

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Випуск 217

Харків 2026

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту публікуються результати фундаментальних і прикладних наукових досліджень, спрямовані на інноваційний розвиток транспортної галузі, промислових і будівельних технологій, а також повоєнне відновлення та модернізацію інфраструктури. Матеріали видання охоплюють передові технології експлуатації і логістики залізничного транспорту, питання надійності, діагностики та ремонту рухомого складу, сучасні методи геодезії та землеустрою, інновації у будівництві та цивільній інженерії, а також актуальні питання галузевого машинобудування.

Збірник створено як платформу для обміну передовим науковим досвідом, він призначений для науковців, інженерів, технічних фахівців, здобувачів вищої освіти всіх рівнів, діяльність яких належить до кластера «Промислові і будівельні технології, логістика, транспорт».

З електронною версією Збірника можна ознайомитися на веб-сторінках Збірника:
https://csw.kart.edu.ua/issue/archive
https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt/arhiv

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща)
https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=16665

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795

Суб'єкт у сфері друкованих медіа R30-06150, за рішенням № 948 Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення, протокол № 11 від 01 травня 2025 р.
Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 13 від 28 вересня 2026 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б» (наказ Міністерства освіти і науки України № 928 від 11 червня 2026 р.).

ISSN 1994-7852
Зареєстровано 2 червня 2007 р.
у ISSN International Centre 20. Rue Bachaumont, 75002 PAPIS, FRANCE

© Український державний університет залізничного транспорту, 2026.

Редакційна колегія

Головний редактор – **Ловська Альона Олександрівна**, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, Україна
Випусковий редактор – **Харін Руслан Олександрович**, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Члени редакційної колегії:

Бліхарський Зіновій Ярославович, д. т. н., професор, директор інституту будівництва, інфраструктури та безпеки життєдіяльності, Національний університет «Львівська політехніка», Україна

Горобченко Олександр Миколайович, д. т. н., професор, заступник директора Навчально-наукового Київського інституту залізничного транспорту, Національний транспортний університет, Україна

Курган Микола Борисович, д. т. н., професор, професор кафедри транспортної інфраструктури, Український державний університет науки і технологій, Україна

Огар Олександр Миколайович, д. т. н., професор, завідувач кафедри станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Панченко Владислав Вадимович, д. т. н., доцент, проректор з науково-педагогічної роботи, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Плахтій Олександр Андрійович, д. т. н., доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Плугін Андрій Аркадійович, д. т. н., професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Плугін Дмитро Артурович, д. т. н., професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Прохорченко Андрій Володимирович, д. т. н., професор, професор кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Руцінська Тереза, д. т. н., професор, завідувачка кафедри будівельної фізики та будівельних матеріалів, Західнопоморський технологічний університет у Щецині, Польща

Сужеделіте Вісокієнє Юрате, д. т. н., професор, завідувачка кафедри геодезії та кадастру, Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва

Угненко Євгенія Борисівна, д. т. н., професор, завідувачка кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Федориненко Дмитро Юрійович, д. т. н., професор, доцент кафедри аерокосмічної інженерії, Тохокуський державний дослідницький університет, Японія

Хуан Хаоцай, доктор філософії, професор, директор інституту океанічної інженерії та технологій, Чжецзянський університет, Китай

Шарий Григорій Іванович, д. т. н., професор, завідувач кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Україна

Штястняк Павол, доктор філософії, старший дослідник, заступник завідувача кафедри транспортних та вантажопідйомних машин, Жилінський університет, Словаччина

Михалків Сергій Васильович, к. т. н., доцент, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

ЗМІСТ

ПРОМИСЛОВІ І БУДІВЕЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЛОГІСТИКА, ТРАНСПОРТ (G11, G18, G19, J7)

Машинобудування (G11)

Панченко С. В., Ловська А. О., Плугін Д. А. Моделювання впливу стисливості робочої рідини на показники ефективності гідравлічних приводів робочого обладнання технологічних машин 7
MingWei Xu, XueFeng Wang, Voronin S., Afanasov H., Tryfonov T. Research on theory and methods of energy efficiency improvement for hydraulic systems of process machinery oriented to low-loss characteristics 19
Козар Л. М., Романович Є. В., Євтушенко А. В., Козар М. Л. Вібраційний стенд для дослідження процесу розвантаження напіввагонів 40
Широкий Ю. В., Семененко О. Д., Романов М. С. Підвищення працездатності деталей і різального інструменту шляхом лазерної модифікації поверхні та оптимізації адгезійної взаємодії матеріалів покриттів 52
Макар О. З., Говоруха І. В. Аналіз напружено-деформованого стану пружного робочого органу дискової борони для двокрокової моделі навантаження 70

Геодезія та землеустрій (G18)

Мамонов К. А., Харів В. В., Мамонов В. К. Геопросторовий моніторинг використання земель житлової та громадської забудови регіонів: концептуальні положення та особливості застосування 84

Будівництво та цивільна інженерія (G19)

Rukavishnykov P. V., Bugai V. S., Chaika Y. I., Burda Y. O., Marchenko S. O. Performance optimization of hybrid heating systems with combined heat sources and mechanical ventilation heat recovery 102
Підгорецький Ю. Ю., Трунцев Г. В. Особливості нормативного регулювання та проблематика створення об’єктів для укриття населення в Україні 120
Gvozdeckyi O., Pavlovskyi S., Tiutiunyk L., Panchuk O., Avakian K. Analysis of the Efficiency of District Heating Networks After Boiler House Modernization Under a Reduced Temperature Regime 137
Гудименко М. С., Вей Юй, Борзяк О. С. Біогенна сірчанокислотна корозія бетонних конструкцій каналізаційних мереж: алгоритм комплексної діагностики технічного стану 155
Буравченко В. С., Овчинніков О. О., Орленко М. О. Раціональні конструктивні рішення світлопрозорих огороджувальних конструкцій у системі інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури від вибухових навантажень 168

Залізничний транспорт (J7)

Геворкян Е. С., Нерубацький В. П. Особливості формування нанокомпозитів на основі синтезованого діоксиду цирконію під час гарячого пресування 181
Прохоров В. М., Пархоменко Л. А., Калашнікова Т. Ю., Кофанов О. В. Підвищення ефективності маршрутизації вагонопотоків шляхом урахування категорійності поїздів при розрахунку плану формування в умовах цифровізації 199
Zhuchenko O. S. Analysis of the total squared correlation for evaluating ensembles of unequal-energy complex signals in code-division multiple-access systems 210
Ломотько Д. В., Лючков Д. С., Ломотько М. Д., Донець С. М. Математичне моделювання функціонування вантажних фронтів залізничних під'їзних колій із використанням RAMS-підходу 221
Давиденко М. Г. Розрахунок швидкості обертання якоря колекторного двигуна постійного струму на базі параметричного подання його електричного кола 238
Сафронов О. М., Калабухін Ю. Є., Бабенко А. О. Комплексний аналіз експлуатаційних характеристик гальмових колодок пасажирських вагонів 250
Семененко Ю. О., Любарський Б. Г., Семененко О. І. Структура і методи розрахунку втрат електричної енергії в розподілених мережах зовнішнього електропостачання 268
Крашенінін О. С., Шапатіна О. О., Михалків С. В., Бондаренко К. С. Ухвалення рішень з організації складського господарства локомотивного депо в умовах обмеженої інформації 288
Зеленько Ю. В., Черкудінов В. Е. Оптимізація математичної моделі транспортного процесу перевезення нафтопродуктів в умовах воєнного стану 305
Сотник В. О., Самсонкін В. М. Масштабування методу спільного фізико-інтелектуального захисту на бортові системи локомотивів 316
Долгополов П. В., Кулешов В. В., Пелех П. Р. Удосконалення моделі технології перевезень групних вантажних поїздів на умовах ресурсозбереження 328
Кустов В. Ф., Єлізаренко А. О. Національні особливості радіочастотного поля залізниць України та вимоги до проєктування ЕМС систем СЦБ 337
Трубчанінова К. А., Запара В. М., Тарасов К. О., Сеник С. Г. Технологічні аспекти забезпечення інформаційної інтероперабельності автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» відповідно до вимог TEL TSI 361

МАШИНОБУДУВАННЯ (G11)

УДК 62-822:621.891

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СТИСЛИВОСТІ РОБОЧОЇ РІДИНИ НА ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРИВОДІВ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН

Доктори техн. наук С. В. Панченко, А. О. Ловська, Д. А. Плугін

MODELING THE INFLUENCE OF THE COMPRESSIBILITY OF THE WORKING FLUID ON THE EFFICIENCY INDICATORS OF HYDRAULIC ACTUATORS OF WORKING EQUIPMENT OF TECHNOLOGICAL MACHINES

Dr. Sc. (Tech.) S. Panchenko, Dr. Sc. (Tech.) A. Lovska, Dr. Sc. (Tech.) S. Plugin

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371311

Анотація. *Стаття присвячена математичному моделюванню системи гідравлічного керування робочим обладнанням технологічних машин на прикладі гідравлічного привода відвала бульдозера з урахуванням впливу стисливості робочої рідини. Запропонована математична модель гідравлічного привода для управління відвалом бульдозера, яка побудована із застосуванням класичних законів механіки та гідравліки, однак, на відміну від існуючих моделей, ураховує вплив стисливості робочої рідини на кінематику руху відвала, що є корисним для оцінювання ефективності бульдозерів для роботи за різних експлуатаційних станів робочої рідини. Отримано часткове рішення математичної моделі, яке встановлює закономірність впливу модуля об'ємної пружності робочої рідини на швидкість спрацьовування гідроциліндрів відвала. Проведено числовий аналіз запропонованої математичної моделі на прикладі гідравлічного привода відвала бульдозера CAT D9.*

Ключові слова: *технологічні машини, гідравлічний привод, робоча рідина, математична модель, робоче обладнання, кінематика руху, стисливість, модуль пружності, швидкодія, продуктивність.*

Abstract. *The article is devoted to the mathematical modeling of the hydraulic control system of the working equipment of technological machines, using the example of the hydraulic drive of the bulldozer blade, taking into account the influence of the compressibility of the working fluid. The article analyzes current scientific research in the field of increasing the efficiency and performance of power drives of technological machines in order to identify the degree of disclosure of the issue of the influence of variable parameters of the working fluid on the general indicators of the hydraulic drive as a single system. It is determined that the variable characteristics of the working fluid, such as viscosity, bulk modulus, compressibility, which in the vast majority of studies are considered as constant values, although they significantly affect the efficiency indicators of machines. A mathematical model of a hydraulic drive for controlling a bulldozer blade is proposed, which is built using the classical laws of mechanics and hydraulics, but unlike existing models, it takes into account*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Панченко С. В., Ловська А. О., Плугін, Д. А. 2026.

the influence of the compressibility of the working fluid on the kinematics of blade movement, which is useful for assessing the efficiency of bulldozers when operating under different operating conditions of the working fluid. To achieve the goal of the work, a partial solution of the mathematical model was obtained, which establishes the regularity of the influence of the bulk elasticity modulus of the working fluid on the speed of operation of the blade hydraulic cylinders. A numerical analysis of the proposed mathematical model was carried out using the example of the hydraulic drive of the blade of the CAT D9 bulldozer. The regularities of the influence of the compressibility of the working fluid on the speed of movement of the blade hydraulic cylinder rod were obtained, as well as the regularities of the change in the rod movement time depending on the bulk elasticity modulus of the fluid and different values of the rod stroke. The obtained patterns and numerical results allow predicting the efficiency indicators of cyclic technological machines, for example, their productivity by setting the cycle time, at different values of the fluid elasticity modulus, which is useful both at the stage of selecting hydraulic oil and in the operating conditions of changes in the compressibility of the oil over time.

Keywords: *technological machines, hydraulic drive, working fluid, mathematical model, working equipment, kinematics of motion, compressibility, modulus of elasticity, speed, productivity.*

Вступ. Основою ефективності мобільних технологічних машин, таких як будівельні та дорожні машини, колійна спеціальна техніка, машини для видобутку корисних копалин, є точність позиціонування, швидкість спрацьовування та високий коефіцієнт корисної дії системи гідравлічного та / або електрогідравлічного привода [1-3].

Головним показником ефективності технологічної машини є її продуктивність, яка залежить від чутливості та швидкості руху виконавчих робочих органів за діючих робочих навантажень. Ці параметри залежать від внутрішніх процесів, що протікають в окремих елементах силових гідравлічних приводів та обумовлюють динаміку їхньої роботи в цілому, а також загальний ККД привода, як функцію механічних, гідравлічних та об'ємних втрат. Для забезпечення належного рівня вказаних характеристик гідравлічних приводів актуальним завданням є підвищення якості моделювання процесів руху гідравлічних агрегатів, робочої рідини в гідравлічній системі, зміни її тиску, особливо на перехідних режимах у моменти перемикання напрямку потоку, дроселювання, виникнення надмірних навантажень на робочі органи, зі зношуванням деталей тертя.

За накопиченим досвідом моделювання та проєктування гідравлічних приводів, найбільш перспективними напрямами підвищення їхньої ефективності є [1-3, 9, 13, 14] створення енергоефективних гідравлічних схем із незалежним керуванням потоками та рекуперацією енергії, застосування штучного інтелекту для адаптивного керування та діагностики, розвиток електрогідравлічних систем, цифровізації та роботизації.

Досягнення високої ефективності гідравлічних приводів ґрунтовано на нових наукових уявленнях про внутрішні процеси. Якщо раніше базові параметри гідравлічного привода вважали сталими, то в останні 10-15 років сучасні моделі враховують зміни модуля пружності, коефіцієнта стисливості, в'язкості робочої рідини, коефіцієнта тертя, зношування деталей і внутрішніх витоків рідини. Тобто спостерігають суттєвий відхід від класичних детермінованих моделей до адаптивних нелінійних моделей, які враховують змінні перелічені фактори. Виходячи із загальних тенденцій розвитку моделювання гідравлічних приводів технологічних машин, можна стверджувати, що найбільш невивченими питаннями є необхідність урахування змінних параметрів робочої рідини, які раніше вважали сталими. До таких

параметрів слід віднести стисливість, в'язкість, мастильну здатність. Якщо ці параметри будуть ураховані в моделях гідравлічного привода, потрібно очікувати максимального підвищення точності керування робочими органами, що є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] проаналізовано існуючі моделі гідравлічних приводів, їхні переваги та недоліки, зроблено висновок про те, що точність руху робочих елементів екскаватора суттєво підвищена за одночасного врахування кінематики, стисливості робочої рідини, характеристик насосів, гідророзподільників, гідроциліндрів і зовнішнього навантаження. Ця робота є одним із початкових для введення уявлень про нелінійні параметри робочої рідини та їхній вплив на параметри привода, однак тут були лише запропоновані перспективи нового моделювання, а практичне значення роботи спрямоване на системний розрахунок параметрів руху екскаваторного обладнання. Найбільш цитована оглядова робота [2] присвячена розвитку електрогідравлічного керування в технологічних машинах. Наукова новизна цієї роботи полягає у формуванні концепції Programmable Hydraulic Control (PHC) – програмованого керування гідроприводами, за якого програмне забезпечення є головним елементом привода, на відміну від традиційних уявлень, тобто рекомендують застосовувати системний підхід щодо керування, хоча змінні параметри робочої рідини розглядали лише частково, а саме як змінну її жорсткість. Стаття [3], на відміну від попередньої роботи, присвячена моделюванню електрогідравлічного привода для синхронного керування декількома робочими рухами екскаваторів. Проаналізовано вплив нелінійності характеристик робочої рідини та зовнішніх навантажень на динаміку роботи одночасно працюючих гідроциліндрів. Для моделювання враховували зміну стисливості робочої рідини, навантаження на робочі органи, сили тертя в механізмах. Ця робота є першим узагальненням для моделювання руху елементів екскаваторів як одного цілого, з урахуванням перерозподілу потоків рідини в системі. Робота [4] присвячена аналізу та забезпеченню енергоефективності гідравлічних приводів мобільних машин на основі впровадження механізмів рекуперації енергії. Незважаючи на суттєвий внесок у науку в галузі рекуперації енергії в гідравлічних системах, у статті не розглянуто питання старіння та зміни властивостей робочої рідини та ущільнень, зношування деталей тертя відповідальних агрегатів. У статті [5] запропоновано новий підхід щодо математичного моделювання гідравлічних приводів, який базований на негладкому (nonsmooth) квазістатичному описі процесів у виконавчих механізмах. На відміну від класичних моделей, у яких математичний опис базований на нерозривних функціях, у цій роботі запропоновані власні моделі, які враховують перехідні процеси з розривами, такі як перемикання клапанів, початок руху механізмів із переходом від тертя спокою до тертя руху. Отримані авторами чисельні результати достатньо коректно описують вказані перехідні процеси, що підтверджено порівнянням із даними експериментів. Але, на жаль, у роботі розглянуто лише один елемент гідравлічного привода, без врахування системної взаємодії з іншими елементами. У статті [6] коротко оглянуто сучасні тенденції розвитку математичного моделювання гідравлічних приводів, до яких відносять використання цифрових двійників, методів машинного навчання та комплексних моделей для моніторингу технічного стану і прогнозування ефективності роботи екскаваторів. Недоліком цієї статті є відсутність урахування нелінійних характеристик робочої рідини і тертя в механізмах. У статті [7] запропоновано метод побудови динамічної моделі гідравлічного

екскаватора, призначеної для високоточного визначення сили взаємодії робочого органа із ґрунтом і маси вантажу без встановлення додаткових силових датчиків. У роботі приділено увагу динаміці механічної взаємодії та визначенню навантаження, однак для моделювання не враховано фактори зміни в'язкості та інших характеристик робочої рідини, хвильові процеси у трубопроводах, кавітацію, зношування, змінне тертя. Стаття [8] зосереджена на розгляді впливу структури гідравлічної схеми на динамічні характеристики привода маніпулятора. Основним результатом роботи є порівняльний аналіз динаміки декількох конструктивних схем механізму повороту маніпулятора. Для динамічного моделювання застосовували традиційний підхід, заснований на рівняннях нерозривності потоку, руху та витрат рідини, при цьому не враховували нелінійні характеристики робочої рідини та параметрів агрегатів гідропривода. Стаття [9] присвячена моделюванню гідравлічного привода роботизованих технологічних машин на основі застосування штучного інтелекту і машинного навчання. Отримані результати засновані на застосуванні в разі машинного навчання сталих характеристик робочої рідини та параметрів агрегатів, без врахування їхніх експлуатаційних змін, що є певним недоліком роботи. Стаття [10] розглядає методи комплексного зменшення енергоспоживання гібридних гідравлічних приводів не лише за рахунок рекуперації енергії, але і з урахуванням перерозподілу потоків рідини з незалежним їх керуванням, застосуванням алгоритмів оптимізації та цифрових технологій керування. Основними обмеженнями роботи є недостатня увага до процесів зміни характеристик робочої рідини та параметрів обладнання внаслідок зношування. У роботі [11] обґрунтовано перспективність застосування електромеханогідравлічних приводів будівельних машин як приводів нового покоління. Стаття є оглядовою, у ній порівняно існуючі приводи будівельних машин, зосереджено увагу на перспективності розвитку електромеханогідравлічних приводів, які призначені для підвищення енергоефективності та продуктивності машин; у ній не розглянуто питання прогнозування технічного стану, обслуговування запропонованих систем, впливу змінних параметрів робочої рідини на їхні працездатність і ефективність. У роботі [12] досліджено сучасні методи електронного керування гідравлічними екскаваторами та виконано порівняльний аналіз традиційних алгоритмів керування регульованими аксіально-поршневими насосами. Запропонована узагальнена математична модель для опису головних параметрів керування подачею регульованого насоса за рахунок переходу від механічного до електронного керування. Незважаючи на високу цінність роботи, залишилися не врахованими види тертя і мащення, змінні властивості робочої рідини, кавітаційні явища, хвильові явища в трубопроводах. Стаття [13] присвячена розробленню системи автономного керування гідравлічним екскаватором за принципами високоточного позиціонування робочого обладнання для виконання земляних робіт. Урахована нелінійність робочих навантажень, однак властивості рідини, кавітаційні та хвильові явища, змінні параметри агрегатів зі зношуванням, зміна сили тертя і види мащення також не були враховані. Стаття [14] присвячена розвитку адаптивного прогнозного керування гідравлічних приводів мобільних машин на основі застосування штучного інтелекту і машинного навчання, метою якого є забезпечення сталої швидкості гідромоторів у широкому діапазоні робочих навантажень. Головною цінністю роботи, на відміну від попередніх, є впровадження адаптації параметрів гідравлічної системи, зміна яких пов'язана з тертям і зношуванням. Недоліками цієї роботи також є недостатнє врахування зміни характеристик робочої рідини. Стаття [15] є

однією з перших вітчизняних робіт, спрямована на оптимізацію робочого циклу кар'єрних екскаваторів за рахунок цифрового керування процесом копання та впровадження систем підтримки оператора. Найбільш детально в роботі проаналізовано питання оптимізації технологічного процесу, однак для розроблення системи керування майже не розглянуто нелінійні закономірності зміни параметрів агрегатів гідравлічного привода та характеристик робочої рідини, які з проведенням математичного моделювання залишаються сталими.

