність корпоративної бази даних забезпечує реалізацію наступних інформаційних транзакцій діяльності компанії:

- реалізація транзакцій, пов'язаних з оформленням вантажних документів;
- реалізація сервісних транзакцій, пов'язаних з контролем температури вантажів;
- реалізація фінансових транзакцій, пов'язаних з перевезенням температурних вантажів.

Кожна транзакція виконує певну послідовність інформаційно-технологічних операцій, які разом утворюють закінчену функціональність з точки зору перевезення температурних вантажів.

Послідовне виконання зазначених транзакцій реалізоване авторами в методиці удосконалення інформаційної логістики підприємства-автоперевізника температурних вантажів [14].

В рамках реалізації наведеної методики особливої уваги потребують технологічні рішення, пов'язані з вирішенням специфічних задач, що виникають в результаті взаємодії суб'єктів ринку вантажних перевезень температурних вантажів, які здебільшого представлені вантажними брокерами, перевізниками, відправниками та одержувачами вантажів.

Невід'ємною складовою удосконалення технологічного процесу компанії було вирішення проблеми оперативного контролю температури вантажів за допомогою технології RFID та відповідного програмного забезпечення з можливістю «самонавчання» в процесі перевезень. Вирішення цієї проблеми було завданням другого етапу створення інформаційної системи компанії. Важливість задачі автоматизованого контролю температури та її математичне моделювання при перевезенні рефрижераторних вантажів було висвітлено в

роботі авторів [16]. Практичний результат цієї методики полягає в інтелектуалізації процесу контролю температурного режиму перевезення вантажів, можливості удосконалення системи за рахунок «самонавчання» та врахування умов перевезень різного роду вантажів.

Наступною проблемою в діяльності компанії була затримка передачі супроводжуючих документів через неякісні копії документів, що унеможливило автоматизовану обробку цих документів та приводило до непорозуміння з суб'єктами перевізного процесу. Вирішення цієї проблеми стало завданням третього етапу. Рішення цієї задачі полягало у використанні сучасних моделей ШІ – в першу чергу у використанні розпізнавання певних комбінацій символів, притаманних різновидам вантажних документів як основи «навчання» створеного для цього ШІ-агента та інтеграції його в систему управління технологічним процесом перевезення. Результатом реалізації наведеної задачі є створення технологічного рішення повністю автоматизованого електронного документообігу вантажних документів між вантажними брокерами та перевізниками.

Основою рішення задачі розпізнавання неякісних копій вантажних документів є математична модель нейронної мережі, яка підлягає подальшому «навчанню» (рис. 1) [17].