Проведений огляд наукових робіт за останні 10 років у галузі підвищення ефективності гідравлічних приводів мобільних машин висвітлив такі головні напрями їхнього розвитку: підвищення точності руху виконавчих елементів за рахунок покращення якості керування; розроблення адаптованих математичних моделей і алгоритмів керування процесами на основі використання штучного інтелекту і машинного навчання; прогнозування та оптимізація параметрів гідравлічних приводів і робочих рідин у процесі експлуатації; у моделюванні – перехід від поагрегатного схемного моделювання до комплексного моделювання гідравлічного привода як єдиної системи взаємопов'язаних елементів. Незважаючи на велику кількість проаналізованих робіт, узагальненим їх обмеженням є недостатнє врахування змінних характеристик робочої рідини, таких як в'язкість, модуль об'ємної пружності, стисливість, які в переважній більшості досліджень розглянуті як сталі величини, хоча можуть сильно впливати на показники ефективності технологічних машин.

Мета дослідження. Розроблення і аналіз математичної моделі для опису впливу змінної стисливості робочої рідини на параметри руху робочого гідравлічного обладнання будівельних машин на прикладі системи управління положенням відвала бульдозера.

Розроблення математичної моделі. Математична модель керування гідроциліндром відвала бульдозера базована на класичних рівняннях нерозривності потоку, витрат рідини та руху. Однак для врахування впливу змінної стисливості рідини ми пропонуємо уточнити класичні моделі з урахуванням нелінійної зміни тиску рідини та коефіцієнта стисливості. Спрощена розрахункова гідравлічна схема управління відвалом бульдозера наведена на рис. 1.

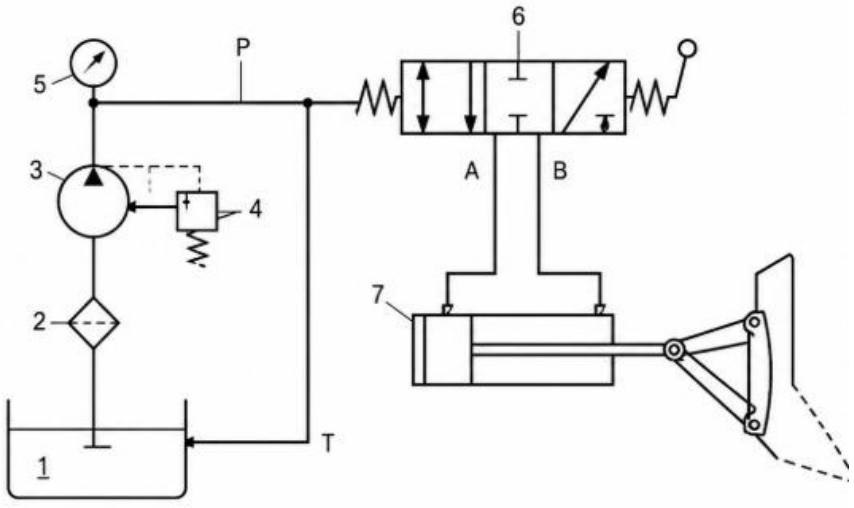


Рис. 1. Спрощена розрахункова гідравлічна схема управління відвалом бульдозера:
1 – гідробак; 2 – всмоктувальний фільтр; 3 – насос; 4 – запобіжний клапан; 5 – манометр; 6 – гідророзподільник; 7 – гідроциліндр керування відвалом; A, B – робочі гідролінії; P – напірна магістраль; H – зливна магістраль

Для розроблення математичної моделі прийнято такі припущення:

– робоча рідина однорідна;

– температура рідини є сталою;

– трубопроводи абсолютно жорсткі;

– гідроциліндр герметичний;

– інерція рідини в магістралях не врахована;

– опір розподільника описаний витратною характеристикою дроселя;

– коефіцієнт витрат є сталим.

Розглядаємо залежності для кожного елемента системи окремо.

Подачу насоса визначають за формулою

$$Q_{\text{н}} = D_{\text{н}}\omega - \Delta Q_{\text{ут}}, \qquad (1)$$

або

$$Q_{\text{н}} = D_{\text{н}}\omega - K_{\text{ут}}p_{\text{н}} \ , \qquad (2)$$

де $Q_{\text{Н}}$ – подача насоса;

$D_{\text{Н}}$ – робочий об'єм;

ω – кутова частота обертання вала;

$\Delta Q_{\text{УТ}}$ – внутрішні витоки;

$K_{\text{УТ}}$ – коефіцієнт витрат;

$p_{\text{Н}}$ – тиск у напірній магістралі.

Із відкриттям золотника розподільника витрати рідини визначають за формулою витоку крізь щілину

$$Q = C_d b x_з \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \ , \qquad (3)$$

де C_d – коефіцієнт витрат;

ρ – густина рідини;

b – ширина вікна;

x – хід золотника.

Основним рівнянням гідропривода є рівняння нерозривності, або закон збереження маси. Для поршневої порожнини воно має вигляд

$$Q_A = A_p\dot{x} + Q_{\text{сж}} + Q_{\text{ут}} \ , \qquad (4)$$

а для штокової порожнини

$$Q_B = A_{\text{ш}}\dot{x} + Q_{\text{сж}B} + Q_{\text{ут}} \ , \qquad (5)$$

де $A_{\text{р}}$ – площа поршня;

$A_{\text{ш}}$ – площа кільця між поршнем і штоком.

Урахуємо вплив стисливості робочої рідини, яка залежить від властивостей самої рідини і тиску і визначена модулем об'ємної пружності:

$$\beta = -V\frac{dp}{dV} \ . \qquad (6)$$

Урахуємо модуль об'ємної пружності рідини в рівняннях нерозривності (4) і (5), отримаємо для поршневої порожнини

$$\frac{dp_A}{dt} = \frac{\beta}{V_A}\left(Q_A - A_p\dot{x} - K_l(p_A - p_B)\right) \ , \qquad (7)$$

та для штокової порожнини

$$\frac{dp_B}{dt} = \frac{\beta}{V_B}\left(-A_{\text{ш}}\dot{x} - Q_B - K_l(p_B - p_A)\right) \ , \qquad (8)$$

де K_l – коефіцієнт внутрішніх витоків;

V_A, V_B – об'єми робочих камер, які змінюються залежно від руху штока.

Запишемо рівняння руху відвала, ураховуючи, що на шток діє різниця гідравлічних сил у поршневій і штоковій камерах:

$$m\ddot{x} = A_p p_A - A_{\text{ш}} p_B - F_c - F_{\text{тр}}, \tag{9}$$

або

$$m\ddot{x} = A_p p_A - A_{\text{ш}} p_B - B\dot{x} - F_c \quad , \tag{10}$$

де m – приведена маса відвала;

F_C – опір ґрунту;

$F_{ТР}$ – сила тертя в гідроциліндрі;

B – коефіцієнт в'язкого опору за рідинного мащення.

Результуюча математична модель гідропривода відвала має вигляд системи рівнянь

$$\begin{cases} Q_{\text{н}} = D_{\text{н}}\omega - K_{\text{ут}} p_{\text{н}} \\ Q_A = C_d b x_{\text{з}} \sqrt{\dfrac{2(p_{\text{н}} - p_A)}{\rho}} \\ Q_B = C_d b x_{\text{з}} \sqrt{\dfrac{2(p_B - p_t)}{\rho}} \\ \dfrac{dp_A}{dt} = \dfrac{\beta}{V_A}\left(Q_A - A_p\dot{x} - K_l(p_A - p_B)\right) \\ \dfrac{dp_B}{dt} = \dfrac{\beta}{V_B}\left(-A_{\text{ш}}\dot{x} - Q_B - K_l(p_B - p_A)\right) \\ m\ddot{x} = A_p p_A - A_{\text{ш}} p_B - B\dot{x} - F_c \end{cases} . \tag{11}$$

Отримана математична модель побудована із застосуванням класичних законів механіки та гідравліки, однак, на відміну від існуючих моделей, вона враховує вплив стисливості робочої рідини на кінематику руху відвала, що буде корисним для оцінювання ефективності бульдозерів у разі роботи за різних експлуатаційних станів робочої рідини.

Частковий розв'язок математичної моделі та його аналіз. Для аналізу впливу стисливості робочої рідини на кінематику руху відвала отримаємо частковий розв'язок рівняння руху з моделі (11) за об'ємним модулем пружності рідини. Якщо врахувати перехідний процес і знехтувати інертністю відвала ($m \approx 0$), тоді система рівнянь зведена до диференціального рівняння першого порядку

$$B\ddot{x} + \left(K + \frac{\beta A^2}{V}\right)\dot{x} = \frac{\beta AQ}{V}. \quad (12)$$

Для початкових умов $x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0,$ розв'язок рівняння (12) буде мати вигляд

$$x(t) = \frac{\beta AQ}{KV + \beta A^2}\left[t - \tau\left(1 - e^{-t/\tau}\right)\right], \quad (13)$$

у якому стала часу дорівнює

$$\tau = \frac{BV}{KV + \beta A^2}. \quad (14)$$

Поєднаємо залежності (13) і (14), отримаємо кінцеве рівняння руху відвала залежно від модуля об'ємної пружності робочої рідини:

$$x(t) = \frac{\beta AQ}{KV + \beta A^2}\left[t - \frac{BV}{KV + \beta A^2}\left(1 - e^{-\frac{(KV+\beta A^2)t}{BV}}\right)\right]. \quad (15)$$

Рівняння (15) вказує на таку важливу закономірність: із зростанням модуля об'ємної пружності робочої рідини β зростає швидкість переміщення штока, зменшується стала часу τ, тобто швидкість гідравлічного привода відвала зростає, що призводить до зменшення часу циклу бульдозера для копання ґрунту, як наслідок, зростає його продуктивність.

Проведемо розрахунки кінематичних параметрів руху штока гідроциліндрів керування відвалом бульдозера CAT D9 за отриманою залежністю. Маємо такі вихідні дані для розрахунку:

– кількість циліндрів - 2;

– діаметр поршня D = 140 мм;

– площа поршня A = 0,0154 м^2;

– витрата насоса на один циліндр Q = 1,67×10^{-3} м^3/с (≈100 л/хв);

– робочий об'єм поршневої порожнини V=6,5×10^{-3} м^3;

– коефіцієнт в'язкого опору B = 2,5×10^5 Нс/м;

– еквівалентна жорсткість навантаження K = 3,5×10^6 Н/м;

– модуль об'ємної пружності робочої рідини β = 1,0…2,0 ГПа;

– час аналізу t = 2 с.

Графічні результати розрахунку наведені на рис. 2, 3. Отримані результати підтверджують закономірність впливу стисливості робочої рідини (гідравлічної оливи) на швидкість спрацьовування гідравлічного привода управління відвалом бульдозера. Наприклад, за рис. 2, швидкість руху поршня на початковому етапі руху нелінійно змінюється, тобто поршень рухається з прискоренням, і з досягненням певного часу починається рівномірний рух. При цьому мінімальної швидкості рівномірного руху 0,092 м/с досягають за модуля об'ємної пружності робочої рідини 1 ГПа, а максимальної швидкості 0,198 м/с – за модуля пружності 2 ГПа. Тобто встановлено збільшення швидкості більш ніж у два рази.

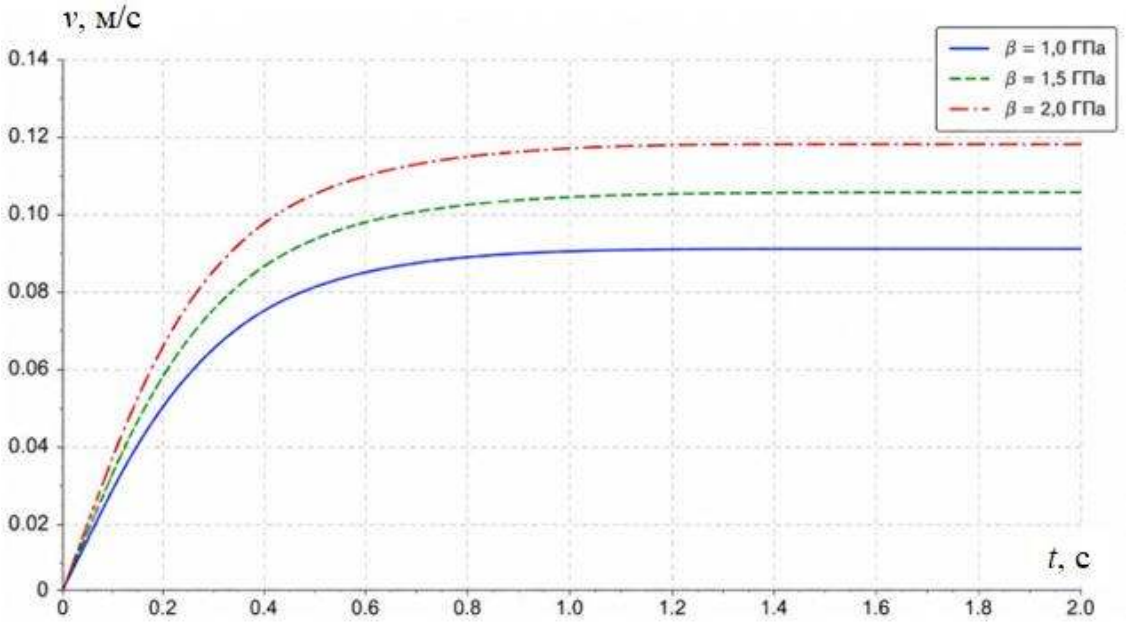


Рис. 2. Зміна швидкості штока в часі для різних значень об'ємного модуля пружності робочої рідини

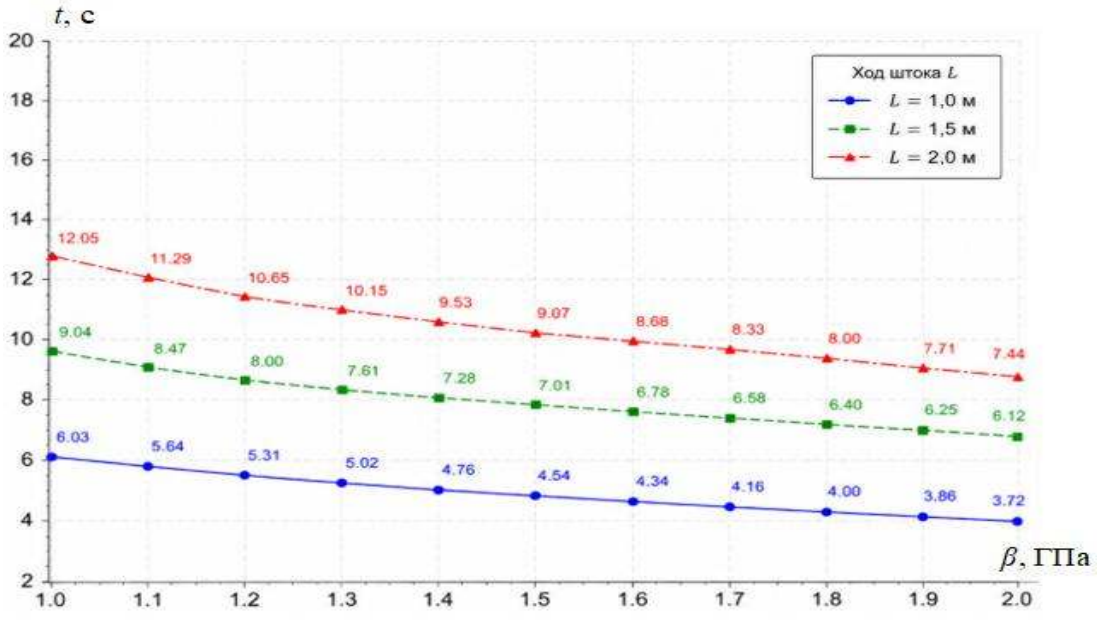


Рис. 3. Зміна часу підіймання відвала залежно від модуля об'ємної пружності робочої рідини та ходу штока

На рис. 3 наведені закономірності впливу модуля об'ємної пружності робочої рідини на час підіймання відвала для різних значень ходу штока. Ці дані свідчать про суттєвий вплив стисливості рідини на техніко-економічні показники бульдозера, оскільки цей час є складовою загального часу циклу роботи машини. Встановлено, що час підіймання відвала нелінійно та обернено залежить від модуля пружності

рідини. Наприклад, із ходом штока 2 м максимальний час складає 12,05 с за модуля пружності 1 ГПа, а мінімальний час складає 7,44 с за модуля пружності 2 ГПа, що на 38 % менше. Отже, отримана математична модель підтверджує суттєвий вплив стисливості робочої рідини на показники ефективності мобільних технологічних машин.

Висновки

1. Узагальненим обмеженням існуючих наукових досліджень у галузі управління приводами робочого обладнання технологічних машин є недостатнє врахування змінних характеристик робочої рідини, таких як в'язкість, модуль об'ємної пружності, стисливість, які в переважній більшості досліджень розглянуто як сталі величини, хоча суттєво впливають на показники ефективності машин.

2. Запропонована математична модель для опису параметрів руху відвала бульдозера враховує всі основні гідравлічні та геометричні параметри насоса, гідроциліндра, гідророзподільника, а також, на відміну від існуючих моделей, ураховує вплив стисливості робочої рідини на кінематику руху відвала, що є корисним для оцінювання ефективності бульдозерів у разі роботи за різних експлуатаційних станів робочої рідини.

3. Отримано закономірності впливу модуля об'ємної пружності робочої рідини на швидкість руху штока гідроциліндра і час його спрацьовування на встановленому ході. Підтверджено зростання швидкодії гідравлічного привода зі зростанням модуля пружності робочої рідини. Ці дані свідчать про можливість підвищення продуктивності технологічних машин циклічної дії за рахунок підбору робочих рідин із максимальним модулем пружності або підтримки модуля пружності на максимальному початковому рівні в експлуатаційних умовах.

Список використаних джерел

1. Xu, J., & Yoon, H.-S. (2016). A Review on Mechanical and Hydraulic System Modeling of Excavator Manipulator System. *Journal of Construction Engineering*, Vol. 2016, Article ID 9409370, 11. DOI: 10.1155/2016/9409370

2. Xu, B., Ding, R., Zhang, J., & Cheng, M. (2018). Programmable Hydraulic Control Technique in Construction Machinery: Status, Challenges and Countermeasures. *Automation in Construction*, 95, 172–192. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.001

3. Xu, B., & Cheng, M. (2018). Motion Control of Multi-Actuator Hydraulic Systems for Mobile Machineries: Recent Advancements and Future Trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 151–166. (Огляд розвитку електрогідравлічних систем керування мобільних машин). DOI: 10.1007/s11465-018-0470-5

4. Do, T. C., Dang, T. D., Dinh, T. Q., & Ahn, K. K. (2021). Developments in Energy Regeneration Technologies for Hydraulic Excavators: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111076. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111076

5. Kikuuwe, R., Okada, T., Yoshihara, H., Doi, T., Nanjo, T., & Yamashita, K. (2021). Nonsmooth Quasistatic Modeling of Hydraulic Actuators. *arXiv*, 29. (Модель квазістатичної роботи гідроприводів із незалежним дозуванням потоку). DOI: 10.48550/arXiv.2102.11381

6. Badawi, S. I., & Mostafa, A. A (2024). Survey of Modeling Mechanical and Hydraulic Systems in Excavator Manipulators. *International Journal of Civil Engineering and Construction*, 3(1), 25–27.

7. Werner, L., Eyschen, P., Costello, S., Micarelli, P., & Hutter, M. (2025). Calibrated dynamic modeling for force and payload estimation in hydraulic machinery. *Construction Robotics*, 9, 2(26), 15. (Динамічне моделювання гідравлічних машин для оцінювання сил і навантаження). DOI: 10.1007/s41693-025-00169-7

8. Петров, О. В., Коломієць, В. С., Мельник, С. В. (2025). Аналіз ефективності гідравлічних схем механізму повороту машини маніпуляторного типу за характеристиками швидкодії та навантаженості виконавчих елементів. *Вісник машинобудування та транспорту,* 22(2), 51–59. DOI: 10.31649/2413-4503-2025-22-2-51-59

9. Lee, M., Kim, H., Kim, J. T., Park, S., Lee, J. H., Cho, J., & Hwangbo, J. (2025). Learning Quadrupedal Locomotion for a Heavy Hydraulic Robot Using an Actuator Model. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 10(12), 12421–12428. DOI: 10.1109/LRA.2025.3623024

10. Nguyen, T. H. and all. (2026). Energy Consumption Reduction Technologies in Hybrid Hydraulic Construction Machine: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 230. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116650

11. Wei, X., Chen, Q., Ren, H., Lin, T., & Yao, Z. (2026). Development of High-Power Energy-Saving Linear Drive Devices for Construction Machinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 231, 116727. DOI: 10.1016/j.rser.2026.116727

12. Wang, C. (2026). Integrated Electronic Control of Electro-Hydraulic Excavators. *Journal of Engineering and Applied Science*, 73, 157. https://doi.org/10.1186/s44147-026-01023-5

13. Werner, L., Eyschen, P., Costello, S., Cramariuc, A., & Hutter, M. (2026). High Precision Hydraulic Excavator Control for Heavy-Duty Grading. *arXiv*, 12. (Математичні моделі та високоточне керування екскаваторами). DOI: 10.48550/arXiv.2605.09465

14. Singh, S., Kumar, A., & Do, K. D. (2026). Adaptive Model Predictive Control for Constant Speed Regulation of an Accumulator-Assisted Hydromotor Drive under Varying Load Conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. DOI: 10.1177/09576509261417453

15. Сергієнко, С. А., Онищенко, А. О. (2026). Сучасні підходи до оптимізації робочого циклу кар'єрних екскаваторів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, 53,(2), 56–64. DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359913

References

1. Xu, J., & Yoon, H.-S. (2016). A Review on Mechanical and Hydraulic System Modeling of Excavator Manipulator System. *Journal of Construction Engineering*, Vol. 2016, Article ID 9409370, 11. DOI: 10.1155/2016/9409370

2. Xu, B., Ding, R., Zhang, J., & Cheng, M. (2018). Programmable Hydraulic Control Technique in Construction Machinery: Status, Challenges and Countermeasures. *Automation in Construction*, 95, 172–192. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.001

3. Xu, B., & Cheng, M. (2018). Motion Control of Multi-Actuator Hydraulic Systems for Mobile Machineries: Recent Advancements and Future Trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 151–166. DOI: 10.1007/s11465-018-0470-5.

4. Do, T. C., Dang, T. D., Dinh, T. Q., & Ahn, K. K. (2021). Developments in Energy Regeneration Technologies for Hydraulic Excavators: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111076. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111076

5. Kikuuwe, R., Okada, T., Yoshihara, H., Doi, T., Nanjo, T., & Yamashita, K. (2021). Nonsmooth Quasistatic Modeling of Hydraulic Actuators. *arXiv*, 29. DOI: 10.48550/arXiv.2102.11381

6. Badawi, S. I., & Mostafa, A. A (2024). Survey of Modeling Mechanical and Hydraulic Systems in Excavator Manipulators. *International Journal of Civil Engineering and Construction*, 3(1), 25–27.

7. Werner, L., Eyschen, P., Costello, S., Micarelli, P., & Hutter, M. (2025). Calibrated dynamic modeling for force and payload estimation in hydraulic machinery. *Construction Robotics*, 9, 2(26), 15. DOI: 10.1007/s41693-025-00169-7

8. Petrov, O. V., Kolomiiets, V. S., & Melnyk, S. V. (2025). Analiz efektyvnosti hidravlichnykh skhem mekhanizmu povorotu mashyny manipulyatornoho typu za kharakterystykamy shvydkodiyi ta navantazhenosti vykonavchykh elementiv [Analysis of the efficiency of hydraulic circuits for the slewing mechanism of a manipulator-type machine based on the response speed and load characteristics of actuating elements]. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 22(2), 51–59. DOI: 10.31649/2413-4503-2025-22-2-51-59 [in Ukrainian].

9. Lee, M., Kim, H., Kim, J. T., Park, S., Lee, J. H., Cho, J., & Hwangbo, J. (2025). Learning Quadrupedal Locomotion for a Heavy Hydraulic Robot Using an Actuator Model. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 10(12), 12421–12428. DOI: 10.1109/LRA.2025.3623024

10. Nguyen, T. H. and all. (2026). Energy Consumption Reduction Technologies in Hybrid Hydraulic Construction Machine: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 230. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116650

11. Wei, X., Chen, Q., Ren, H., Lin, T., & Yao, Z. (2026). Development of High-Power Energy-Saving Linear Drive Devices for Construction Machinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 231, 116727. DOI: 10.1016/j.rser.2026.116727

12. Wang, C. (2026). Integrated Electronic Control of Electro-Hydraulic Excavators. *Journal of Engineering and Applied Science*, 73, 157. https://doi.org/10.1186/s44147-026-01023-5

13. Werner, L., Eyschen, P., Costello, S., Cramariuc, A., & Hutter, M. (2026). High Precision Hydraulic Excavator Control for Heavy-Duty Grading. *arXiv*, 12. DOI: 10.48550/arXiv.2605.09465

14. Singh, S., Kumar, A., & Do, K. D. (2026). Adaptive Model Predictive Control for Constant Speed Regulation of an Accumulator-Assisted Hydromotor Drive under Varying Load Conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. DOI: 10.1177/09576509261417453

15. Serhiienko, S. A., & Onyshchenko, A. O. (2026). Suchasni pidkhody do optymizatsiyi robochoho tsyklu kar'yernykh ekskavatoriv [Modern approaches to optimizing the operating cycle of mining excavators]. *Bulletin of Pryazovskyi State Technical University. Series: Technical Sciences*, 53(2), 56–64. DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359913 [in Ukrainian].

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, в. о. ректора Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-2833-4347. Тел.: +38 (057) 730-10-00. E-mail: info@kart.edu.ua.
Ловська Альона Олександрівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8604-1764. Тел.: +38 (066) 338-19-46. E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com.
Плугін Дмитро Артурович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4359-4369. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: plugin.da@kart.edu.ua.

Panchenko Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Acting rector, the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-2833-4347. Tel.: +38 (057) 730-10-00. E-mail: info@kart.edu.ua.
Lovska Alyona, Dr. Sc. (Tech.), professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8604-1764. Tel.: +38 (066) 338-19-46. E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com.
Plugin Dmytro, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4359-4369. Tel.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: plugin.da@kart.edu.ua.

Дата надходження статті: 04.07.2026 р. Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 621.225

RESEARCH ON THEORY AND METHODS OF ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR HYDRAULIC SYSTEMS OF PROCESS MACHINERY ORIENTED TO LOW-LOSS CHARACTERISTICS

**Postgraduate student Xu MingWei, postgraduate student Wang XueFeng,
Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech.) H. Afanasov,
postgraduate student T. Tryfonov**

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕОРІЙ І МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН З ОРІЄНТАЦІЄЮ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗЬКИХ ВТРАТ

**Аспіранти Щю Мінвей, Ван Сюефен, д-р техн. наук С. В. Воронін,
канд. техн. наук Г. М. Афанасов, асп. Т. В. Трифонов**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371321

Abstract. *Hydraulic systems are widely employed in process machinery such as presses, injection molding machines, rolling mills, and mining equipment due to their high power density, rapid dynamic response, precise force and speed regulation, and excellent adaptability to severe working environments. Nevertheless, conventional hydraulic systems for process machinery commonly suffer from excessive energy consumption, substantial power dissipation, and relatively low energy efficiency, which have become critical bottlenecks restricting the sustainable and low-carbon development of industrial equipment. Guided by a systematic low-loss design philosophy, this paper presents a comprehensive theoretical and methodological investigation into energy efficiency enhancement by integrating fluid mechanics, modern control theory, and intelligent optimization algorithms. The fundamental working principles and inherent energy consumption characteristics of typical hydraulic systems are systematically analyzed, aiming to accurately identify the primary loss sources and reveal the coupling mechanisms among different components and hydraulic circuits. A full-process low-loss dynamic mathematical model, encompassing key hydraulic components and pipeline networks, is established, and its accuracy, reliability, and practical applicability are thoroughly validated through parameter identification, numerical simulation, and experimental testing. On this basis, an integrated energy consumption optimization control strategy, combining high-fidelity dynamic modeling with an improved genetic algorithm, is proposed to achieve adaptive and real-time dynamic adjustment of system operating parameters. Simulation and experimental results demonstrate that the developed control strategy can effectively mitigate volumetric loss, throttling loss, and pipeline pressure loss under diverse working conditions. Under typical operational scenarios, the overall energy efficiency of the hydraulic system is improved by 18–25 %, while simultaneously enhancing dynamic performance. The research outcomes provide solid theoretical foundations and practical engineering guidance for the low-loss design, performance optimization, and energy-saving retrofitting of hydraulic systems for process machinery.*

Keywords: *technological machines, hydraulic system, low loss, energy efficiency improvement, dynamic modeling, optimal control, simulation analysis.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Щю Мінвей, Ван Сюефен, Воронін С. В.,
Афанасов Г. М., Трифонов Т. В., 2026.

Анотація. *Гідравлічні системи широко застосовувані в технологічному обладнанні, такому як преси, ін'єкційно-формувальні машини, прокатні стани та гірничодобувне обладнання, завдяки високій питомій потужності, швидкій динамічній реакції, точному регулюванню сили та швидкості, а також чудовій адаптивності до складних умов експлуатації. Проте для традиційних гідравлічних систем технологічного обладнання характерні надмірне енергоспоживання, значні втрати потужності та відносно низька енергоефективність, що стало основною перешкодою для сталого та низьковуглецевого розвитку промислового обладнання.*

Керуючись системною концепцією проєктування з мінімальними втратами, у статті проведено комплексне теоретичне та методичне дослідження підвищення енергоефективності на основі поєднання гідродинаміки, сучасної теорії керування та інтелектуальних оптимізаційних алгоритмів. Систематично проаналізовано основні принципи роботи і внутрішні особливості енергоспоживання типових гідравлічних систем із метою точного визначення основних джерел втрат і розкриття механізмів взаємодії між окремими елементами та гідравлічними контурами.

Побудовано повноциклову динамічну математичну модель із мінімальними втратами, що враховує основні гідравлічні компоненти і трубопровідні мережі; її точність, надійність і практичну придатність повністю підтверджено ідентифікацією параметрів, чисельним моделюванням та експериментальними випробуваннями. На цій основі запропоновано комплексну стратегію оптимізаційного керування енергоспоживанням, яка поєднує високоточне динамічне моделювання та вдосконалений генетичний алгоритм для забезпечення адаптивного оперативного динамічного корегування робочих параметрів системи.

Результати моделювання та експериментів підтверджують, що розроблена стратегія керування ефективно зменшує об'ємні втрати, дросельні втрати і втрати тиску в трубопроводах за різних режимів роботи. У типових експлуатаційних умовах загальна енергоефективність гідравлічної системи зростає на 18–25 %, водночас покращуючи її динамічні характеристики. Отримані результати дослідження створюють надійну теоретичну базу та практичні інженерні рекомендації для проєктування гідравлічних систем технологічного обладнання з мінімальними втратами, оптимізації їхніх характеристик і модернізації з метою енергозбереження.

Ключові слова: *технологічні машини, гідравлічна система, низькі втрати, підвищення енергоефективності, динамічне моделювання, оптимальне керування, симуляційний аналіз.*

1. Introduction

1.1. Research Background and Significance

Hydraulic transmission technology has long been recognized as one of the most reliable and efficient power transmission solutions for heavy-duty process machinery. Owing to its outstanding advantages including high power-to-weight ratio, smooth motion transmission, accurate positioning capability, and strong resistance to shock and vibration, hydraulic systems have become the core power and control unit in a wide range of industrial equipment, such as metal forming presses, plastic injection molding machines, steel rolling mills, and mining excavators. In these applications, hydraulic systems undertake the critical functions of power output, precise motion execution, and multi-axis coordinated control, directly determining the operational performance, production efficiency, and energy consumption level of the entire equipment [1, 2, 5].

Despite their widespread application and superior mechanical performance, traditional hydraulic systems for process machinery inherently exhibit low energy efficiency. Industrial field measurements indicate that the

average energy efficiency of conventional hydraulic systems typically ranges only from 45 % to 60 %, which is significantly lower than that of advanced electric drive systems. A large proportion of the input electrical energy is wasted in the form of internal leakage, mechanical friction, flow throttling, and pipeline pressure drop, resulting in excessive energy consumption, increased operating costs, and aggravated environmental impact. Against the backdrop of intensifying global energy shortages, rising energy prices, and the global pursuit of carbon neutrality and sustainable development goals, industrial sectors have imposed increasingly stringent requirements for energy conservation, emission reduction, and green manufacturing. As a typical representative of high-energy-consumption equipment, improving the energy efficiency of hydraulic systems for process machinery has become an urgent and important research topic in the field of fluid power transmission and control [3, 4].

Conducting in-depth research on the theories and methods of energy efficiency improvement for hydraulic systems under low-loss orientation not only helps to reduce energy consumption and operating costs, but also contributes to reducing carbon emissions and environmental pollution, thereby promoting the green transformation and sustainable development of the process machinery industry. Furthermore, reducing system losses can effectively lower the operating temperature, decrease component wear, extend the service life of key parts, and improve the operational stability and reliability of the hydraulic system, which is of great practical significance for reducing equipment maintenance costs and enhancing overall industrial competitiveness. Therefore, this research holds important theoretical value and broad engineering application prospects [6, 11, 13, 15].

1.2. Research Status at Home and Abroad

In recent decades, scholars and engineers worldwide have conducted extensive and in-depth research on energy consumption optimization, low-loss design, and performance improvement of hydraulic systems, forming a multidimensional research system mainly focusing on component optimization, hydraulic circuit innovation, and control strategy design, which provides a solid theoretical basis and technical reference for the present study.

Internationally, developed industrial countries have long attached great importance to the research and development of high-efficiency, low-loss hydraulic components and system integration technology. A large number of energy-saving hydraulic solutions have been proposed and applied in engineering practice, such as variable displacement pump control systems, load-sensing control systems, and electro-hydraulic proportional control systems. For example, the electro-hydraulic proportional variable displacement pump developed by Bosch Rexroth precisely adjusts the pump displacement and output pressure according to the actual load demand, effectively matching the system flow with the load requirement and significantly reducing volumetric leakage loss. Yuken has developed a series of energy-saving hydraulic valves and optimized circuit structures, which minimize throttling loss by reducing the number of throttling components and optimizing the flow channel design. In addition, many foreign scholars have introduced intelligent optimization algorithms such as genetic algorithms, particle swarm optimization, and neural networks into hydraulic system control, realizing the dynamic optimization of system parameters under complex working conditions [6, 8, 9, 12]. However, most existing studies are aimed at general hydraulic systems, lacking targeted research on the unique characteristics of process machinery, such as intermittent load, drastic load fluctuation, and high-frequency start-stop operation. Moreover, the optimization algorithms adopted generally have slow convergence speed and poor real-time performance, making it difficult to meet the requirements of practical engineering applications [7, 20].

Domestically, research on energy efficiency improvement of hydraulic systems

has made rapid progress in recent years, mainly focusing on energy-saving transformation and control strategy optimization of existing hydraulic systems. Many scholars have applied variable-frequency speed regulation technology, energy-saving valve groups, and accumulator energy storage technology to reduce no-load energy consumption and throttling loss of hydraulic systems. Load-sensing control technology has been widely studied and applied to optimize the structure of hydraulic circuits and realize dynamic matching between system flow and load demand. In addition, domestic researchers have made important progress in hydraulic system modeling and simulation, using advanced simulation software such as AMESim and Simulink to analyze the distribution rules and influencing factors of system losses, providing theoretical support for energy efficiency optimization [8, 14].

Nevertheless, the current research still has obvious shortcomings and limitations. First, the analysis of the loss mechanism of hydraulic systems is not thorough enough, and most studies only focus on a single loss factor, lacking systematic research on the coupling characteristics of multiple losses under full-system and full-working-condition operation. Second, most energy efficiency improvement methods adopt a single optimization means, lacking collaborative optimization of components, circuits, and control strategies, which makes it difficult to maximize the energy-saving potential of the system. Third, the engineering practicability of the proposed optimization methods is insufficient, and many strategies rely on high-precision components, complex control structures, or expensive hardware, which are difficult to be widely promoted and applied in ordinary process machinery. Therefore, developing a comprehensive, condition-adaptive, and low-cost low-loss energy efficiency improvement method has become a research hotspot and technical difficulty in the field of hydraulic transmission [10, 16].

1.3. Research Content and Innovations

Aiming at the above problems and challenges, this paper conducts a systematic and in-depth study on the low-loss design and energy efficiency improvement of hydraulic systems for process machinery. Through dynamic modeling, optimal control design, numerical simulation, and experimental verification, a set of scientific, practical, and efficient energy efficiency improvement theories and methods are proposed. The main research contents are as follows:

Analysis of Operating Principles and Energy Consumption Characteristics of Hydraulic Systems: Clarify the typical composition, structural characteristics, and working logic of hydraulic systems for process machinery; systematically analyze the energy consumption distribution and loss sources of key components and hydraulic circuits; establish the quantitative relationship between system losses and structural parameters, operating parameters, and working condition parameters; reveal the coupling mechanism and interaction law of different losses, laying a solid theoretical foundation for the design of energy efficiency improvement strategies.

Low-Loss Oriented Dynamic Modeling of Hydraulic Systems: Based on fluid mechanics, mechanical dynamics, and hydraulic transmission theory, establish accurate low-loss mathematical models for core hydraulic components including axial piston pumps, double-acting hydraulic cylinders, relief valves, and throttle valves; construct the overall dynamic energy consumption model of the hydraulic system by integrating the component models according to the hydraulic circuit topology; verify the accuracy and practicability of the model through parameter identification, numerical simulation, and experimental testing.

Research on Energy Consumption Optimization Control Strategy: Define the comprehensive optimization objectives and constraint conditions for energy efficiency improvement; design an improved genetic algorithm with strong global search ability and

fast convergence speed; propose an integrated energy consumption optimization control strategy combining high-fidelity dynamic modeling and the improved genetic algorithm; realize adaptive and real-time dynamic adjustment of system operating parameters such as pump speed and throttle valve opening, minimizing system energy consumption while ensuring dynamic performance.

Simulation and Experimental Verification: Build a multi-domain collaborative simulation platform based on AMESim and Simulink to simulate typical working conditions of process machinery and verify the effectiveness and feasibility of the proposed optimization control strategy; construct a physical experimental platform for hydraulic systems, conduct comparative experiments under different load conditions, and further confirm the correctness of theoretical analysis and simulation results, ensuring the engineering practicability and reliability of the research outcomes.

The main innovations of this research are summarized as follows:

Proposed a full-process loss coupling dynamic model for hydraulic systems: Breaking through the limitation of single loss analysis in existing research, this model comprehensively considers the coupling interaction between component loss, circuit loss, and control loss, enabling accurate prediction of system energy consumption and precise localization of key loss sources.

Developed a low-loss dynamic modeling method adapted to dynamic working conditions: Combined with parameter identification technology, this method effectively improves the adaptability and accuracy of the model in actual engineering environments, providing reliable theoretical support for the design of high-performance optimal control strategies.

Proposed an integrated optimal control strategy combining dynamic modeling and improved genetic algorithm: This strategy realizes collaborative optimization of components, circuits, and control, effectively solving the problems of poor working condition adaptability and limited energy efficiency improvement effect of traditional optimization methods, with low engineering implementation cost and strong universality.