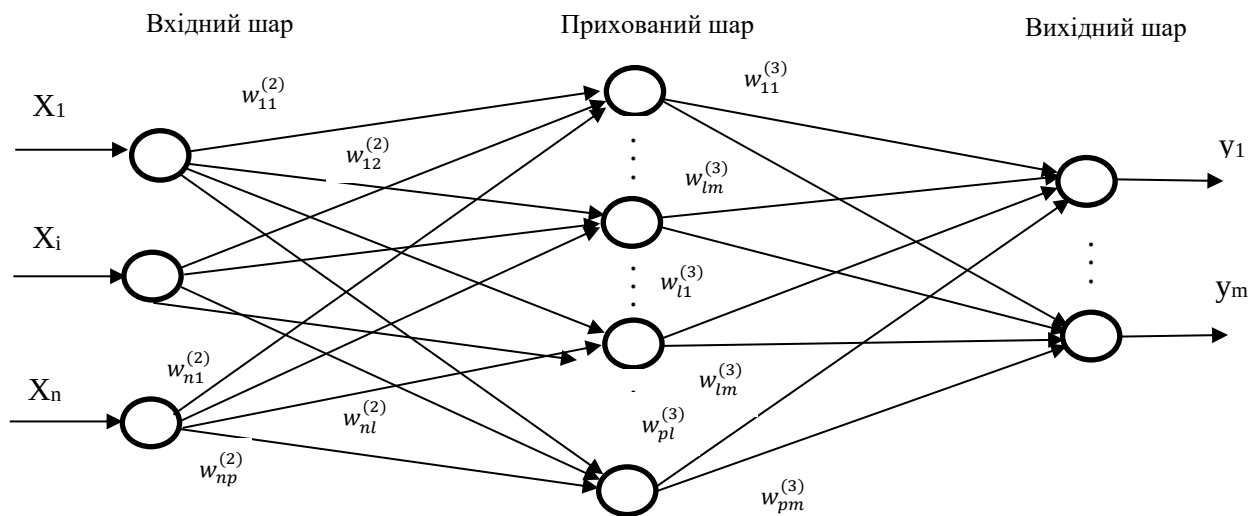


Рис. 1 – Нейронна мережа типу персептрон

Розглянемо математичний та алгоритмічний сенс «машинного навчання» моделі розпізнавання текстів вантажних паперових документів низької якості сканування.

Модель персептрона згідно з представленою структури може мати безліч внутрішніх прихованих шарів. Тому оптимізацію параметрів, яка складає основу «машинного навчання» мережі, виконують за допомогою методу зворотного поширення помилки [17].

Основа методу складає розрахунок часткових похідних наступного критерію оптимальності [17]:

$$\hat{y}_j = \psi_j^{(3)} \left(b_j^{(3)} + \sum_{l=1}^p [w_{lj}^{(3)} \cdot \psi_l^{(2)}(b_l^{(2)} + \sum_{i=1}^n [w_{il}^{(2)} \cdot \psi_i^{(1)}(x_i)]] \right), \quad \text{для } j=(\overline{1, m}) \quad (1)$$

де $\psi_i^{(1)}(\cdot)$ – функція активації i -го ($i=\overline{1, n}$) нейрона першого (вхідного) шару нейронної мережі; [17]

$\psi_l^{(2)}(\cdot)$ та $b_l^{(2)}$ – функція активації та параметр зміщення суматора l -го ($l=\overline{1, p}$) нейрона другого (прихованого) шару нейронної мережі;

$\psi_j^{(3)}(\cdot)$ та $b_j^{(3)}$ – функція активації та параметр зміщення суматора j -го ($j=\overline{1,m}$) нейрона третього (вихідного) шару нейронної мережі;

$w_{il}^{(2)}$ – вага міжнейронного зв'язку між i -тим нейроном першого шару і l -тим нейроном другого шару нейронної мережі;

$w_{lj}^{(3)}$ – вага міжнейронного зв'язку між l -тим нейроном другого шару і j -тим нейроном третього шару нейронної мережі [17].

Алгоритм працює ітеративно – сутність його полягає у налаштуванні параметрів нейромоделі шляхом мінімізації похибки моделювання (2). Значення похибки та часткових похідних використовується ітеративно для налаштування-«навчання» нейронної мережі. Динаміка «навчання» нейронної мережі полягає у зменшенні наступних часткових похідних критерію оптиміальності (2):

$$\varepsilon_t = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (y_j^t - \hat{y}_j^t)^2, \quad (2)$$

де y_j^t та $\hat{y}_j^t$ – реальне та розраховане моделлю згідно з функцією (1) значення j -тої результуючої змінної ($j=\overline{1,m}$) на t -ому кроці навчання.

Корекція параметрів нейронної мережі здійснюється у напрямку зменшення часткових похідних (3,4,5) критерію (1).

Часткові похідні функції похибки моделювання: [17]:

$$w(t+1) = w(t) - \eta \frac{\partial \varepsilon_t(w,b,k)}{\partial w}, \quad (3)$$

$$b(t+1) = b(t) - \eta \frac{\partial \varepsilon_t(w,b,k)}{\partial b}, \quad (4)$$

$$k(t+1) = k(t) - \eta \frac{\partial \varepsilon_t(w,b,k)}{\partial k}, \quad (5)$$

де $\varepsilon_t(w,b,k)$ – функція похибки моделювання,
 w – вектор ваг міжнейронних зв'язків мережі,
 b – вектор параметрів зміщення суматорів нейронів

k – вектор параметрів функції активації нейронів;
 η – величина кроку зближення [17].