2. Operating Principle and Energy Consumption Characteristics of Process Machinery Hydraulic Systems

2.1. Basic Composition of Process Machinery Hydraulic Systems

The core function of a hydraulic system for process machinery is to convert the mechanical energy of the driving motor into hydraulic energy, and then drive the actuator to realize precise and reliable execution of various process actions through the transmission and control of hydraulic oil. A typical hydraulic system (Fig. 1) consists of four basic parts: power components, actuators, control components, and auxiliary components, which cooperate with each other to complete the transmission, control, and conversion of energy [18, 19].

Power Components: The core component is the hydraulic pump, which serves as the «power source» of the hydraulic system. Its main function is to convert the mechanical energy output by the motor into hydraulic energy (pressure energy and kinetic energy) and supply high-pressure hydraulic oil to the system. Common types of hydraulic pumps in process machinery include gear pumps, vane pumps, and piston pumps. Among them, axial piston pumps are widely used in medium and high-pressure process machinery such as rolling mills and injection molding machines due to their high volumetric efficiency, high working pressure, and good variable performance.

Actuators: Mainly include hydraulic cylinders and hydraulic motors, which are the «executors» of the hydraulic system. Their function is to convert hydraulic energy back into mechanical energy to drive the working parts of process machinery to perform various motions. Hydraulic cylinders are used to realize linear reciprocating motion, such as the stamping motion of presses and the clamping

motion of injection molding machines. Hydraulic motors are used to realize continuous rotary motion, such as the rotation of drums in mining machinery and the drive of conveyors.

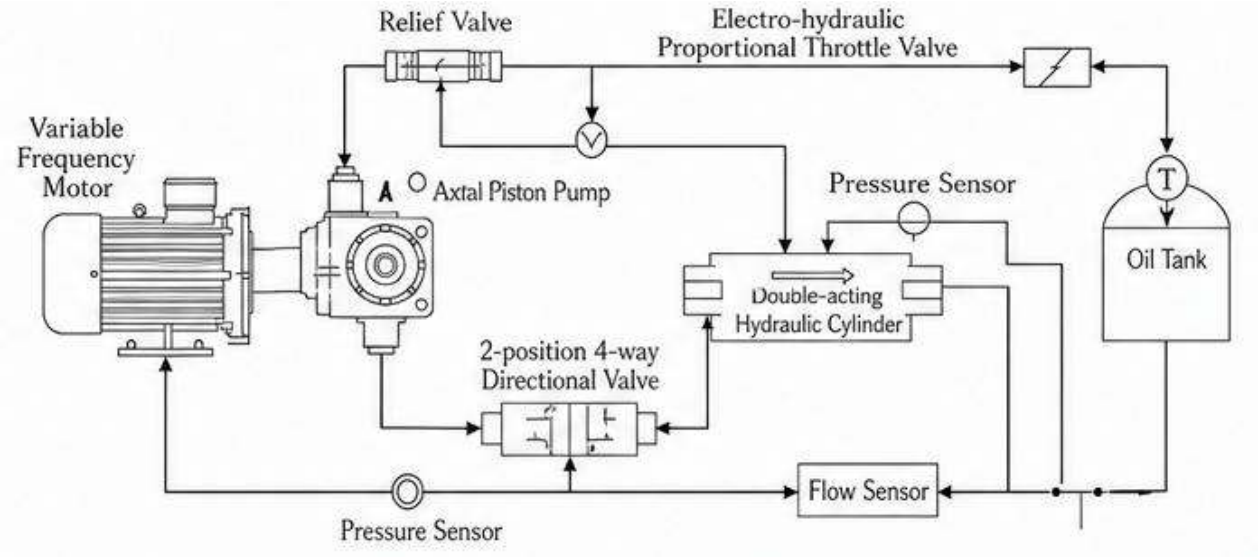


Fig. 1. Schematic diagram of the electro-hydraulic system

Control Components: Including pressure control valves, flow control valves, and directional control valves, which are the «command center» of the hydraulic system. Their main function is to adjust and control the pressure, flow rate, and flow direction of hydraulic oil in the system, ensuring that the actuator can accurately and stably complete the required actions according to the process requirements. For example, relief valves are used to stabilize system pressure and prevent overload; throttle valves are used to adjust the movement speed of actuators; directional valves are used to control the start-stop and commutation of actuators.

Auxiliary Components: Including oil tanks, oil filters, oil pipes, pipe joints, pressure gauges, and temperature sensors, etc. Although these components do not directly participate in energy conversion, they play an important role in ensuring the normal operation, reducing energy loss, and protecting the main components of the system. For example, the oil tank is used to store hydraulic oil, dissipate heat, and precipitate impurities; the oil filter is used to filter impurities in hydraulic oil to prevent component wear; oil pipes are used to transmit hydraulic oil, and their diameter, length, and layout directly affect the pressure loss of the hydraulic circuit.

2.2. Energy Consumption Analysis of Hydraulic Systems

The energy consumption of a hydraulic system is essentially the difference between the input power provided by the motor and the effective power output by the actuator to complete useful work, i.e., the total energy loss of the system. Input power refers to the mechanical power transmitted by the motor to the hydraulic pump, while effective power refers to the mechanical power output by the actuator to drive the load. The difference between the two is the total energy loss of the system, which is dissipated in the form of heat, noise, and vibration. Combined with the complex and changeable working condition characteristics of process machinery, the energy loss of the hydraulic system can be divided into three main categories: component loss, circuit loss, and control loss [17, 20].

Component Loss: Accounting for 60–75 % of the total system loss, it is the main source of energy consumption. Component loss mainly occurs in three core components: hydraulic pumps, hydraulic cylinders, and hydraulic valves. The loss of hydraulic pumps includes volumetric loss (internal leakage) and mechanical loss (friction between moving parts). The loss of hydraulic cylinders mainly includes leakage loss (internal and external leakage) and friction loss (friction between piston and cylinder barrel). The loss of hydraulic valves is mainly throttling loss, which is the pressure loss caused by the throttling effect of the valve port when hydraulic oil flows through the valve.

Circuit Loss: Accounting for 15–25 % of the total system loss, it mainly occurs in hydraulic pipelines and auxiliary components. Circuit loss includes along-path pressure loss and local pressure loss. Along-path pressure loss is the viscous friction loss generated when hydraulic oil flows in a straight pipe section, which is related to pipe length, pipe diameter, oil viscosity, and flow velocity. Local pressure loss is the flow loss generated when hydraulic oil passes through local components such as pipeline elbows, tees, and pipe joints, which is related to the structure and shape of local components.

Control Loss: Accounting for 7.5 % of the total system loss, it is the energy waste caused by unreasonable control strategies. The working conditions of process machinery have strong dynamic and time-varying characteristics, such as frequent load changes, intermittent operation, and high-frequency start-stop. Traditional fixed-parameter control strategies cannot adaptively adjust system operating parameters according to real-time working condition changes, resulting in the system still operating at high pressure and large flow under light-load or no-load conditions, generating a large amount of redundant energy consumption.

The input power of the hydraulic pump, as the key power component, is calculated as follows:

$$P_{in} = \frac{P_p \cdot Q_p}{\eta_v \cdot \eta_m}\ , \qquad (1)$$

where P_{in} – is the input power of the hydraulic pump, W;

P_p – is the output pressure of the hydraulic pump, Pa;

Q_p – is the actual output flow of the hydraulic pump, m^3/s;

η_v – is the volumetric efficiency of the hydraulic pump;

η_m – is the mechanical efficiency of the hydraulic pump.

2.3. Necessity and Challenges of Energy Consumption Optimization

With the continuous growth of global energy demand, the rapid rise in energy prices, and the increasing awareness of environmental protection, reducing energy consumption and improving energy efficiency have become important goals for the sustainable development of all industries. As a typical high-energy-consumption equipment, the energy consumption of hydraulic systems for process machinery accounts for a large proportion of the total equipment energy consumption. Taking a medium-sized injection molding machine as an example, the energy consumption of its hydraulic system accounts for more than 70 % of the total equipment energy consumption. If the energy efficiency of the hydraulic system can be improved by 20 %, a large amount of electrical energy can be saved every year, which has significant economic benefits and environmental value. Therefore, it is extremely necessary to carry out research on energy consumption optimization of hydraulic systems for process machinery [5, 11, 16].

However, the energy consumption optimization of hydraulic systems faces many technical challenges. First, the working conditions of process machinery are complex and changeable, and the system load, movement speed, and working pressure often change drastically, which makes it difficult to establish an accurate and universal energy consumption model. Second, there is a strong

coupling relationship between various components and parameters in the hydraulic system, and changes in one parameter will affect the performance and energy consumption of the entire system, increasing the difficulty of optimization. Third, most existing optimization algorithms have problems such as high computational complexity, slow convergence speed, and poor real-time performance, which are difficult to meet the requirements of practical engineering applications. Therefore, developing an efficient, stable, and practical energy consumption optimization control strategy is of great significance for improving the energy utilization efficiency of hydraulic systems [1, 8, 18].

3. Dynamic Modeling of Process Machinery Hydraulic Systems

3.1. Modeling Ideas and Assumptions

The core goal of low-loss oriented dynamic modeling of hydraulic systems is to accurately describe the energy consumption quantification, dynamic response characteristics, and loss coupling mechanism of the system, and to establish a mathematical model that can truly reflect the operating laws of the actual system under typical working conditions such as variable load, high-frequency start-stop, and intermittent operation. The modeling idea follows the progressive logical framework of «component modeling → circuit integration → model verification → characteristic analysis», ensuring that the established model has both strict theoretical derivation and good engineering practicability [3, 17].

To simplify the modeling process, reduce unnecessary complexity, and ensure the accuracy and applicability of the model, the following reasonable basic assumptions are proposed based on the structural characteristics and operating laws of hydraulic systems for process machinery:

Fluid properties: The hydraulic oil is treated as a compressible Newtonian fluid operating at a constant temperature of 40 °C, which is consistent with the typical working temperature range of industrial hydraulic systems. Within the normal operating pressure range (5–25 MPa), the static compressibility of hydraulic oil is accounted for through an equivalent bulk modulus parameter. However, during steady-state analysis, the effect of dynamic compressibility (pressure wave propagation and transient pressure oscillations) is neglected, while in the dynamic characteristic analysis, this effect is captured through the system compliance terms incorporated in the cylinder chamber models. The influence of temperature changes on the viscosity and density of hydraulic oil is assumed negligible within the analyzed operation window, simplifying the coupling interference of thermal loss.

Internal leakage characteristics: The internal leakage of hydraulic components is assumed to be laminar leakage, and the leakage flow is linearly proportional to the pressure difference between the inlet and outlet of the component. The influence of turbulent leakage on the model is ignored, which is consistent with the actual leakage characteristics of hydraulic components under normal working conditions [6].

Pipeline elasticity: The elastic deformation of hydraulic pipelines themselves is ignored, while the volume compression of hydraulic oil within the pipelines (i.e., oil compressibility effect) is considered. This approach focuses on the quantitative calculation of along-path pressure loss and local pressure loss of pipelines, simplifying the complexity of pipeline wall elasticity modeling while retaining the primary compressibility-dominated dynamic response.

External load modeling: The external load of the hydraulic system is assumed to be a rigid load, and the elastic deformation of the load itself is ignored. Only the dynamic change of the load magnitude is considered, simplifying the derivation of the force balance equation of the actuator.

Steady-state versus transient operation: Under steady-state operation, the influence of transient impact and high-frequency pressure fluctuation is ignored. Only in the dynamic

characteristic analysis, the transient response caused by sudden working condition changes such as sudden load change and sudden speed change is considered, which allows for a more accurate description of system behavior during mode transitions [13].

By explicitly distinguishing between the treatment of static compressibility (modeled as a compliance parameter) and dynamic compressibility (captured through compliance terms in transient analysis), this modeling framework avoids the internal contradiction found in previous versions and provides a physically consistent representation across both steady-state and dynamic operating regimes [9, 14].

3.2. Low-Loss Mathematical Modeling of Core Components

3.2.1. Axial Piston Pump

As the power source of the hydraulic system, the loss of the axial piston pump directly determines the overall energy consumption level of the system. The loss of the axial piston pump is mainly divided into volumetric loss (internal leakage) and mechanical loss (friction loss). Combined with fluid mechanics and mechanical dynamics theory, an accurate low-loss mathematical model is established [3, 19].

The theoretical output flow of the axial piston pump is determined by its displacement and rotational speed. To ensure dimensional consistency, the rotational speed is converted from r/min to r/s by the factor of 1/60:

$$Q_t = \frac{V_p \cdot n_p}{60}, \qquad (2)$$

where Q_t – is the theoretical output flow, m^3/s;

V_p – is the pump displacement, m^3/r;

n_p – is the pump rotational speed, r/min.

Volumetric loss (leakage loss) is one of the main losses of the axial piston pump. The leakage flow mainly comes from the clearance between the piston and the cylinder block, and between the valve plate and the cylinder block. The leakage flow is linearly proportional to the pressure difference between the inlet and outlet of the pump, and the formula is:

$$Q_{Lp} = K_{Lp} \cdot (P_p - P_{atm}) . \qquad (3)$$

Under the engineering approximation that atmospheric pressure $P_{atm} \approx 0$ relative to the system pressure (5–25 MPa), this simplifies to:

$$Q_{Lp} = K_{Lp} \cdot P_p , \qquad (4)$$

where Q_{Lp} – is the leakage flow, m^3/s;

K_{Lp} – is the leakage coefficient, $[m^3/(s \cdot Pa)]$;

P_p – is the pump output pressure, Pa.

Therefore, the actual output flow of the axial piston pump considering volumetric loss is:

$$Q_p = Q_t - Q_{Lp} = \frac{V_p \cdot n_p}{60} - K_{Lp} \cdot P_p . \qquad (5)$$

Mechanical loss includes bearing friction loss and viscous friction loss of hydraulic oil. These two types of mechanical losses differ fundamentally in their physical origins and must be modeled separately with dimensionally consistent expressions:

– bearing friction loss power is proportional to both the rotational speed and the operating pressure, because the normal forces at bearing surfaces are pressure-dependent due to the pressurized loads transmitted through the piston-slipper-swashplate mechanism. The corrected dimensional formula is

$$P_{f1} = C_{f1} \cdot \frac{n_p}{60} \cdot P_p ; \qquad (6)$$

– viscous friction loss power originates from the shear resistance of hydraulic oil within thin clearances and is proportional to the square of the rotational speed (since shear stress is proportional to the velocity gradient, and power is the product of shear force and velocity):

$$P_{f2} = C_{f2} \cdot (\frac{n_p}{60})^2 . \qquad (7)$$

The total mechanical loss power of the axial piston pump is:

$$P_{mc} = P_{f1} + P_{f2} = C_{f1} \cdot \frac{n_p}{60} \cdot P_p + C_{f2} \cdot (\frac{n_p}{60})^2 \text{ , (8)}$$

where C_{f1} – is the bearing friction coefficient with physical dimension, [m³/r], and ensures P_{f1} – has the unit of power, W;

C_{f2} – is the viscous friction coefficient with physical dimension, [N·m·s/r^2], and ensures P_{f2} – has the unit of power, W.

Specifically, dimensional verification yields:

$$[C_{f1}] \cdot [\frac{n_p}{60}] \cdot [P_p] = m^3 \cdot s^{-1} \cdot Pa = m^3 \cdot s^{-1} \cdot (N/m^2) = N \cdot m \cdot s^{-1} = W,$$
$$[C_{f2}] \cdot [\frac{n_p}{60}]^2 = N \cdot m \cdot s \cdot s^{-2} = N \cdot m \cdot s^{-1} = W\,. \quad (9)$$

This corrected formulation resolves the dimensional inconsistency in the original models ($P_{f1} = f_1 \cdot P_p$ and $P_{f2} = f_2 \cdot n_p$), where the product of a pressure or a speed alone cannot yield power without appropriate additional terms. The revised model is physically consistent with established theories of hydraulic pump mechanical losses.

3.2.2. Double-Acting Hydraulic Cylinder

The double-acting hydraulic cylinder is the main actuator of the hydraulic system, undertaking the task of converting hydraulic energy into mechanical energy to drive the load. Its loss mainly includes leakage loss (internal and external leakage) and friction loss. Combined with the flow continuity principle and force balance equation, a low-loss mathematical model is established.

The flow continuity equation of the double-acting hydraulic cylinder, considering internal leakage flow, is:

$$Q_c = A_1 \cdot v_c + Q_{Lc}\,, \quad (10)$$

where Q_c – is the input flow of the hydraulic cylinder, m³/s;

A_1 – is the effective area of the rodless chamber, m²;

v_c – is the piston movement speed, m/s;

Q_{Lc} – is the internal leakage flow, m³/s.

The internal leakage flow of the hydraulic cylinder is mainly generated by the clearance between the piston and the cylinder barrel, and the formula is:

$$Q_{Lc} = K_{Lc} \cdot (P_1 - P_2)\,, \quad (11)$$

where K_{Lc} – is the leakage coefficient of the hydraulic cylinder, [m³/(s·Pa)];

P_1 – is the pressure of the rodless chamber, Pa;

P_2 – is the pressure of the rod chamber, Pa.

The force balance equation of the double-acting hydraulic cylinder, considering dynamic load and friction resistance, is:

$$P_1 \cdot A_1 - P_2 \cdot A_2 - F_L - F_f = m_c \cdot a_c\,, \quad (12)$$

where A_2 – is the effective area of the rod chamber, m²;

F_L – is the external process load force, N;

F_f – is the friction resistance, N;

m_c – is the total mass of the piston and piston rod, kg;

a_c – is the piston acceleration, m/s². This equation captures the inertial dynamics of the moving assembly, which is essential for accurate transient response prediction.

3.2.3. Hydraulic Valves and Pipelines

Hydraulic valves and pipelines are important control and transmission components of the hydraulic system, and their loss is an important part of the total system loss [15].

The loss of the relief valve is mainly the pressure loss caused by overflow flow, and the overflow flow model is:

$$Q_{ov} = C_d \cdot A_{ov}\sqrt{\frac{2\cdot\Delta P_{ov}}{\rho}}\ , \qquad (13)$$

where Q_{ov} – is the overflow flow, m³/s;

C_d – is the flow coefficient;

A_{ov} – is the effective area of the relief valve port, m²;

ΔP_{ov} – is the pressure difference before and after the relief valve, Pa;

ρ – is the density of hydraulic oil, kg/m³.

The loss of hydraulic pipelines includes along-path pressure loss and local pressure loss. The along-path pressure loss formula (Darcy-Weisbach equation) is:

$$\Delta P_{pipe} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2}\ . \qquad (14)$$

The local pressure loss formula is:

$$\Delta P_{local} = K_{local} \cdot \frac{\rho v^2}{2}\ , \qquad (15)$$

where λ – is the along-path resistance coefficient;

K_{local} – is the local resistance coefficient (corresponding to ξ in the original formulation);

L – is the pipeline length, m);

d – is the pipeline inner diameter, m;

and v – is the average flow velocity of hydraulic oil, m/s. The unified representation using $\rho v^2/2$ as the dynamic pressure reference ensures dimensional consistency between the two types of pressure losses.

3.3. System Integration Modeling and Model Verification

The core of system integration modeling is to organically integrate the low-loss mathematical models of core components and pipelines according to the actual topological structure of the hydraulic circuit, following the three basic principles of flow continuity, pressure balance, and energy consumption coupling, to construct the overall dynamic energy consumption model of the hydraulic system. This model can accurately describe the energy consumption distribution, dynamic response, and loss coupling relationship of the entire system, laying a foundation for the design and simulation analysis of the optimal control strategy [6, 13].

To ensure the accuracy, reliability, and practical applicability of the established dynamic model, a comprehensive model verification method combining parameter identification, numerical simulation, and physical experiment is adopted. First, the least square method is used to identify the key unknown parameters in the model (such as leakage coefficient, resistance coefficient, and friction coefficient) based on the measured experimental data, ensuring that the deviation between the model calculated value and the actual measured value is within 5 %. Second, a multi-domain collaborative simulation platform is built using AMESim software, and typical working conditions of process machinery are simulated to compare the simulation results with the model calculation results, verifying the correctness of the model. Finally, a physical experimental platform is built, and actual operating data of the hydraulic system is collected to further verify the accuracy and practicability of the model, ensuring that the model can truly reflect the operating characteristics and energy consumption laws of the actual system [4, 7].

4. Energy Consumption Optimization Control Strategy

4.1. Optimization Objective and Constraint Condition

The core goal of the energy consumption optimization control strategy is to minimize the total energy consumption of the hydraulic system while ensuring that the dynamic performance and control accuracy of the system meet the actual process requirements. As established in Eq. (1), the hydraulic system input power depends on the pump operating pressure $P_p(t)$ and the actual flow rate $Q_p(t)$,

modulated by the composite efficiency $\eta_v \cdot \eta_m$. The optimization objective function is defined as the integral of the system instantaneous input power over the entire working cycle, which is expressed as:

$$E = \int_0^T P_{sys,in}(t)dt = \int_0^T \frac{P_p(t) \cdot Q_p(t)}{\eta_v(t) \cdot \eta_m(t)} dt, \quad (16)$$

where E – is the total energy consumption of the system, J;

$P_{sys,in}(t)$ – is the instantaneous input power of the system at time t, W;

T – is the duration of a complete working cycle, s.

To ensure the safe and stable operation of the hydraulic system and meet the process requirements, the following constraint conditions are defined:

Pressure Constraint: The system working pressure P_{sys} must be within the safe operating pressure range:

$$P_{min} \leq P_{sys}(t) \leq P_{max}, \quad (17)$$

where P_{min} – is the minimum working pressure (5 MPa in this study);

P_{max} – is the maximum working pressure (20 MPa in this study).

Flow Constraint: The system flow Q_{sys} must be dynamically adjusted according to the load demand and within the allowable flow range:

$$Q_{min} \leq Q_{sys}(t) \leq Q_{max}, \quad (18)$$

where Q_{min} – is the minimum system flow, m³/s;

Q_{max} – is the maximum system flow, m³/s.

Dynamic Performance Constraint: To ensure the accuracy and stability of the actuator motion, the system dynamic response must meet:

$$t_s \leq t_{s,limit} and \sigma \leq \sigma_{limit}, \quad (19)$$

where t_s – is the system response time, s;

$t_{s,limit}$ – is the maximum allowable settling time;

σ – is the overshoot;

σ_{limit} – is the maximum allowable overshoot.

The numerical values of the overall efficiency of the hydraulic drive and their change over time, obtained by various methods of analyzing the function (16), are shown in Fig. 2.

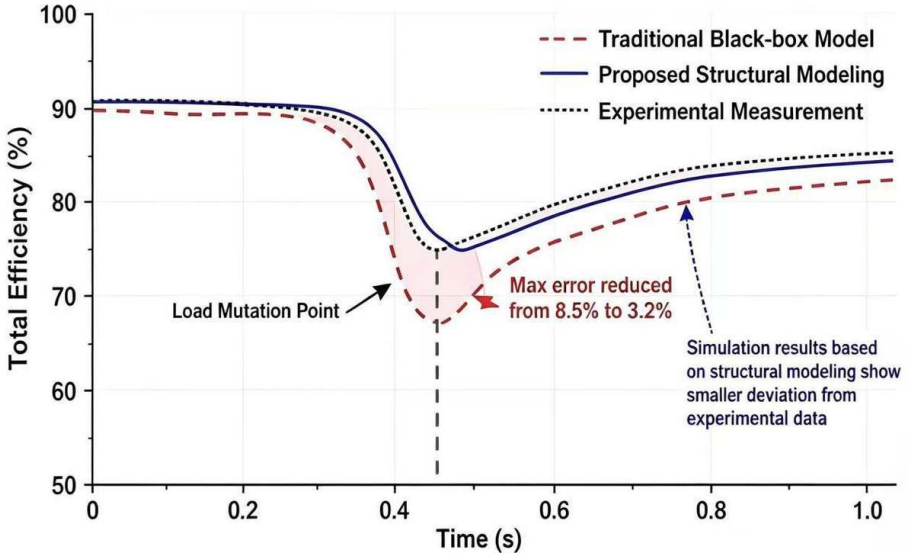


Fig. 2. Comparison of total efficiency under load mutation

4.2. Design of Improved Genetic Algorithm

Genetic Algorithm (GA) is a global optimization algorithm based on the principles of natural selection and genetic variation, with strong global search ability, good adaptability, and robustness, which is very suitable for solving complex nonlinear optimization problems such as energy consumption optimization of hydraulic systems. To further improve the optimization efficiency, convergence speed, and solution accuracy of the algorithm, an improved genetic algorithm with adaptive crossover rate and mutation rate is designed [11, 15], as shown in Fig. 3.

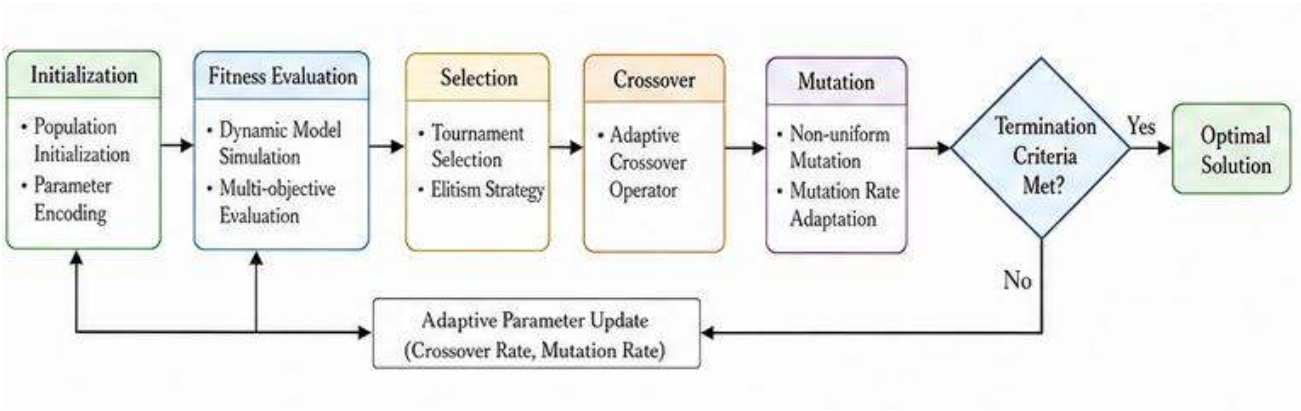


Fig. 3. Framework of the improved genetic algorithm(IGA) for control optimization

The main design steps of the improved genetic algorithm are as follows:

Population Initialization: Take the hydraulic pump speed (in r/min) and throttle valve port opening (in %) as the optimization variables, and randomly generate the initial population. The population size is set to 50 individuals, and the maximum number of iterations is set to 100.

Fitness Function Evaluation: Take the reciprocal of the total system energy consumption as the fitness function:

$$f_{fitness} = \frac{1}{E+\epsilon}\ , \qquad (20)$$

where ϵ – is a small positive constant (set to 10^{-6}) to prevent numerical singularity when $E = 0$. The larger the fitness value, the lower the corresponding system energy consumption, and the better the individual performance.

Selection, Crossover, and Mutation Operations: Adopt the roulette wheel selection method to select excellent individuals; design an adaptive crossover rate P_c and mutation rate P_m that dynamically adjust with the number of iterations and population diversity:

$$P_c = P_{c0} \cdot (1 - \frac{k}{K_{max}}) + P_{c,min} \cdot \frac{k}{K_{max}}\ , \qquad (21)$$

$$P_m = P_{m0} \cdot (1 - \frac{k}{K_{max}}) + P_{m,min} \cdot \frac{k}{K_{max}}\ , \qquad (22)$$

where $P_{c0} = 0.9$, $P_{m0} = 0.1$, $P_{c,min} = 0.5$, $P_{m,min} = 0.01$, k is the current iteration number;

K_{max} is the maximum number of iterations. This adaptive strategy effectively improves the convergence speed and stability of the algorithm by maintaining high exploration capability in early generations and increasing exploitation precision in later generations.

Iteration Termination: When the number of iterations reaches the set maximum value or the fitness value of the optimal individual tends to be stable (variability $< 0.01\,\%$ over 10 consecutive generations), the iteration is terminated, and the optimal solution is output.

4.3. Implementation of Optimal Control Strategy

The energy consumption optimization control strategy based on the improved genetic algorithm realizes the energy-saving operation of the hydraulic system by dynamically adjusting the key operating parameters of the system. The core idea is to collect real-time system operating parameters through sensors, calculate the optimal operating parameters under the current working condition through the improved genetic algorithm, and then adjust the hydraulic pump speed and throttle valve port opening in real time through the controller, so that the system always operates in the low-loss and high-efficiency interval while meeting the load demand [2, 9, 17].

The implementation of the control strategy requires the cooperation of advanced sensor technology, real-time data acquisition system, and intelligent controller. Pressure sensors, flow sensors, and speed sensors are used to collect real-time data such as system pressure, flow rate, and pump speed, which are transmitted to the controller through the data acquisition module. The controller calculates the optimal pump speed and throttle valve opening through the improved genetic algorithm based on the real-time data and the established dynamic model, and outputs control signals to the frequency converter and electro-hydraulic proportional valve to realize the dynamic adjustment of system parameters. At the same time, a closed-loop feedback control link is introduced to correct the control deviation in real time, ensuring the accuracy, real-time performance, and stability of the optimal control [11, 13].

5. Simulation and Experimental Validation

5.1. Simulation Platform Construction and Parameter Setting

To verify the effectiveness and feasibility of the proposed energy consumption optimization control strategy, a multi-domain collaborative simulation platform is built based on AMESim and Simulink software. The simulation platform fully considers the structural characteristics and operating laws of the actual hydraulic system, and integrates the dynamic models of hydraulic components, mechanical structures, and control systems, realizing the joint simulation of hydraulic, mechanical, and control fields [7, 15, 18].

The main simulation parameters are set as follows:

Hydraulic pump: displacement $V_p = 10\ cm^3/rev$, rated speed $n_p = 1500$ rpm, rated pressure 25 MPa.

Hydraulic cylinder: rodless chamber area $A_1 = 50\ cm^2$, rod chamber area $A_2 = 30\ cm^2$, load mass $m_c = 500$ kg, stroke length = 0.5 m.

System pressure range: $P_{min} = 5$ MPa, $P_{max} = 20$ MPa.

Hydraulic oil: density $\rho = 900\ kg/m^3$, kinematic viscosity $\nu = 30\ mm^2/s$ (at 40 °C, corresponding to dynamic viscosity $\mu = 0.027$ Pa·s, refined from the original value of 0.03 Pa·s to reflect the typical properties of ISO VG 32 hydraulic oil).

Hydraulic pipeline: length L = 5 m, inner diameter d = 20 mm.

Control system: adaptive genetic algorithm parameters as specified in Eqs.

5.2. Simulation Results and Analysis

Comparative simulation tests are carried out on the hydraulic system under two conditions: without optimization control strategy (baseline system) and with the proposed improved genetic algorithm optimization control strategy (optimized system). The variable load working conditions of process machinery are simulated, with the load range set to 5000 N–20000 N.

The simulation results show that the proposed optimization control strategy has a significant energy-saving effect:

Under maximum load condition (20000 N): the system energy consumption is reduced by about 23 %.

Under medium load condition (12000 N): the system energy consumption is reduced by about 25 %.

Under light load condition (5000 N): the system energy consumption is reduced by about 18 %.

At the same time, the optimization control strategy also effectively improves the dynamic performance of the system: the system response time is shortened from 0.65 s to 0.42 s, and the overshoot is reduced from 14 % to 8 %, both meeting the set constraint conditions defined in Eq. (18). The simulation results fully demonstrate that the proposed optimization control strategy can significantly reduce system energy consumption while ensuring and improving dynamic performance [6, 10, 20], as shown in Fig. 4.

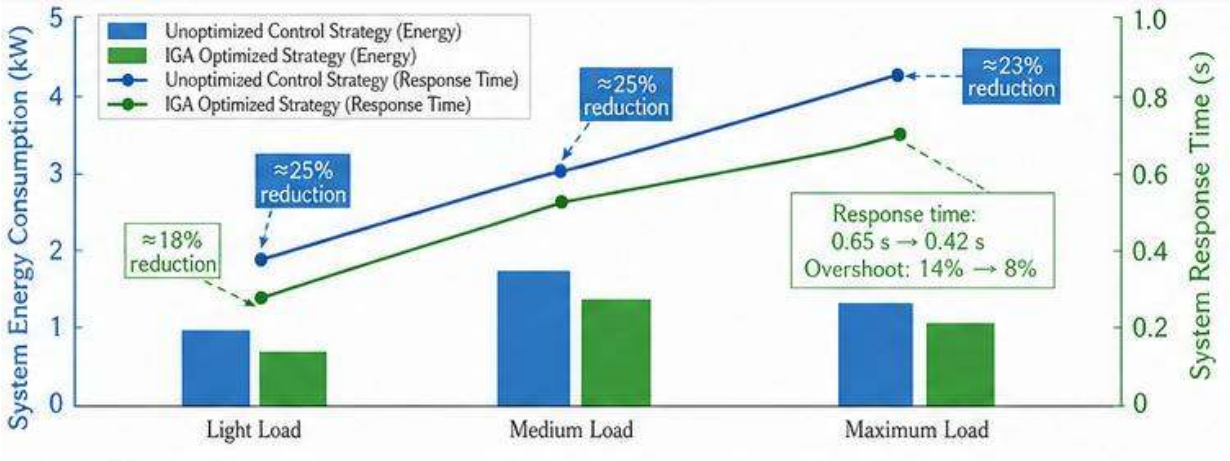


Fig. 4. Comparison of energy consumption and response time under different loads

Summarizes the simulated energy consumption before and after optimization, together with the corresponding energy-saving rates and dynamic performance improvements. The results indicate that the energy-saving rate is highest under medium load, which is attributed to the improved genetic algorithm's ability to identify an optimal operating point where the pump operates at intermediate speed and displacement, minimizing both volumetric leakage loss (dominant at low pressure) and mechanical friction loss (dominant at high pressure).

5.3. Experimental Design and Result Analysis

To further verify the effectiveness, reliability, and engineering practicability of the proposed optimization control strategy, a physical experimental platform for hydraulic systems is built, which is consistent with the simulation model in terms of component selection, structural parameters, and working condition settings. The experimental platform is equipped with high-precision pressure sensors, flow sensors, speed sensors, and power sensors, with a data acquisition frequency set to 100 Hz, which can accurately collect real-time operating data of the hydraulic system, as shown in Fig. 5.

The experiment is divided into two groups: the baseline experiment without the optimization control strategy and the comparative experiment with the optimization control strategy. The load conditions and working cycles of the two groups of experiments are kept consistent with the simulation test, as shown in Fig. 6.

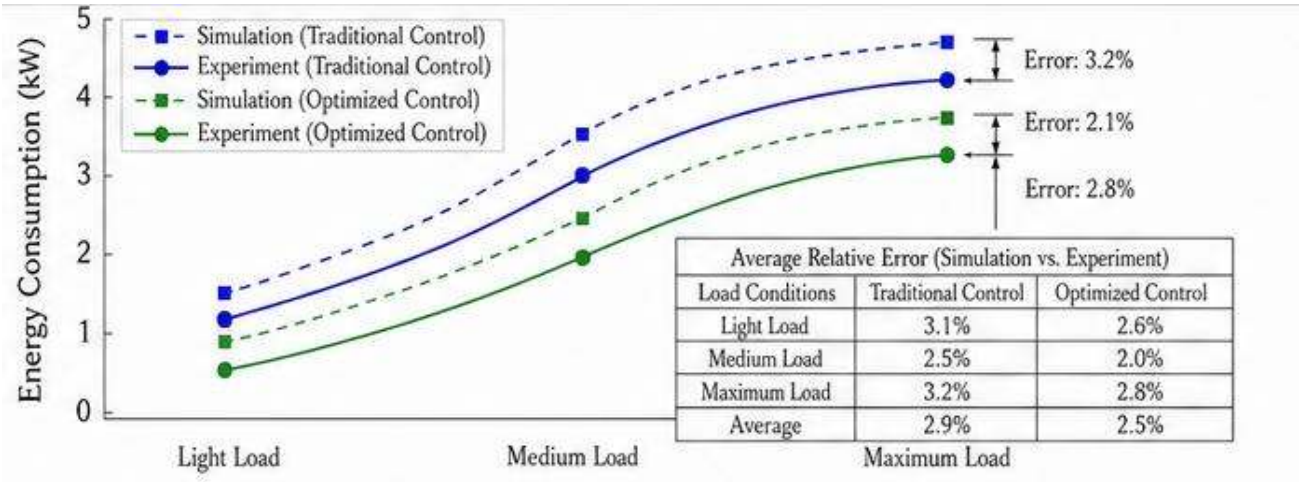
The experimental results show that the proposed optimization control strategy has a significant energy-saving effect in the actual hydraulic system, which is basically consistent with the simulation results:

Under maximum load condition: the measured energy consumption is reduced by about 22 %.

Under medium load condition: the measured energy consumption is reduced by about 24 %.

Under light load condition: the measured energy consumption is reduced by about 17 %.

At the same time, the experimental results also verify the improvement effect of the optimization control strategy on the dynamic performance of the system. The system response time and overshoot are consistent with the simulation results, which further confirms the correctness, effectiveness, and reliability of the proposed optimization control strategy.



Average Relative Error (Simulation vs. Experiment)

Load Conditions	Traditional Control	Optimized Control
Light Load	3.1%	2.6%
Medium Load	2.5%	2.0%
Maximum Load	3.2%	2.8%
Average	2.9%	2.5%

Fig. 5. Comparison of simulation and experimental energy consumption under different loads

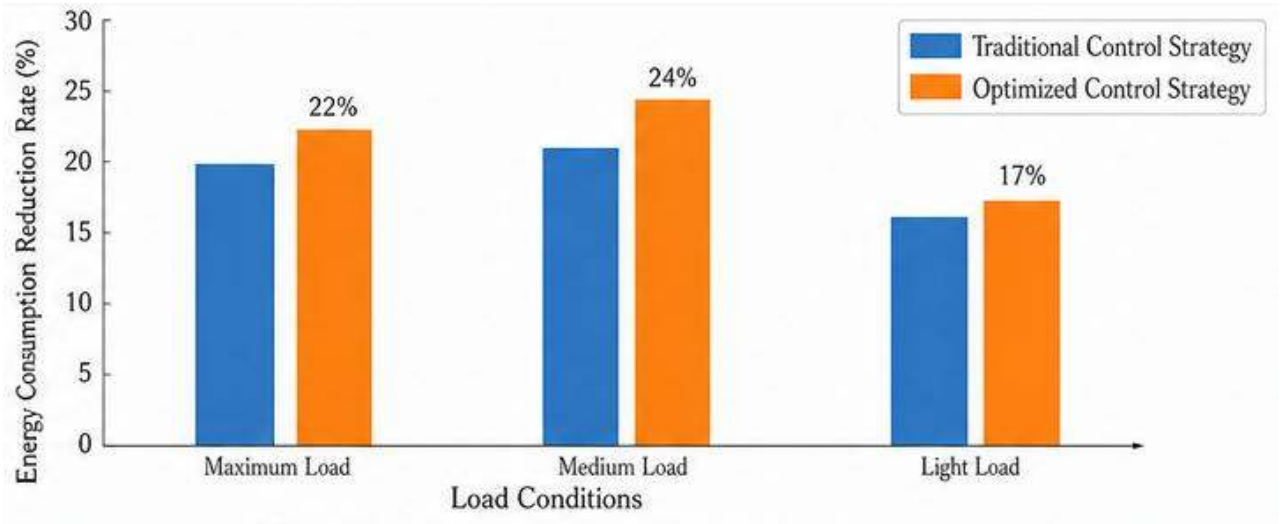


Fig. 6. Energy consumption reduction rate comparison

5.4. Discussion on Simulation–Experiment Discrepancies

Although the simulation and experimental results show good overall agreement, systematic deviations are observed between the predicted and measured energy consumption reductions. Comparison of simulation and experimental energy consumption reduction under variable load conditions are given in Table.