Послідовність ітерацій методу зворотного поширення похибки має наступний вигляд:

- ініціалізація параметрів нейронної мережі – параметрам присвоюються випадкові малі величини;
- формування навчальної вибірки на основі відповідної бази даних, що містить еталонні значення вхідних та вихідних векторів даних;
- вихідний розрахунок нейронної мережі;
- зміна параметрів моделі – здійснюється у напрямку зменшення відповідних часткових похідних;
- завершення алгоритму у разі досягнення відповідного значення критерію (1), інакше відбувається перехід на третю ітерацію.

Наведена математична формалізація моделі «навчання» передбачає практичну реалізацію за допомогою існуючих моделей штучного інтелекту. Більшість існуючих моделей штучного інтелекту мають лінгвістичну природу застосування. Тому практична реалізація процесу «навчання» передбачала:

- формалізацію лінгвістичного алфавіту мови «навчання» існуючої моделі;
- формалізацію перетворення елементів алфавіту в мовні висловлювання;
- формалізацію граматичних правил застосування мовних висловлювань.

Перший етап формалізації лінгвістичного алфавіту мови «навчання» існуючої моделі передбачав вибір графічних елементів, які мають скласти той алфавіт, на основі якого буде застосовано можливості конкретної моделі штучного інтелекту.

Можливість створеного алфавіту відображає здатність програмного забезпечення відрізнити необхідні елементи ідентифікації в умовах відносної невизначеності, зумовленої низькою якістю сканованих паперових документів.

Другий етап передбачав створення алгоритмів перетворення результатів ідентифікації конкретних елементів алфавіту в безпосередні логічні «мовні» висловлювання – логічні речення, які відповідають поставленій меті перетворення неякісних копій в якісний стан документа.

Третій етап полягав у створенні граматичних правил, які мають зробити можливим генерацію висловлювань певної послідовності, яка створює саме той лінгвістичний механізм, який використовують найбільш поширені моделі ШІ на практиці.

Логічним є питання про необхідність та роль ШІ в вирішенні задач, якими раніше займалися стандартні OCR-програми. Відповідь проста – це велика кількість різновидів форм вантажних документів та неможливість їх будь-якої стандартизації через монополізацію ринка вантажних перевезень у США та юридичну необхідність оформлення паперових перевізних документів, як мінімум на поточному етапі. Крім цього, важливо розуміти, що стандартні OCR-програми вирішують завдання більш детальної ідентифікації та базуються на заздалегідь визначених елементах алфавіту з неможливістю їх «навчання» на інших алфавітах та граматичних правилах.

Таким чином, можемо підсумувати, що на сьогодні вирішено комплекс задач для створення методики інтеграції модульних інформаційних сервісів в технологічний процес компанії-перевізника. При цьому представлена методика не є завершеною, в планах – розробка та впровадження нових задач. Зокрема, застосування агента ШІ в процесі диспетчеризації.

Процес створення системи інформаційного забезпечення діяльності компанії-перевізника рефрижераторних вантажів представлено на рисунку 2 (пунктиром позначено наступний етап розробки).