Table

Comparison of calculated and experimental values

Condition	Reduction (Simulation)	Reduction (Experiment)	Deviation (pp)	Relative Error
Maximum (20 kN)	23.2%	22.1%	1.1 pp	4.7%
Medium (12 kN)	25.1%	23.8%	1.3 pp	5.2%
Light (5 kN)	18.4%	17.3%	1.1 pp	6.0%

The observed discrepancies (ranging from 1.1 to 1.3 percentage points, or 4.7–6.0 % relative error) can be attributed to several factors inherent in the simulation-experiment mapping process:

Model fidelity limitations: The dynamic model assumes idealized laminar leakage flow, whereas actual components may exhibit transitional or slightly turbulent leakage patterns under certain pressure differentials and temperature conditions, introducing minor deviations in the predicted leakage flow rates.

Temperature-dependent viscosity variations: The model assumes a constant hydraulic oil temperature of 40 °C. In reality, the oil temperature may rise during extended operation due to the cumulative dissipation of mechanical and volumetric losses, reducing the oil viscosity and consequently decreasing both the leakage coefficients and the along-path pipeline resistance. This effect is not captured in the isothermal model, leading to a modest overestimation of energy consumption in simulation.

Sensor measurement uncertainties: The installed pressure, flow, and power sensors have specified accuracy classes (typically ± 0.5 % FS to ± 1.0 % FS), which introduce cumulative measurement errors when the total energy consumption is calculated by time-integration of instantaneous power.

Control actuation dynamics: The simulation assumes instantaneous actuation of pump speed and valve opening commands, while physical frequency converters and electro-hydraulic proportional valves possess finite response times (typically 20–50 ms), introducing slight delays in parameter adjustments and suboptimal operation during transient periods.

Despite these sources of discrepancy, the relative errors between simulation and experiment are within 6.0 %, which falls within the acceptable range for engineering design and performance estimation of hydraulic systems. Moreover, the consistency in the directional trends across all three load conditions validates the overall correctness of the developed dynamic model and control strategy. The results provide confidence that the proposed approach can serve as a reliable basis for practical energy efficiency improvement in process machinery hydraulic systems.

6. Conclusion and Future Work

6.1. Conclusion

This paper systematically investigates the theories and methods of energy efficiency improvement for hydraulic systems of process machinery oriented to low-loss characteristics. Through theoretical analysis, dynamic modeling, optimal control design, numerical

simulation, and experimental verification, the following main research conclusions are drawn:

The operating principles and energy consumption characteristics of hydraulic systems for process machinery are systematically analyzed, and the loss sources, distribution rules, and coupling mechanisms of component loss, circuit loss, and control loss are clarified, providing a solid theoretical basis for the design of energy efficiency improvement strategies.

A full-process low-loss dynamic mathematical model covering core hydraulic components and pipeline networks is established. The model incorporates dimensionally consistent formulations for bearing friction loss (proportional to rotational speed and operating pressure) and viscous friction loss (proportional to the square of rotational speed), resolving the dimensional inconsistencies found in earlier simplified models. The accuracy and practicability of the model are verified through parameter identification, numerical simulation, and experimental testing, which can accurately reflect the energy consumption laws and dynamic response characteristics of the actual hydraulic system.

An integrated energy consumption optimization control strategy combining dynamic modeling and an improved genetic algorithm is proposed, which realizes adaptive and real-time dynamic adjustment of system operating parameters. Simulation and experimental results show that the proposed strategy can significantly reduce volumetric loss, throttling loss, and pipeline pressure loss. The adaptive crossover rate and mutation rate mechanisms ensure both global exploration and local exploitation capabilities of the optimization algorithm.

Under typical working conditions, the energy efficiency of the hydraulic system is improved by 18–25 %, and the dynamic performance of the system is effectively enhanced. The consistency between simulation and experimental results (relative error within 6 %) further confirms the reliability of the developed model and control strategy. The research outcomes provide solid theoretical support and practical engineering guidance for the low-loss design and energy efficiency optimization of hydraulic systems for process machinery.

6.2. Future Work

Although this research has achieved important results in the field of energy efficiency improvement of hydraulic systems for process machinery, there are still some problems and challenges that need to be further studied and solved in future work:

Further optimize the structure and parameters of the improved genetic algorithm, and integrate other advanced optimization algorithms such as particle swarm optimization and neural networks to further improve the convergence speed, optimization accuracy, and real-time performance of the algorithm.

Incorporate temperature-dependent viscosity and leakage models to account for thermal effects during extended operation, and analyze the influence of parameter drift, temperature changes, and external interference on the performance of the optimization control strategy. Design a more robust adaptive control strategy to improve the adaptability and reliability of the system in complex and harsh working environments.

Apply the proposed optimization control strategy to different types and scales of process machinery hydraulic systems, conduct more extensive simulation and experimental verification, and further confirm the universality and engineering practicability of the strategy.

Explore more advanced control technologies and energy-saving design methods, such as model predictive control, energy recovery technology, and intelligent fault diagnosis technology, to further improve the energy efficiency, dynamic performance, and operational reliability of hydraulic systems for process machinery.

References

1. Warzocha, K. (2026). CFD-based steady-state flow force compensation in direct drive servo valves. *Applied Sciences, 16 (7),* 3262. https://doi.org/10.3390/app16073262

2. Pettersson, R. (2025). An approach for reliability analysis of digital hydraulic actuator for aircrafts. *CEAS Aeronautical Journal, 17,* 1315–1330. https://doi.org/10.1007/s13272-025-00920-4

3. Hu, J. (2025). Blocked actuation of twisted and coiled tube-based polymer actuators driven by hydraulic pressure. *International Journal of Smart and Nano Materials, 16 (4),* 760–778. https://doi.org/10.1080/19475411.2025.2558660

4. Li, L. (2026). Digital twin modeling of hydraulic cylinders in manufacturing equipment: Methodology, validation, and application on condition monitoring of hydraulic press. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 144,* 6797–6828. https://doi.org/10.1007/s00170-026-18221-3

5. Li, X. (2026). Multi-scale temporal modeling and adaptive channel fusion framework for fault diagnosis of hydraulic systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 240 (10),* 3747–3763. https://doi.org/10.1177/09544062261416717

6. Cui, W. (2026). Optimization of stage-controlled gate operations for upstream canal cascades post-contingency: A case study of MR-SNWDP hydraulic system. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 64,* 103212. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2026.103212

7. Yang, G. (2026). Asymptotic secure tracking control of electro-hydraulic servo systems with disturbance rejection. *ISA Transactions, 171,* 163–171. https://doi.org/10.1016/ j.isatra.2026.02.006

8. Jeong, C. H. (2026). Development and validation of electric cooling system control logic for optimized hydraulic oil thermal management in excavators. *Energy Conversion and Management, 361,* 121583. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2026.121583

9. Yang, N. (2026). State-constrained control for hydraulic manipulator position servo systems with valve dead-band compensation. *Actuators, 15 (4),* 196. https://doi.org/10.3390/ act15040196

10. Guo, W. (2026). A single-degree-of-freedom coordinated control strategy for distributed variable-speed pumping systems: Integrating hydraulic balance and demand response for enhanced energy efficiency. *Energy, 344,* 140045. https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140045

11. Liu, L. (2026). Hydraulic-driven IIoT leak detection model in district heating systems. *Urban Water Journal, 23 (5),* 747–763. https://doi.org/10.1080/1573062X.2025.2608602

12. Wang, Z. (2026). Analysis and optimization of pressurized flow characteristics of hydraulic-driven hydrogen compressors. *International Journal of Hydrogen Energy, 237,* 155343. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.155343

13. Wang, X. (2026). Hydraulic circuit simulation experiment research based on AMESim. *New Explorations in Education and Teaching, 4 (3).* https://doi.org/10.70711/neet.v4i3.8956

14. Hujo, Ľ. (2025). Degradation of hydraulic oil in operating conditions. *Key Engineering Materials, 1017,* 61–67. https://doi.org/10.4028/p-jxpz8d

15. Chiadighikaobi, P. C. (2025). Numerical evaluation method of hydraulic circuits including devices that stabilise pressure. *The Journal of Engineering, 2025 (1),* e70112. https://doi.org/10.1049/tje2.70112

16. Righettini, P. (2024). A systematic management and control methodology for high energy saving in applications equipped with hydraulic servo-axes. *Control Engineering Practice, 145,* 105847. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.105847

17. Imam, A. (2023). Improving performance of pump-controlled hydraulic circuits for single-rod actuators: Conceptual study. *Journal of Physics: Conference Series, 2616 (1),* 012015. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2616/1/012015

18. Zhang, D. (2026). Failure analysis and structural design improvement of support device for heavy-duty rack and pinion hydraulic actuator. *Scientific Reports, 16*, 18040. https://doi.org/10.1038/s41598-026-46597-5

19. Zhang, X. (2025). VBMGS: A vision-based multistep grasping strategy for a long-boom hydraulic robot system with structural flexibility. *Construction Robotics, 9 (2)*, 29. https://doi.org/10.1007/s41693-025-00171-z

20. Yuan, H.-B. (2018). System identification and robust position control for electro-hydraulic servo system using hybrid model predictive control. *Journal of Vibration and Control, 24 (18)*, 4145–4159. https://doi.org/10.1177/1077546317721417

Список використаних джерел

1. Warzocha, K. (2026). CFD-based steady-state flow force compensation in direct drive servo valves. *Applied Sciences, 16 (7)*, 3262. https://doi.org/10.3390/app16073262

2. Pettersson, R. (2025). An approach for reliability analysis of digital hydraulic actuator for aircrafts. *CEAS Aeronautical Journal, 17*, 1315–1330. https://doi.org/10.1007/s13272-025-00920-4

3. Hu, J. (2025). Blocked actuation of twisted and coiled tube-based polymer actuators driven by hydraulic pressure. *International Journal of Smart and Nano Materials, 16 (4)*, 760–778. https://doi.org/10.1080/19475411.2025.2558660

4. Li, L. (2026). Digital twin modeling of hydraulic cylinders in manufacturing equipment: Methodology, validation, and application on condition monitoring of hydraulic press. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 144*, 6797–6828. https://doi.org/10.1007/s00170-026-18221-3

5. Li, X. (2026). Multi-scale temporal modeling and adaptive channel fusion framework for fault diagnosis of hydraulic systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 240 (10)*, 3747–3763. https://doi.org/10.1177/09544062261416717

6. Cui, W. (2026). Optimization of stage-controlled gate operations for upstream canal cascades post-contingency: A case study of MR-SNWDP hydraulic system. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 64*, 103212. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2026.103212

7. Yang, G. (2026). Asymptotic secure tracking control of electro-hydraulic servo systems with disturbance rejection. *ISA Transactions, 171*, 163–171. https://doi.org/10.1016/ j.isatra.2026.02.006

8. Jeong, C. H. (2026). Development and validation of electric cooling system control logic for optimized hydraulic oil thermal management in excavators. *Energy Conversion and Management, 361*, 121583. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2026.121583

9. Yang, N. (2026). State-constrained control for hydraulic manipulator position servo systems with valve dead-band compensation. *Actuators, 15 (4)*, 196. https://doi.org/10.3390/ act15040196

10. Guo, W. (2026). A single-degree-of-freedom coordinated control strategy for distributed variable-speed pumping systems: Integrating hydraulic balance and demand response for enhanced energy efficiency. *Energy, 344*, 140045. https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140045

11. Liu, L. (2026). Hydraulic-driven IIoT leak detection model in district heating systems. *Urban Water Journal, 23 (5)*, 747–763. https://doi.org/10.1080/1573062X.2025.2608602

12. Wang, Z. (2026). Analysis and optimization of pressurized flow characteristics of hydraulic-driven hydrogen compressors. *International Journal of Hydrogen Energy, 237*, 155343. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.155343

13. Wang, X. (2026). Hydraulic circuit simulation experiment research based on AMESim. *New Explorations in Education and Teaching, 4 (3)*. https://doi.org/10.70711/neet.v4i3.8956

14. Hujo, Ľ. (2025). Degradation of hydraulic oil in operating conditions. *Key Engineering Materials, 1017*, 61–67. https://doi.org/10.4028/p-jxpz8d

15. Chiadighikaobi, P. C. (2025). Numerical evaluation method of hydraulic circuits including devices that stabilise pressure. *The Journal of Engineering, 2025 (1)*, e70112. https://doi.org/10.1049/tje2.70112

16. Righettini, P. (2024). A systematic management and control methodology for high energy saving in applications equipped with hydraulic servo-axes. *Control Engineering Practice, 145*, 105847. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.105847

17. Imam, A. (2023). Improving performance of pump-controlled hydraulic circuits for single-rod actuators: Conceptual study. *Journal of Physics: Conference Series, 2616 (1)*, 012015. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2616/1/012015

18. Zhang, D. (2026). Failure analysis and structural design improvement of support device for heavy-duty rack and pinion hydraulic actuator. *Scientific Reports, 16*, 18040. https://doi.org/10.1038/s41598-026-46597-5

19. Zhang, X. (2025). VBMGS: A vision-based multistep grasping strategy for a long-boom hydraulic robot system with structural flexibility. *Construction Robotics, 9 (2)*, 29. https://doi.org/10.1007/s41693-025-00171-z

20. Yuan, H.-B. (2018). System identification and robust position control for electro-hydraulic servo system using hybrid model predictive control. *Journal of Vibration and Control, 24 (18)*, 4145–4159. https://doi.org/10.1177/1077546317721417

Щю Мінвей, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0001-9165-1014. Тел.: +38(057)730-10-72. E-mail: xu@kart.edu.ua.
Ван Сюефен, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0007-9800-7962. Тел.: +38(057)730-10-72. E-mail: wang@kart.edu.ua.
Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.
Афанасов Георгій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1730-1785. Тел.: +38(066)452-40-39. E-mail: 0674274770@kart.edu.ua.
Трифонов Тарас Вікторович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Тел.: +38(050)401-45-48. E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

Xu Mingwei, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0001-9165-1014. Tel.: +38(057)730-10-72. E-mail: xu@kart.edu.ua.
Wang Xuefeng, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0007-9800-7962. Tel.: +38(057)730-10-72. E-mail: wang@kart.edu.ua.
Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Tel.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.
Afanasov Heorhii, PhD (Tech.), associate professor, doctoral student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1730-1785. Tel.: +38(066)452-40-39. E-mail: 0674274770@kart.edu.ua.
Tryfonov Taras, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Tel.: +38(050)401-45-48. E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

Дата надходження статті: 16.07.2026 р. Дата прийняття статті до друку: 07.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 629.463.65

ВІБРАЦІЙНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВАНТАЖЕННЯ НАПІВВАГОНІВ

Кандидати техн. наук Л. М. Козар, Є. В. Романович, А. В. Євтушенко, асп. М. Л. Козар

VIBRATION TEST RIG FOR STUDYING THE PROCESS OF UNLOADING GONDOLA CARS

Phd (Tech.) L. Kozar, Phd (Tech.) Y. Romanovych, Phd (Tech.) A. Yevtushenko, postgraduate student M. Kozar

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371568

Анотація. *Стаття присвячена розвитку вібраційного методу розвантаження насипних вантажів із напіввагонів. В Україні щороку переробляють понад 20 тис. напіввагонів із насипними вантажами. Близько 70 % напіввагонів розвантажують гравітаційним способом через відкриті люки. За такого способу розвантаження в кузові напіввагона залишається від 3 до 7 т вантажу, а в окремих випадках – до 20 т.*

Результати сучасних досліджень підтверджують доцільність удосконалення вібраційних засобів механізації розвантаження насипних вантажів із напіввагонів. Це потребує подальших теоретичних і експериментальних досліджень. Для проведення експериментальних лабораторних досліджень потрібно спроєктувати вібраційний стенд.

Запропоновано конструкцію вібраційного стенда, що містить фізичну модель частини кузова напіввагона, виконану в масштабі розмірів 1:10. Виходячи з теорії подібності у фізичному моделюванні, визначено потрібні параметри стенда: маса частини стенда, що коливається, жорсткість підвіски, власна частота коливань і маса дебалансу. Розроблено робочу документацію для виготовлення стенда.

Ключові слова: *напіввагон, насипний вантаж, розвантаження, фізичне моделювання, вібраційний стенд.*

Abstract. *This article is devoted to the development of the vibration method for unloading bulk cargo from gondola cars. In Ukraine, more than 20,000 open-top cars carrying bulk cargo are handled annually. About 70 % of gondola cars are unloaded by the gravity method through open hatches. With this unloading method, 3 to 7 tonnes of cargo remain inside the gondola car, and in some cases up to 20 tonnes.*

One of the key indicators of the operational efficiency of a railcar fleet is the duration of loading and unloading operations, which depends on the efficiency of the mechanization equipment used. Vibration-type mechanization equipment is widely used for unloading residual bulk cargo from gondola cars.

The results of recent studies confirm the feasibility of improving vibration-based mechanization equipment for unloading bulk cargo from gondola cars. This calls for both theoretical and experimental research. For experimental laboratory study, a vibration test rig needs to be designed.

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Козар Л. М., Романович Є. В., Євтушенко А. В., Козар М. Л., 2026.

The main goal of the study is to develop a physical model of part of a gondola car body in the form of a vibration test rig for further laboratory research aimed at improving the vibration method for unloading bulk cargo from gondola cars. A test rig design is proposed, comprising a fixed platform on which, via four rubber strips supported by posts, a vibrating platform is suspended. A 1:10 scale model of part of a gondola car is mounted on the oscillating platform. The model includes a center sill, two cross beams, and a pair of hatch covers. The oscillating platform is fitted with a single-stage gear transmission with a gear ratio of 1:1. Unbalanced masses are mounted on the gear wheels, producing vertically directed oscillations. One of the shafts, on which a gear wheel is mounted, is connected by a flexible shaft to a separately installed electric motor with computer-controlled rotational speed.

Based on similarity theory in physical modeling, the required parameters of the test rig were determined: the mass of the oscillating part of the rig, the suspension stiffness, the natural frequency of oscillation, and the mass of the unbalance. Working documentation for manufacturing the test rig has been developed.

Keywords: *gondola car, open-top wagon, bulk cargo, unloading, physical modeling, vibration test rig.*

Вступ. В Україні щороку переробляють понад 20 тис. напіввагонів із насипними вантажами. Близько 70 % напіввагонів розвантажують гравітаційним способом через відкриті люки. За такого способу розвантаження в кузові напіввагона залишається від 3 до 7 т вантажу, а в окремих випадках – до 20 т (рис. 1) [1].



Рис. 1. Залишки піску в кузові напіввагона [1]

Одним з основних показників ефективності експлуатації парку вагонів є тривалість виконання вантажно-розвантажувальних робіт. Вона залежить від ефективності засобів механізації.

Для розвантаження залишків насипних вантажів із напіввагонів широко використовують засоби механізації вібраційної дії.

Результати сучасних досліджень і багаторічний практичний досвід підтверджують доцільність подальшого розвитку вібраційного методу розвантаження. Це потребує теоретичних і експериментальних досліджень. Для проведення експериментальних лабораторних досліджень потрібно спроєктувати вібраційний стенд.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вібраційні машини для розвантаження залізничних вагонів безперервно удосконалюють як в Україні, так і в інших країнах. Компанія NAVCO (США) пропонує підвісні вібромашини для розвантаження відкритих бункерних вагонів у важких умовах експлуатації [2]. Ці машини скорочують час розвантаження вугілля, коксу, заповнювачів для асфальту та інших сипких вантажів, а також видаляють залишки без ручних операцій.

Важливою особливістю є використання привода зі змінною частотою, щоб налаштовувати роботу для змінних умов розвантаження.

Австралійська компанія Vibration Systems & Solutions постачає вібраційні розвантажувачі для залізничних вагонів моделей VAC 40M і VAC 200/4T, що призначені для зменшення затримок розвантаження на гірничодобувних, транспортних, сільськогосподарських і промислових підприємствах [3]. Ці машини спеціально розроблені для вологих і важкосипких вантажів. Оригінальною є система кріплення машин на вагоні за допомогою вакуумних присосок. Вакуум створюють вбудовані насоси. Контрольована вібрація порушує адгезію матеріалу та забезпечує повне розвантаження, не пошкоджуючи конструкцію вагона.

Підвищити ефективність розвантаження можна за рахунок збільшення амплітуди змушувальної сили або підбираючи її частоту. Але амплітуда змушувальної сили обмежена вимогами щодо забезпечення збереження вагонів під час навантажувально-розвантажувальних і маневрових робіт [4] (ДСТУ ГОСТ 22235:2015 втратив чинність 01.01.2026 р. і до цього часу не ухвалено новий стандарт) і вимогами щодо міцності вагонів (чинний ДСТУ UIC 577:2008) [5].

Багато досліджень присвячено впливу вібрації на конструкцію вагона. Встановлено, як різні методології випробувань впливають на ідентифікацію модальних параметрів (набору динамічних і вібраційних характеристик конструкції) залізничних вантажних вагонів [6]. Проведено експерименти на напіввагоні загального призначення з використанням п’яти різних методів збудження (ударний молот, електромагнітний збудник, гідравлічний збудник, вібраційний стіл) із прогресивними граничними умовами та чотирма станами навантаження, розробленими на основі ортогональних експериментальних принципів із використанням 56 точок вимірювання для визначення модальних характеристик. Це дослідження встановлює наукові критерії відбору методів випробувань за різних робочих умов, забезпечуючи фундаментальну наукову основу для розроблення єдиних стандартів модальних випробувань вантажних вагонів.

Встановлено причини раннього розтріскування зварних швів боковини бункера вагона за умов механізованого вібраційного розвантаження [7]. Дослідження показало, що локальна власна частота першого порядку вихідної конструкції боковини була близькою до робочої частоти розвантажувального обладнання, що викликало резонансні явища. За допомогою числового моделювання та натурних експериментів розроблено конструкцію кузова, яка дає змогу уникати резонансу і втомних явищ без збільшення товщини пластини.

Розроблено ефективну методологію калібрування та валідації числової моделі вантажного вагона на основі динамічного випробування в реальних умовах експлуатації [8]. Дані, отримані в результаті динамічного випробування, використані для ідентифікації модальних параметрів кузова, а саме частот, форм мод і коефіцієнтів демпфування, а також отримання часових записів прискорень і переміщень.

Напрям підвищення ефективності розвантаження через підбирання частоти змушувальної сили нині є мало дослідженим. Саме тому нами було ухвалено рішення про побудову вібраційного стенда.

Нами отриманий патент України на корисну модель «Вібратор двочастотний з постійною амплітудою змушувальної сили» [9]. Пристрій може працювати у двох частотних режимах, але з однаковою амплітудою змушувальної сили. Дебаланс вібратора складається з двох частин. Конструкція забезпечує постійне значення амплітуди змушувальної сили у двох частотних режимах через зміну напрямку

обертання і взаємного положення центрів мас частин дебалансу без застосування додаткових силових приводів.

Найближчим за призначенням і конструкцією до пропонованого стенда є вібраційний стенд, який імітує кришку надвізкового люка напіввагона в процесі її вібраційного розвантаження (рис. 2). Двигун постійного струму з дебалансом закріплений на підпружиненій платформі. Струм подають від блока живлення з плавним регулюванням напруги в межах від 0 до 15 В. Частоту обертання двигуна контролюють за допомогою тахометра.



Рис. 2. Існуючий вібраційний стенд [1]

Стенд побудований на кафедрі машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. На цьому стенді проведені дослідження впливу частоти змушувальної сили на час розвантаження насипних вантажів із напіввагонів накладними вібраційними машинами методом фізичного моделювання [1], під час яких визначили недоліки стенда:

- змоделювали кришку лише одного люка, тому форма поперечного перерізу призми вантажу не відповідає натурі;

- кришка люка, хоча і має регульований куту нахилу, але під час вібрації жорстко закріплена на підпружиненій частині;

- коливання є круговими, а не направленими, як у натурній машині;

- частоту вібрації регулює напруга, що подана на електродвигун, зворотний зв’язок відсутній.

Стенд спроєктований із дотриманням умови, що режими коливань не збігаються з частотами збудження, оскільки це може поставити під загрозу експериментальні результати, як зазначено в статті [10].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є розроблення фізичної моделі частини кузова напіввагона у вигляді вібраційного стенда для подальших лабораторних досліджень у напрямі вдосконалення вібраційного методу розвантаження насипних вантажів із напіввагонів.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- розробити схему конструкції стенда;

- за теорією подібності у фізичному моделюванні визначити потрібні параметри стенда;

- розробити робочу документацію для виготовлення стенда.

Основна частина дослідження. Пропонований стенд (рис. 3) містить нерухому платформу 1, на стійках 2 якої на чотирьох гумових стрічках 3 підвішена коливальна платформа 4. На стійках 5 коливальної платформи змонтована модель частини напіввагона, що містить хребтову балку 6, дві поперечні балки 7 і пару шарнірно закріплених кришок люків 8, що спираються на кронштейни 9. Для виставлення заданого кута нахилу кришок люків кронштейни 9 виконані регульованими. Положення кронштейнів визначає максимальний кут відкриття кришки люка, не обмежуючи при цьому мінімальний кут, що дає змогу моделювати вільний рух кришки натурного напіввагона. На поперечній балці нанесена шкала 10 у градусах, а на кришці люка – стрілочний покажчик 11.

Для забезпечення спрямованості коливань стенд оснащений одноступінчастою зубчастою передачею 12 із вальничними вузлами 13, які є втулками переднього колеса велосипеда. Передавальне число передачі дорівнює 1. На пластикових зубчастих колесах, які виконані з ABS-пластику з використанням адитивної технології за допомогою екструзійного 3D-принтера, встановлені дебаланси 14 з можливістю регулювання їхньої маси. Така конструкція забезпечує спрямовані у вертикальному напрямку коливання. Щоб мати змогу регулювати масу, яка коливається, на коливальній платформі встановлені набірні баластові вантажі 15. Для захисту від потрапляння частинок вантажу зубчаста передача закрита прозорим пластиковим кожухом 16. Стенд змонтований на дерев'яній основі 17. Металоконструкція стенда виготовлена в масштабі розмірів 1:10 із листової сталі 08кп [11] товщиною 1 мм.

Один із валів, на якому посаджене зубчасте колесо, з'єднаний гнучким валом 18 із валом електродвигуна 19, який жорстко встановлений на основі. Електродвигун має комп'ютерне керування частотою обертання.

Розроблення робочої документації для виготовлення стенда

Потрібної жорсткості гумової стрічки 3 можна досягти, змінюючи її ширину або довжину. Жорсткість стрічки перевіряють на окремому стенді (рис. 4), який змонтований на дерев'яній основі 1. Стенд містить стійку 2 і кронштейни 3, через які проходить натяжна шпилька 4 зі з'єднувальною скобою 5. Гумова стрічка 6 на кінцях закріплена затискачами 7 і 8. Затискач 7 прикручений до стійки 2, а затискач 8 одітий на гак динамометра 9, який приєднаний до скоби 5. Для зменшення сили тертя під динамометр підкладені котки 10 у вигляді звичайних стрижнів. На основі також закріплена лінійка 11 з можливістю її пересування вздовж осі стенда для виставляння «на нуль». Скоба 5 оснащена покажчиком 12, стрілка якого розміщений над шкалою лінійки. Натяг гумової стрічки змінюється обертанням гайки 13.

Перейдемо до визначення потрібних параметрів стенда. Власна кругова частота коливань системи, $с^{-1}$,

$$\omega_{\text{вл}} = \sqrt{\frac{c}{m}}, \qquad (1)$$

де c – жорсткість підвіски, Н/м. Для натурного вагона це жорсткість ресорних комплектів двох візків, а для стенда – жорсткість чотирьох гумових стрічок;

m – маса, що коливається, кг.

Власна лінійна частота коливань, Гц,

$$\nu_{\text{вл}} = \frac{\omega_{\text{вл}}}{2 \cdot \pi}. \qquad (2)$$

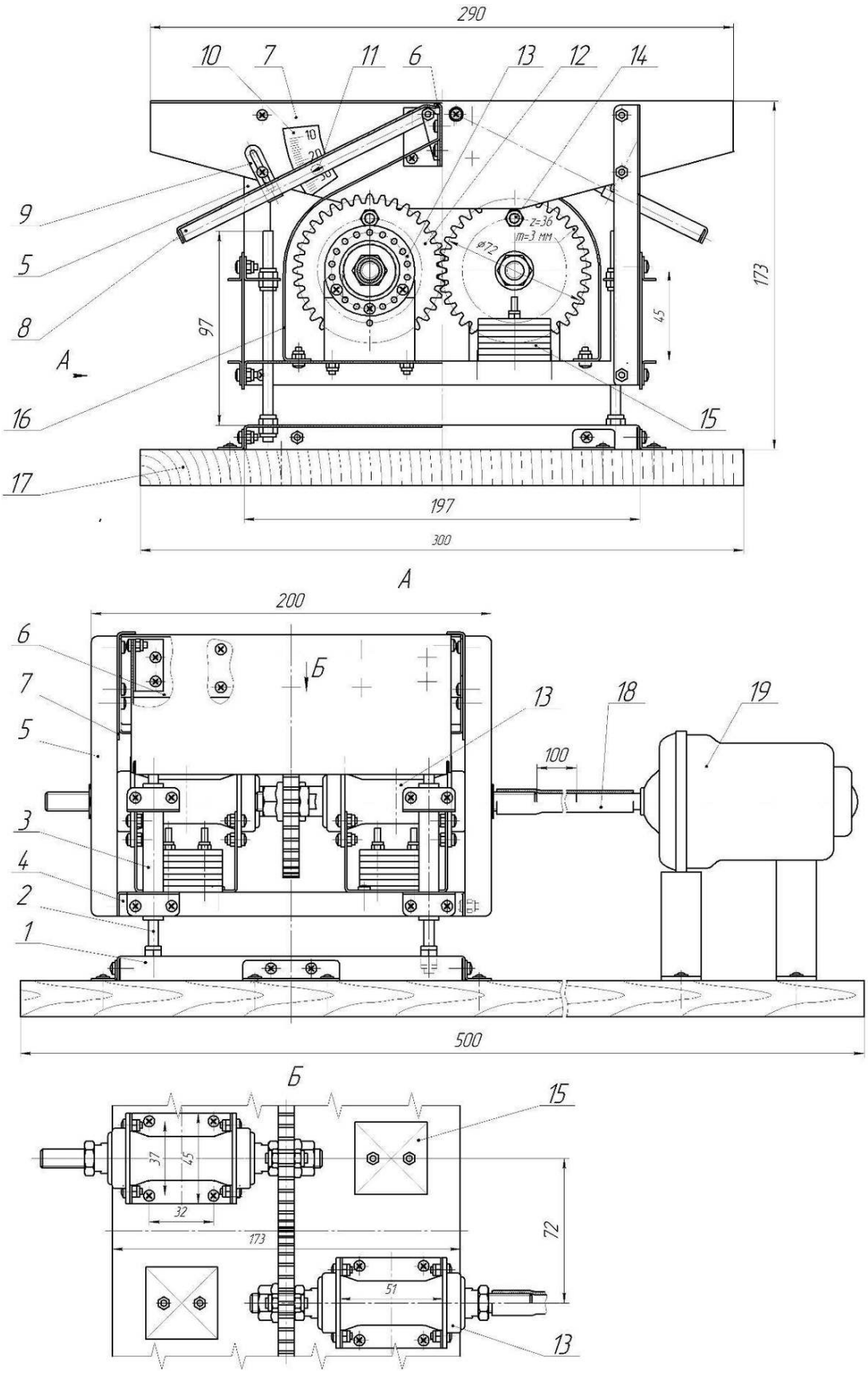


Рис. 3. Пропонований вібраційний стенд

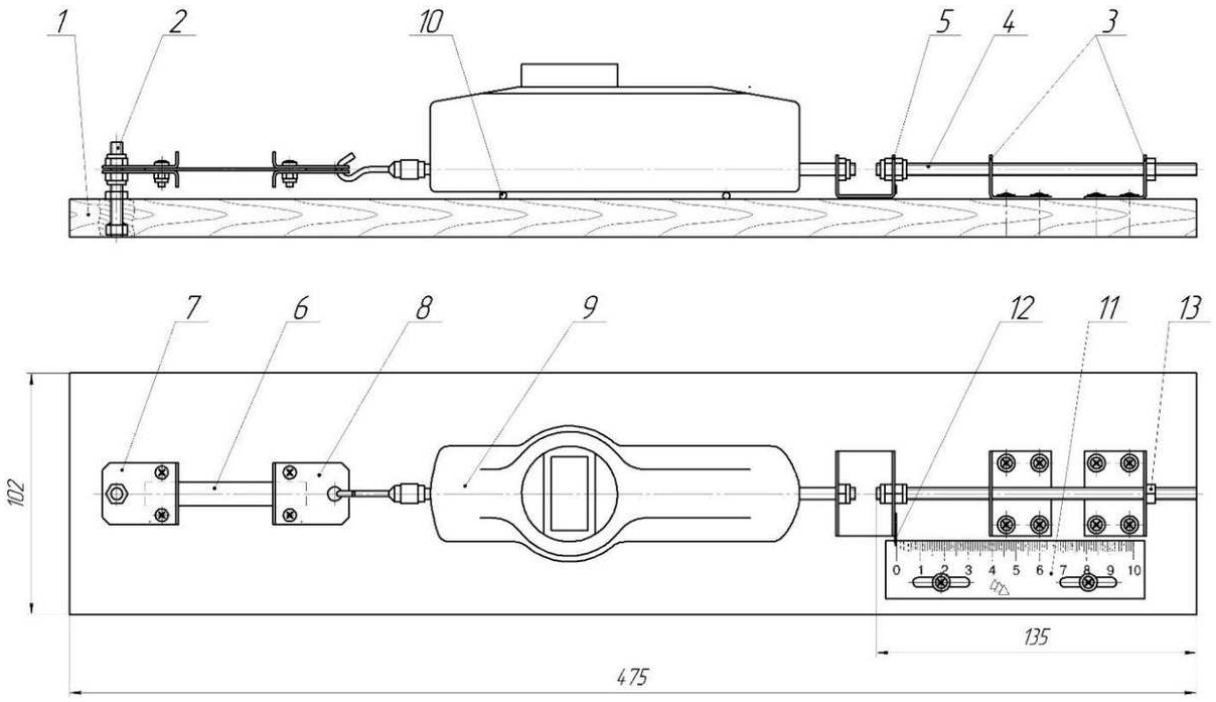


Рис. 4. Пропонований стенд для визначення жорсткості гумової стрічки

Виділяють такі частоти:

а) власна частота коливань кузова напіввагона;

б) власна частота коливальної системи «кузов напіввагона – вібромашина»;

в) власна частота коливальної системи «кузов напіввагона – вібромашина – вантаж», яка змінюється протягом вібророзвантаження та наприкінці зрівнюється з частотою коливальної системи «кузов напіввагона – вібромашина», що ілюструє графік на рис. 5. Емпіричний закон зміни маси вантажу у вагоні протягом розвантаження взятий із робіт [1, 12].

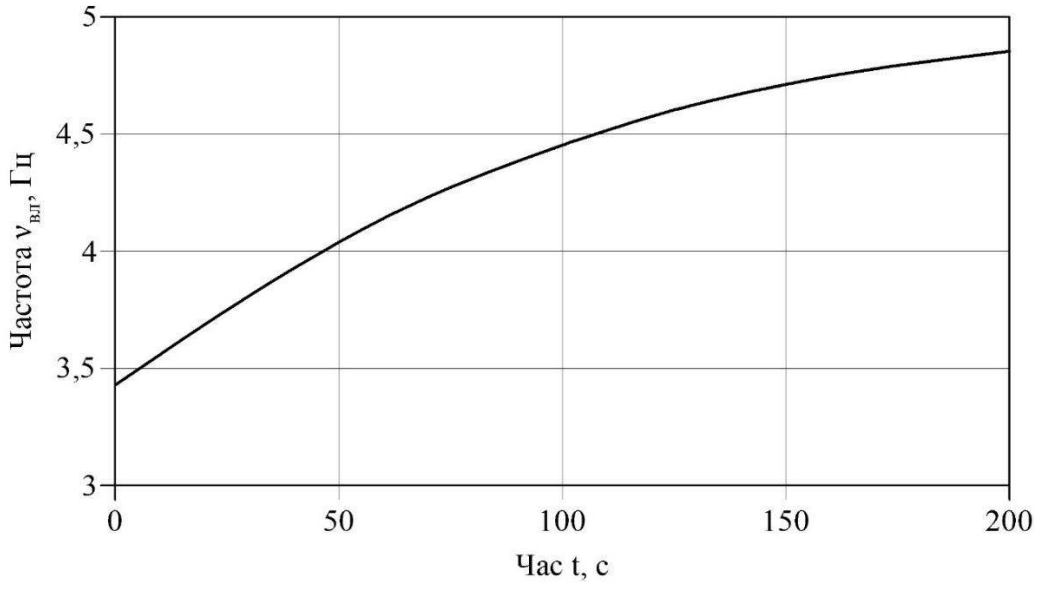


Рис. 5. Графік зміни власної частоти коливальної системи «кузов напіввагона – вібромашина – вантаж» протягом вібророзвантаження 20 т піску

Слід зазначити, що під терміном «кузов напіввагона» ми розуміємо обресорену частину вагона, до якої належать елементи, що спираються на колію через ресорні комплекти (надресорні балки візків, кузов вагона з обшивкою, хребтовою, кінцевими, шворневими та проміжними балками, кришки розвантажувальних люків, тягово-зчіпні пристрої, інше обладнання, що встановлене на рамі вагона).

За теорією подібності, у фізичному моделюванні [13] власні частоти коливань моделі і натури мають співпадати. Приймаємо, що власна частота коливань стенда співпадає з власною частотою коливальної системи «кузов напіввагона – вібромашина». Тоді потрібна жорсткість підвіски (чотирьох гумових стрічок) стенда з формули (1), Н/м,

$$c_{\text{п.потр.}} = m \cdot \omega_{\text{вл.}}^2, \qquad (3)$$

де m – маса частини стенда, що підвішена на гумових стрічках, кг;

$\omega_{\text{вл}}$ – власна кругова частота коливальної системи «кузов напіввагона – вібромашина», с$^{-1}$.

Модуль пружності гуми E, із якої виготовлені стрічки, визначають у такий спосіб. Стрічку товщиною s і з попередньо вибраними довільними шириною $b_{\text{д}}$ і довжиною $l_{\text{д}}$ встановлюють на стенд (рис. 4) і проводять серію дослідів із визначення зусилля F, необхідного для її розтягування на певну величину $\Delta l_{\text{д}}$. Тоді модуль пружності гуми, Па,

$$E = \frac{F \cdot l_{\text{д}}}{\Delta l_{\text{д}} \cdot s \cdot b_{\text{д}}}. \qquad (4)$$

Потрібна жорсткість гумової стрічки, Н/м,

$$c_{\text{с.потр.}} = \frac{c_{\text{п.потр.}}}{4}. \qquad (5)$$

Жорсткість гумової стрічки, Н/м,

$$c_{\text{с}} = \frac{E \cdot b \cdot s}{l}, \qquad (6)$$

де E – модуль пружності гуми, Па;

b, s, l – відповідно ширина, товщина і довжина стрічки, м.

Задавшись товщиною і довжиною стрічки, можна визначити її потрібну ширину з формули (6), м:

$$b = \frac{c_{\text{с.потр.}} \cdot l}{E \cdot s}, \qquad (7)$$

Остаточно жорсткість стрічки перевіряють випробуванням на стенді (рис. 4). У випадку відхилення від потрібного значення (формула (5)) корегують довжину або ширину стрічки.

Амплітуда переміщень під час вібрації, м,

$$x = \left| \frac{H}{2 \cdot c - m \cdot \omega^2} \right|, \qquad (8)$$

де H – амплітуда змушувальної сили. Для стенда приймаємо H = 10 Н;

ω – кругова частота вимушених коливань, с$^{-1}$. Для стенда приймаємо такою ж, як і в натурного вагона.

За теорією подібності [13], амплітуда переміщень підвішеної частини стенда має дорівнювати амплітуді натурного вагона.

Амплітуда змушувальної сили, Н,

$$H = m_{\text{д}} \cdot e \cdot \omega^2, \qquad (9)$$

де $m_{\text{д}}$ – загальна маса дебалансів, кг;

e – ексцентриситет (відстань від осі обертання до центра маси дебалансу), м.