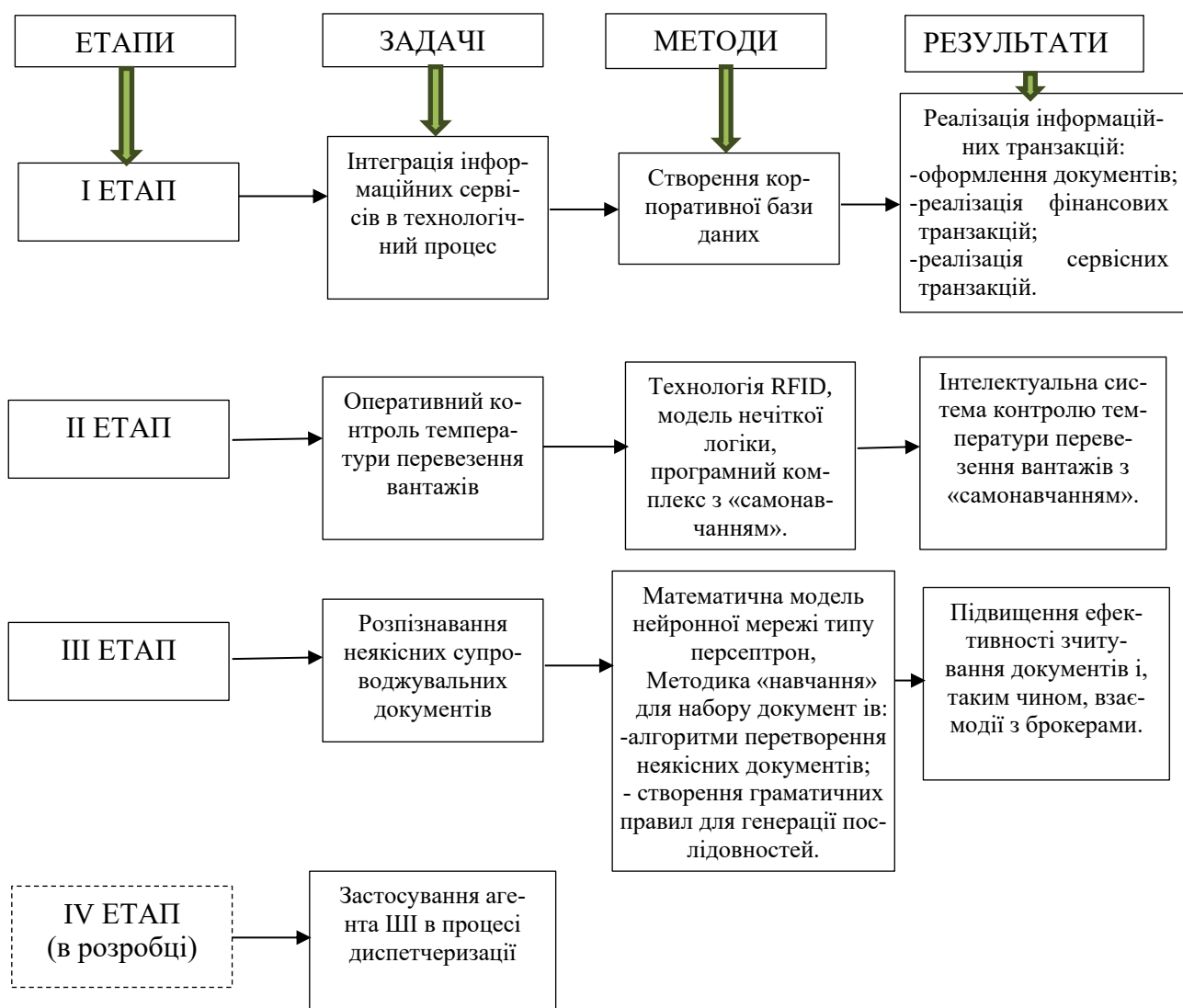


Рис. 2 – Структурна схема процесу створення системи інформаційного забезпечення діяльності компанії-перевізника рефрижераторних вантажів

Висновки

Порівняльний аналіз використання та впровадження цифрових технологій показав, що в Україні недостатньо уваги приділяється впровадженню цифрових рішень на рівні підприємств малого та середнього перевізного бізнесу. Перспективним напрямком вирішення цієї проблеми є застосування методики інтеграції модульних інформаційних сервісів в інформаційні системи таких підприємств. Також актуальним є вирішення задачі автоматизованого розпізнавання документів, використання сучасних засобів для аналітики та прийняття рішень. Таким чином, запропонована методика модульної цифрової архітектури інформаційного забезпечення діяльності малих та середніх компаній автоперевізників створює основу підвищення їх ефективності на підставі інтеграції різноманітних нових цифрових модулів. Особлива роль при цьому відводиться

агентам штучного інтелекту, як окремим цифровим модулям запропонованої методики. Що стосується апаратного забезпечення реалізації методики, то особлива роль має бути приділена технологічним можливостям сучасних моделей автотранспортних засобів з відповідними бортовими комп'ютерами, програмним забезпеченням та інфраструктурою датчиків.

Перелік використаних джерел

[1] Gearing up for the Next Transformation: AI in the Trucking Industry: Driving the Next Transformation in Fleet Operations. Beyond trucks. URL: <https://www.beyondtrucks.com/resources/white-papers/ai-for-the-trucking-industry> (дата звернення: 10.02.2026).

[2] The Logistics Technology Gap for Small and Midsized Shippers. Transportation & Logistics

- Software. URL: <https://transportmsandlogistics.com/2022/08/23/the-logistics-technology-gap-for-small-and-midsized-shippers/> (дата звернення: 10.02.2026).
- [3] Shalamov R. Strategies for the Implementation of Digital Dispatch Platforms in Small Trucking Companies. *The American Journal of Management and Economics Innovation*. 2025. Vol. 7(07). Pp. 25-32. DOI: <https://doi.org/10.37547/tajmei/Volume07Issue07-03>.
- [4] Гузенко С. Диджиталізація перевезень: головні виклики при оцифруванні логістики. URL: <https://mind.ua/openmind/20257544-didzhitalizaciya-perevezhen-golovni-vikliki-pri-ocifruvanni-logistiki> (дата звернення: 12.02.2026).
- [5] Гавриков Д. Міжнародний досвід цифровізації бізнес-процесів на підприємствах транспорту. *Modeling the development of the economic systems*. 2025. Vol. 4. Pp. 92-98. DOI: <https://doi.org/10.31891/mdes/2025-18-9>.
- [6] Smith R. An Overview of the Tesseract OCR Engine. Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition, Curitiba, Brazil, 23-26 September 2007. Pp. 629-633. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2007.4376991>.
- [7] Smith R., Antonova D., Lee D.-S. Adapting the tesseract open source OCR engine for multilingual OCR. *Proceedings of the International Workshop on Multilingual OCR*, Barcelona, Spain, 25 July 2009. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1145/1577802.1577804>.
- [8] Коростін О. О. Ефективність розпізнавання тексту в автоматизації міжнародних морських перевезень за допомогою штучного інтелекту. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 3. С. 29-38. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.3.4>.
- [9] Ткаченко К., Зуєнко О. Використання багатошарової LSTM-нейромережі у процесі розпізнавання друкованих текстів. *Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері*. 2022. Вип. 5(1). С. 199-215. DOI: <https://doi.org/10.31866/2617-796X.5.1.2022.261305>.
- [10] Technology Guide for Truckers: How Small Fleets Are Using Digital Tools. RXO. URL: <https://rxo.com/resources/carrier/5-carrier-steps/> (дата звернення 14.01.2026).
- [11] Fleet Technology Trends Report. 2023. URL: https://www.fleetmanagementweekly.com/wp-content/uploads/2023/11/VZC-2077702-2024-Fleet-Technology-Trends-R1_09292023.pdf (дата звернення: 14.01.2026).
- [12] Статистичні дані по галузі автомобільного транспорту. Ministry for Development of Communities and Territories of Ukraine. URL: https://mtu.gov.ua/en/content/statistichni-dani-pogaluzi-avtomobilnogo-transportu.html?utm_source (дата звернення: 22.01.2026).
- [13] Порівняння рішень для управління доставкою «останньої милі». URL: https://trademaster.ua/articles/313959?utm_source (дата звернення: 22.01.2026).
- [14] Кічкін О. В., Водолазський О. О., Кічкіна О. І. Методика удосконалення інформаційного забезпечення діяльності автоперевізника на ринку Північної Америки. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 4(234). С. 111-115.
- [15] Кічкін О. В., Кічкіна О. І., Vodolazskyy M. Інформаційне забезпечення бізнесу автомобільних вантажних перевезень. *Транспорт: наука та практика: збірник наукових праць IV-ї міжнародної науково-практичної конференції, Київ-Одеса, 22 травня 2025 р.* С. 266-269.
- [16] Кічкін О. В., Кічкіна О. І. Нечітке моделювання – основа інтелектуального управління температурою в рефрижераторних автотранспортних засобах. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 3(251). С. 89-94.
- [17] Шарапов О. Д., Матвійчук А. В. Поширення помилки в задачах оптимізації параметрів нейронних мереж. *Моделювання та інформаційні системи в економіці*. 2009. Вип. 79. С. 30-45.

DIGITAL TRANSFORMATION OF INFORMATION SUPPORT OF SMALL AND MEDIUM BUSINESS CARRIERS IN THE USA AND UKRAINE USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

Kichkina O.I.

PhD (Engineering), associate professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1077-5964>, e-mail: ki4kinaoi@ukr.net;

Kichkin O.V.

senior lecturer, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5283-5403>, e-mail: kichkin@ukr.net

The article is devoted to the digitalization of small and medium-sized businesses in the field of road freight transportation with a comparative analysis of the experience of the USA and Ukraine. The purpose of the article was to analyze and develop methodological recommendations for the application of modern information technologies and artificial

intelligence for the needs of medium and small businesses in road transportation, in particular refrigerated ones. The study draws parallels between the experience of the USA and Ukraine. A comparative analysis of existing digital platforms and transport management systems in the USA and Ukraine is presented. The advantages of modular digital architecture, which allows small companies to effectively integrate specialized services without significant costs, are substantiated. A step-by-step process for creating information support for the activities of a company that carries out refrigerated cargo transportation in the USA is presented. The tasks and methods for solving them at each stage are determined, indicating the results obtained. Special attention is paid to the implementation of artificial intelligence, in particular machine learning methods and neural networks, to solve the problem of low quality of scanned documents through intelligent text recognition, which minimizes manual labor. It is promising to use the capabilities of modern models of vehicles equipped with on-board computers, software and telematics tools, which allows providing transportation technology with operational information in real time. As a result, methodological recommendations have been developed for the development and implementation of information systems of modular digital architecture for small and medium-sized transportation businesses, based on the experience of the carrier company in the USA. Using the main trends of this approach to create information support for the activities of Ukrainian carriers can be the basis for overcoming the technological gap and increasing their competitiveness.

Keywords: information technology; business digitalization; refrigerated trucking; small and medium-sized businesses; artificial intelligence; machine learning; neural networks; modular digital architecture.

References

- [1] Gearing up for the Next Transformation: AI in the Trucking Industry: Driving the Next Transformation in Fleet Operations. Beyond trucks. [Online]. Available: <https://www.beyondtrucks.com/resources/white-papers/ai-for-the-trucking-industry>. Accessed on: 10.02.2026.
- [2] The Logistics Technology Gap for Small and Midsized Shippers. Transportation & Logistics Software. [Online]. Available: <https://transportmsand-logisticstms.com/2022/08/23/the-logistics-technology-gap-for-small-and-midsized-shippers/>. Accessed on: 10.02.2026.
- [3] R. Shalamov, "Strategies for the Implementation of Digital Dispatch Platforms in Small Trucking Companies," *The American Journal of Management and Economics Innovations*, vol. 7(07), pp. 25-32, 2025. doi: 10.37547/tajmei/Volume07Issue07-03.
- [4] S. Huzenko, Dydzhyalizatsiia perevezen: holovni vyklyky pry otsyfruvanni lohistyky (Digitalization of transportation: the main challenges in digitizing logistics). [Online]. Available: <https://mind.ua/openmind/20257544-didzhitalizaciya-perevezen-golovni-vikliki-pri-ocifruvanni-logistiki>. Accessed on: 12.02.2026. (Ukr.)
- [5] D. Gavrykov, "Mizhnarodnyi dosvid tsyfrovizatsii biznes-protsesiv na pidpriemstvakh transportu" ["International experience of digitalizing business processes in transport enterprises"], *Modeling the development of the economic systems*, vol. 4, pp. 92-98, 2025. doi: 10.31891/mdes/2025-18-9. (Ukr.)
- [6] R. Smith, "An Overview of the Tesseract OCR Engine," in *Proc. of the 9th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition*, Curitiba, Brazil, Sept. 23-26, 2007, pp. 629-633. doi: 10.1109/ICDAR.2007.4376991.
- [7] R. Smith, D. Antonova, and D.-S. Lee, "Adapting the tesseract open source OCR engine for multilingual OCR," in *Proc. of the Int. Workshop on Multilingual*
- OCR, Barcelona, Spain, July 25, 2009, pp. 1-8. doi: 10.1145/1577802.1577804.
- [8] O. O. Korostin, "Efektyvnist rozpoznavannia tekstu v avtomatyzatsii mizhnarodnykh morskikh perevezen za dopomohoiu shchuchnoho intelektu" ["Efficiency of text recognition in the automation of international maritime transport with the help of artificial intelligence"], *Tavriyskiy naukovy visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky – Taurida Scientific Herald. Series: Technical Sciences*, vol. 3, pp. 29-38, 2024. doi: 10.32782/tnv-tech.2024.3.4. (Ukr.)
- [9] K. Tkachenko, O. Zuienko, "Vykorystannia bahatosharovoi LSTM-neiromerezhi u protsesi rozpoznavannia drukovanykh tekstiv" ["Use of Multilayer LSTM Neural Network in the Process of Printed Texts Recognition"], *Tsyfrova platforma: informatsiini tekhnologii v sotsiokulturnii sferi – Digital Platform: Information Technologies in Sociocultural Sphere*, vol. 5(1), pp. 199-215, 2022. doi: 10.31866/2617-796X.5.1.2022.261305. (Ukr.)
- [10] Technology Guide for Truckers: How Small Fleets Are Using Digital Tools. RXO. [Online]. Available: <https://rxo.com/resources/carrier/5-carrier-steps/>. Accessed on: 14.01.2026.
- [11] Fleet Technology Trends Report. 2023. [Online]. Available: https://www.fleetmanagementweekly.com/wp-content/uploads/2023/11/VZC-2077702-2024-Fleet-Technology-Trends-R1_09292023.pdf. Accessed on: 14.01.2026.
- [12] Statystychni dani po haluzi avtomobilnoho transportu (Statistical data on the road transport industry). Ministry for Development of Communities and Territories of Ukraine. [Online]. Available: https://mtu.gov.ua/en/content/statystychni-dani-po-galuzi-avtomobilnoho-transportu.html?utm_source. Accessed on: 22.01.2026. (Ukr.)
- [13] Porivniannia rishen dlia upravlinnia dostavkoiu «ostannoii myli» (Comparison of last mile delivery management solutions). [Online]. Available:

https://trademaster.ua/articles/313959?utm_source.

Accessed on: 22.01.2026. (Ukr.)

- [14] O. V. Kichkin, O. O. Vodolazskyy, and O. I. Kichkina, "Metodyka udoskonalennia informatsiinoho zabezpechennia diialnosti avtopereviznyka na rynku Pivnichnoi Ameryky" ["Methodology for improving information support for the activities of a motor carrier in the North American market"], *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Scientific journals of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, № 4(234), pp. 111-115, 2017. (Ukr.)
- [15] O. V. Kichkin, O. I. Kichkina, and M. Vodolazskyy, "Informatsiine zabezpechennia biznesu avtomobilnykh vantazhnykh perevezen" ["Information support for the road freight transportation business"], in *Proc. of the IV Int. Sci.-Pract. Conf. «Transport: science and practice»*, Kyiv-Odesa, May 22, 2025, pp. 266-269. (Ukr.)
- [16] O. V. Kichkin, and O. I. Kichkina, "Nechitke modeliuvannia – osnova intelektualnoho upravlinnia temperaturoiu v refryzheratornykh avtotransportnykh zasobakh" ["Fuzzy modeling is the basis for intelligent temperature control in refrigerated vehicles"], *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Scientific journals of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, № 3(251), pp. 89-94, 2019. (Ukr.)
- [17] O. D. Sharapov, and A. V. Matviichuk, "Poshyrennia pomylky v zadachakh optymizatsii parametriv neuronnykh merezh" ["Error propagation in neural network parameter optimization problems"], *Modeliuvannia ta informatsiini systemy v ekonomitsi – Modeling and information systems in economics*, vol. 79, pp. 30–45, 2009. (Ukr.)

Стаття надійшла 24.02.2026

Стаття прийнята 10.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Кічка О.І., Кічкін О.В. Цифрова трансформація інформаційного забезпечення перевізників малого та середнього бізнесу США та України з використанням технологій штучного інтелекту. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 233–242. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359963>.

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

Редакція журналу «Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки» приймає до розгляду оригінальні наукові статті відповідно до тематики видання. Подання рукопису до редакції означає згоду авторів з редакційною політикою журналу, принципами наукової та академічної доброчесності, а також вимогами чинного законодавства України. Автори несуть повну відповідальність за зміст поданих матеріалів, достовірність наведених результатів, коректність цитувань і посилань.

Журнал забезпечує відкритий доступ до всіх опублікованих статей і випусків. Усі матеріали є вільно доступними для користувачів без обмежень. Статті публікуються на умовах ліцензії Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0), що дозволяє вільне використання, поширення та відтворення матеріалів за умови обов'язкового зазначення авторства та джерела публікації. Автори зберігають право розміщувати підготовлену до публікації версію статті в наукових репозитаріях з відкритим доступом, що сприяє ширшому розповсюдженню результатів досліджень та підвищенню їх наукової видимості.

Усі подані до журналу рукописи проходять обов'язкову перевірку на наявність текстових запозичень із використанням спеціалізованих програмних засобів. Матеріали, що містять ознаки плагіату, самоплагіату, фабрикації або фальсифікації даних, а також інші порушення принципів академічної доброчесності, до публікації не приймаються.

Журнал підтримує принципи відкритих дослідницьких даних та FAIR-підхід. Авторам рекомендується розміщувати дослідницькі дані, що лежать в основі публікацій, в інституційних, національних або міжнародних репозитаріях дослідницьких даних з присвоєнням DOI та зазначенням його в метаданих статті. У випадках, коли надання даних неможливе з етичних, правових або інших обґрунтованих причин, автори повинні зазначити це у заяві про доступність даних.

У разі подання матеріалів, що містять результати досліджень із залученням людей, тварин, їх біологічних матеріалів, персональних або конфіденційних даних та підпадають під дію відповідного законодавства України, автори зобов'язані надати підтвердження отримання обов'язкового висновку відповідної етичної комісії або іншого уповноваженого органу. Відсутність такого підтвердження є підставою для відхилення матеріалу.

Усі статті, подані до журналу, проходять обов'язкове наукове рецензування. У «Віснику Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки» застосовується процедура подвійного сліпого рецензування (double-blind peer review), за якої автори не поінформовані про особи рецензентів, а рецензенти – про особи авторів. Такий підхід спрямований на забезпечення об'єктивності, неупередженості та високого наукового рівня публікацій. Рецензування здійснюється незалежними фахівцями у відповідній галузі знань. За результатами рецензування стаття може бути рекомендована до публікації, повернена авторам на доопрацювання або відхилена. Остаточне рішення щодо публікації матеріалу ухвалюється редакційною колегією журналу.

Автори зобов'язані повідомляти редакцію про наявність або відсутність потенційного конфлікту інтересів, що може вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. До конфлікту інтересів можуть належати фінансові, професійні чи особисті взаємовідносини, пов'язані з тематикою дослідження. За відсутності конфлікту інтересів автори повинні зазначити про це у відповідній заяві в статті. Відповідальність за повноту та достовірність інформації щодо конфлікту інтересів покладається на авторів.

Автори зобов'язані прозоро повідомляти про будь-яке застосування інструментів штучного інтелекту під час підготовки рукопису. Використання інструментів штучного інтелекту допускається виключно як допоміжне та обмежується мовною і стилістичною редактурою, технічним форматуванням, створенням візуалізацій або ілюстративних матеріалів, а також попереднім статистичним аналізом даних. Неприпустимим є використання штучного інтелекту для створення наукових результатів, фабрикації чи фальсифікації даних, автоматичної генерації наукових текстів без належної перевірки та редагування, а також для обходу вимог академічної доброчесності. Штучний інтелект не може вважатися автором або співавтором статті, а вся відповідальність за зміст наукової праці покладається виключно на людських авторів. У разі використання інструментів штучного інтелекту це має бути зазначено у тексті статті або відповідній примітці.

Редакція залишає за собою право відхиляти матеріали, що не відповідають вимогам журналу, редакційній політиці або принципам наукової та академічної доброчесності.