Потрібна маса двох дебалансів стенда (позиція 14 на рис. 3) із формули (9), кг,

$$m_{\text{д}} = \frac{H}{e \cdot \omega^2}. \qquad (10)$$

Результати розрахунків параметрів стенда подані в таблиці. Параметри натурного напіввагона взято з роботи [1].

Таблиця

Характеристики натурного напіввагона і вібраційного стенда

Показник	Значення	
	для натури	для стенда
1. Маса, що коливається, кг		
1.1. Кузов напіввагона	12500	-
1.2. Система «кузов напіввагона – вібромашина»	18000	2,06
1.3. Система «кузов напіввагона – вібромашина – вантаж» (на початку розвантаження)	25864	2,96
2. Жорсткість підвіски, Н/м	17700000	2026
3. Власна частота коливань системи, $с^{-1}$ (Гц)		
3.1. Кузов напіввагона	38 (6)	-
3.2. Система «кузов напіввагона – вібромашина»	31 (5)	31 (5)
3.3. Система «кузов напіввагона – вібромашина – вантаж» (на початку розвантаження)	26 (4)	26 (4)
4. Частота вимушених коливань, $с^{-1}$ (Гц)	157 (25)	регульована: від 44 (7)[1)] до 157 (25)
5. Амплітуда змушувальної сили, Н	88000	10
6. Маса одного дебалансу, г	-	8
7. Відстань від осі обертання до центра маси дебалансу, мм	-	26

Примітка. [1)] Значення 7 Гц взято, виходячи з умови $f_{вл} \cdot \sqrt{2}$, де $f_{вл}$ – власна частота системи «кузов напіввагона – вібромашина», $f_{вл} \approx 5$ Гц. Коефіцієнт $\sqrt{2}$ взято з джерела [14].

Висновки:

1. Розроблено конструкцію вібраційного стенда, призначеного для лабораторних досліджень у напрямі вдосконалення вібраційного методу розвантаження насипних вантажів із напіввагонів.

2. Виходячи з теорії подібності, у фізичному моделюванні визначені потрібні параметри стенда: маса частини стенда, що коливається, жорсткість підвіски, власна частота коливань і маса дебалансу.

3. Розроблено робочу документацію для виготовлення вібраційного стенда.

4. Передбачено, що в перспективі результати експериментів на пропонованій фізичній моделі стенда допоможуть удосконалити вібраційний метод розвантаження насипних вантажів із напіввагонів.

Список використаних джерел

1. Повороженко, Є. В. (2014). Розробка методів і засобів механізації розвантаження насипних вантажів з урахуванням надійності елементів напіввагонів: дис. … канд. техн. наук: 05.22.20. Харків, 163.

2. Industrial Heavy-Duty Overhead Railcar Shaker. NAVCO. *NAVCO National Air Vibrator Company*. URL: https://navco.us/product/overhead-railcar-shaker/ (date of access: 12.09.2026).

3. Rail Wagon Unloaders Australia. *Vibration Systems & Solutions» (VSS).* URL: https://www.vibrationsystems.com.au/rail-wagon-unloaders (date of access: 12.09.2026).

4. ДСТУ ГОСТ 22235:2015. Вагони вантажні магістральних залізничних доріг колії 1520 мм. Загальні вимоги щодо забезпечення збереження під час завантажувально-розвантажувальних та маневрових робіт (ГОСТ 22235-2010, IDT). Скасування чинності від 2026–01–01. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63882 (дата звернення: 12.09.2026).

5. ДСТУ UIC 577:2008. Вагони вантажні магістральні. Міцність вантажних вагонів (UIC 577:2005, IDT). Чинний від 2010–01–01. URL: http://www.leonorm.com.ua/portal/Default.php?Page=login&ContinueURL=/PORTAL/Default.php?Page=stfull!_!ObjId=2499&ispaid=1 (дата звернення: 12.09.2026).

6. Zhao, C., Xie, S., Song, Q., Li, X., Zhang, H., Zhang, Q., ... & Li, Y. (2026). Multi-Factor Influence Mechanism and Test Method Optimization for Modal Parameters of Railway. Freight Car Body. *Experimental Techniques*, 1-24. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s40799-026-00891-z

7. Zhao, C., Zhou, G., Xie, S., Zhang, H., Chen, S., & Feng, C. (2026). Design method for vibration fatigue suppression of railway freight car body structures and its full-scale vehicle verification. *Scientific Reports*, DOI: https://doi.Org/10.1038/s41598-026-65140-0

8. Bragança, C., Neto, J., Pinto, N., Montenegro, P. A., Ribeiro, D., Carvalho, H., & Calçada, R. (2022). Calibration and validation of a freight wagon dynamic model in operating conditions based on limited experimental data. *Vehicle System Dynamics*, 60(9), 3024-3050. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1933091

9. Вібратор двочастотний з постійною амплітудою змушувальної сили: пат. 163357 Україна, МПК B06B 1/16 (2006.01) / Романович Є. В., Козар Л. М., Козар М. Л.; № u202502276; заявл. 14.05.2025; опубл. 17.06.2026, Бюл. № 24. 6 с. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1929089/ (дата звернення: 12.09.2026).

10. Palmeth, L. H. M., Marin, J. G. A., & Montiel, D. C. P. (2024). Structural and dynamic evaluation of a test bench for mechanical vibrations using finite elements. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 7 (3), 1205–1215. DOI: https://doi.org/10.53894/ijirss.v7i3.3217

11. ДСТУ 7809:2015. Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови. Чинний від 2016–04–01. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64320 (дата звернення: 03.08.2026).

12. Повороженко, Є. В. (2014). Підвищення ефективності використання залізничних напіввагонів шляхом удосконалення вібраційних розвантажувальних машин. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. Харьков: Технологический центр, 3/ 3 (69), 42–47.

13. Кепич, Т. Ю., & Куценко, О. Г. (2004). *Основи теорії подібності та аналізу розмірностей в механіці*: навч. посіб. Київ: КНУ імені Тараса Шевченка, 100. URL: https://mechmat.knu.ua/wp-content/uploads/2018/03/otparm.pdf (дата звернення: 03.08.2026).

14. Воробйов, В. В., Воробйова, Л. Д., & Киба, С. П. (2020). *Основи прикладної теорії коливань* : підручник. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 156.

References

1. Povorozhenko, Ye. V. (2014). Rozrobka metodiv i zasobiv mekhanizatsiyi rozvantazhennya nasypnykh vantazhiv z urakhuvannyam nadiynosti elementiv napivvahoniv [Development of methods and means of mechanization of bulk cargo unloading, taking into account the reliability of the elements of gondola cars] (PhD Thesis). Kharkiv, 163 p. [in Ukrainian].

2. Industrial Heavy-Duty Overhead Railcar Shaker. NAVCO. *NAVCO National Air Vibrator Company*. URL: https://navco.us/product/overhead-railcar-shaker/

3. Rail Wagon Unloaders Australia. *Vibration Systems & Solutions» (VSS).* https://www.vibrationsystems.com.au/rail-wagon-unloaders

4. UkrNDNC. (2015). DSTU 22235:2015. Vahony vantazhni mahistralnykh zaliznychnykh dorih kolii 1520 mm. Zahalni vymohy shchodo zabezpechennia zberezhennia pid chas zavantazhuvalno-rozvantazhuvalnykh ta manevrovykh robit [DSTU 22235:2015. Freight wagons for 1520 mm gauge main-line railways. General requirements for ensuring preservation during loading, unloading, and shunting operations]. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63882 [in Ukrainian].

5. UkrNDNC. (2008). Vahony vantazhni mahistralni. Mitsnist vantazhnykh vahoniv [DSTU UIC 577:2008. Mainline freight wagons. Strength of freight wagons]. http://www.leonorm.com.ua/portal/Default.php?Page=login&ContinueURL=/PORTAL/Default.php ?Page=stfull!_!ObjId=2499&ispaid=1 [in Ukrainian].

6. Zhao, C., Xie, S., Song, Q., Li, X., Zhang, H., Zhang, Q., ... & Li, Y. (2026). Multi-Factor Influence Mechanism and Test Method Optimization for Modal Parameters of Railway Freight Car Body. *Experimental Techniques*, 1-24. https://link.springer.com/article/10.1007/s40799-026-00891-z

7. Zhao, C., Zhou, G., Xie, S., Zhang, H., Chen, S., & Feng, C. (2026). Design method for vibration fatigue suppression of railway freight car body structures and its full-scale vehicle verification. *Scientific Reports*. https://doi.Org/10.1038/s41598-026-65140-0

8. Bragança, C., Neto, J., Pinto, N., Montenegro, P. A., Ribeiro, D., Carvalho, H., & Calçada, R. (2022). Calibration and validation of a freight wagon dynamic model in operating conditions based on limited experimental data. *Vehicle System Dynamics*, *60* (9), 3024-3050. https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1933091

9. Romanovych Ye. V., Kozar L. M., Kozar M. L. (2026). Vibrator dvochastotnyi z postiinoiu amplitudoiu zmushuvalnoi syly [Dual-frequency vibrator with constant driving force amplitude]: pat. 163357 Ukraine, IPC B06B 1/16 (2006.01). No. u202502276; appl. 14.05.2025; publ. 17.06.2026, Bull. No. 24. 6 p. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1929089/ [in Ukrainian].

10. Palmeth, L. H. M., Marin, J. G. A., & Montiel, D. C. P. (2024). Structural and dynamic evaluation of a test bench for mechanical vibrations using finite elements. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 7 (3), 1205–1215. https://doi.org/10.53894/ijirss.v7i3.3217

11. UkrNDNC. (2015). DSTU 7809:2015. Prokat sortovyi, kalibrovanyi zi spetsialnym obroblennyam poverhni z vuhlecevoi yakisnoi konstruktsiinoi stali. Zahalni tekhnichni umovi [DSTU 7809:2015. Quality carbon structural steel calibrated high-grade steel products with special surface treatment. General specifications]. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64320 [in Ukrainian].

12. Povorozhenko, Ye. V. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia zaliznychnykh napivvahoniv shliakhom udoskonalennia vibratsiinykh rozvantazhuvalnykh mashyn [Increasing the efficiency of railway gondolas by improving vibratory unloading machines]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technology,* 3/ 3 (69). Kharkiv: Technology Center. Pp. 42–47. [in Ukrainian].

13. Kepych, T. Yu., Kutsenko, O. H. (2004). Osnovy teorii podibnosti ta analizu rozmirnostei v mekhanitsi [Fundamentals of similarity theory and dimensional analysis in mechanics]: tutorial. Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv. 100 p. https://mechmat.knu.ua/wp-content/uploads/2018/03/otparm.pdf [in Ukrainian].

14. Vorobiov, V. V., Vorobiova, L. D., & Kyba, S. P. (2020). Osnovy prykladnoi teorii kolyvan [Fundamentals of the applied theory of oscillations]. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O. V. 156 p. [in Ukrainian].

Козар Леонід Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3740-6966. Тел.: +38 (050) 302-42-75. E-mail: leokozar@gmail.com.
Романович Євгеній Валентинович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2555-5849. Тел.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: 0674274770@ukr.net.
Євтушенко Андрій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8575-3030. Тел.: +38 (067) 385-62-94. E-mail: ave65@ukr.net.
Козар Микита Леонідович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-8560-5910. Тел.: +38 (050) 402-65-70. E-mail: nikita.kozar@gmail.com.

Kozar Leonid, PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3740-6966. Tel.: +38 (050) 302-42-75. E-mail: leokozar@gmail.com.
Romanovych Yevhenii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2555-5849. Tel.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: 0674274770@ukr.net.
Yevtushenko Andrii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8575-3030.
Tel.:+38 (067) 385-62-94. E-mail: ave65@ukr.net.
Kozar Mykyta, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-8560-5910. Tel.: +38 (050) 402-65-70. E-mail: nikita.kozar@gmail.com.

Дата надходження статті: 05.08.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 14.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 621.9.027:621.793

ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ДЕТАЛЕЙ І РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ШЛЯХОМ ЛАЗЕРНОЇ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНІ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ АДГЕЗІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МАТЕРІАЛІВ ПОКРИТТІВ

Канд. техн. наук Ю. В. Широкий, асист. О. Д. Семененко,
канд. техн. наук М. С. Романов

ENHANCING THE PERFORMANCE OF COMPONENTS AND CUTTING TOOLS THROUGH LASER SURFACE MODIFICATION AND OPTIMIZATION OF THE ADHESIVE INTERACTION OF COATING MATERIALS

PhD (Tech.) Y. V. Shyrokyi, assistant O. D. Semenenko, PhD (Tech.) M. S. Romanov

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.372246

Анотація. *У роботі розглянуто підходи щодо підвищення довговічності деталей машин і різального інструменту шляхом лазерної модифікації поверхневого шару та керування контактними процесами між функціональними покриттями і оброблюваним середовищем. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю збільшення ресурсу інструментального оснащення, зменшення інтенсивності руйнування робочих поверхонь і забезпечення стабільності процесів механічної обробки в умовах високих термомеханічних навантажень.*

Експериментальні дослідження виконано для покриттів Al_2O_3, HfN, 0,2HfN+0,8ZrN, 0,5TiN+0,5AlN, TiN і Mo_2N, нанесених на основу H13A. Як матеріал заготовки використовували сталь 40 після термічного зміцнення до структури сорбіту відпуску з твердістю 40 HRC. Трибологічні характеристики вивчали в температурному інтервалі 700–1000 К. Силові параметри процесу оцінювали з використанням динамометричної системи УД-100 із комп'ютерною реєстрацією сигналів, що забезпечило визначення зміни навантажень у часі. Стан інструменту контролювали методами інструментальної та оптичної мікроскопії, а геометричні характеристики зон руйнування аналізували профілометричними засобами.

У результаті встановлено залежність інтенсивності руйнування поверхневих шарів від особливостей адгезійної взаємодії контактуючих матеріалів. Показано, що зменшення різниці електронегативностей сприяє зниженню чистого зносу та покращенню експлуатаційних характеристик інструментальних пластин. Виявлено особливості розвитку пошкоджень передньої поверхні, що проявляються у формуванні локальних зон руйнування з подальшим їх об'єднанням без істотних втрат захисних властивостей у зоні різальної кромки. Отримані результати підтверджують доцільність комплексного використання лазерної обробки та оптимізації складу покриттів для підвищення ресурсу деталей і забезпечення ефективності процесів різання.

Ключові слова: *лазерна модифікація поверхні, адгезійна взаємодія, комбіновані покриття, різальний інструмент, зносостійкість, ресурс, працездатність, інтенсивність зношування.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Широкий Ю. В., Семененко О. Д., Романов М. С., 2026.

Abstract. *The paper considers approaches to improving the service life of machine components and cutting tools through laser modification of the surface layer and control of contact processes between functional coatings and the workpiece material. The relevance of the study is determined by the need to increase the service life of tooling, reduce the intensity of damage to working surfaces, and ensure the stability of machining processes under high thermomechanical loads.*

Experimental studies were performed for Al_2O_3, HfN, 0.2HfN+0.8ZrN, 0.5TiN+0.5AlN, TiN, and Mo_2N coatings deposited on an H13A substrate. AISI 1040 steel was used as the workpiece material after heat treatment to obtain a tempered sorbite structure with a hardness of 40 HRC. The tribological characteristics were studied in the temperature range of 700–1000 K. The force parameters of the cutting process were evaluated using a UD-100 dynamometric system with computer-based signal recording, which enabled the determination of load variations over time. The condition of the cutting tool was examined using instrumental and optical microscopy, while the geometric characteristics of the damaged areas were analyzed using profilometric techniques.

The results revealed a relationship between the intensity of surface-layer damage and the characteristics of adhesive interaction between the contacting materials. It was demonstrated that a decrease in the difference in electronegativities contributes to a reduction in net wear and an improvement in the operational characteristics of cutting inserts. Specific features of damage development on the rake surface were identified, manifested in the formation of localized damage zones followed by their coalescence without significant loss of protective properties in the cutting-edge region. The obtained results confirm the feasibility of the combined application of laser surface treatment and optimization of coating composition to increase the service life of components and ensure the efficiency of cutting processes.

Keywords: *laser surface modification, adhesive interaction, multilayer coatings, cutting tool, wear resistance, service life, performance, wear intensity.*

Вступ. Підвищення працездатності деталей машин і різального інструменту є одним із важливих напрямів розвитку сучасного машинобудування, авіаційної, енергетичної та металообробної галузей. В умовах постійного зростання вимог щодо продуктивності, точності обробки та довговічності технологічного оснащення особливого значення набуває забезпечення високої зносостійкості, термічної стабільності та надійності контактуючих поверхонь деталей і різального інструменту.

Одним із найбільш ефективних підходів щодо вирішення зазначених завдань є застосування функціональних поверхневих покриттів, зокрема покриттів, отриманих методом фізичного осадження з парової фази (PVD). Такі покриття дають змогу істотно покращити експлуатаційні характеристики виробів за рахунок підвищення твердості поверхневого шару, зменшення коефіцієнта тертя, збільшення опору абразивному та адгезійному зношуванню. Проте ефективність використання покриттів значною мірою визначено характером їхньої взаємодії з матеріалом основи та умовами формування міжфазної межі.

Однією з основних причин передчасної втрати працездатності деталей і різального інструменту є недостатня адгезійна міцність системи «основа–покриття», що призводить до локального руйнування поверхневого шару, появи тріщин, відшарування покриття, інтенсивного зношування в умовах контактного навантаження. Тому актуальним напрямом досліджень є розроблення методів керованої модифікації поверхні, спрямованих на оптимізацію адгезійної взаємодії матеріалів і формування стабільних функціональних поверхневих структур.

Серед сучасних технологій поверхневої інженерії перспективним рішенням є застосування лазерної обробки,

зокрема фемтосекундної лазерної модифікації поверхні. Завдяки надкороткій тривалості імпульсів така технологія забезпечує локалізоване передавання енергії з мінімальним тепловим впливом на матеріал і дає змогу цілеспрямовано змінювати морфологію, мікрорельєф і фізико-хімічний стан поверхневих шарів. Це створює передумови для керування процесами змочування, контактної взаємодії, адгезії покриттів і трибологічними характеристиками поверхонь.

Комплексне поєднання технологій нанесення PVD-покриттів із подальшою лазерною модифікацією поверхні відкриває можливість формування багатофункціональних поверхневих структур із покращеними експлуатаційними властивостями. Дослідження впливу параметрів лазерної обробки на адгезійну взаємодію матеріалів покриттів, процеси тертя і зношування, а також напружено-деформований і температурний стан контактної зони є актуальним науково-практичним завданням.

У зв'язку з цим метою цієї роботи є підвищення працездатності деталей і різального інструменту шляхом лазерної модифікації поверхні та оптимізації адгезійної взаємодії матеріалів покриттів із забезпеченням покращення трибологічних і експлуатаційних характеристик поверхневих шарів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин і різального інструменту значною мірою визначено ефективністю формування поверхневого шару та характером адгезійної взаємодії між матеріалом основи та функціональним покриттям. У зв'язку з цим значна кількість сучасних досліджень присвячена розробленню методів керування станом поверхні для покращення міцності зчеплення покриттів, зменшення інтенсивності зношування та підвищення довговічності інструментальних систем.

Для посилення адгезії на межі поділу матеріалів дослідниками запропоновано широкий спектр підходів, серед яких механічне формування мікрорельєфу поверхні, хімічна модифікація та плазмова активація поверхневого шару [1–10]. Однак зазначені методи не завжди забезпечують необхідний рівень керованості морфологією поверхні і стабільності сформованих структур.

Серед сучасних технологій поверхневої інженерії особливий інтерес викликає лазерне поверхневе текстурування (Laser Surface Texturing, LST), яке дає змогу формувати регулярні мікро- та наноструктури з високою точністю геометричних параметрів [11, 12]. Найбільш перспективним напрямом розвитку цієї технології є використання фемтосекундного лазерного текстурування (fs-LST), що має надкоротку тривалість імпульсів і мінімальну зону термічного впливу.

Встановлено, що застосування fs-LST забезпечує формування керованої топографії поверхні без суттєвого термічного пошкодження матеріалу підкладки. Порівняно з традиційною лазерною обробкою в наносекундному режимі фемтосекундна обробка суттєво зменшує інтенсивність окиснення, фазових перетворень та утворення мікротріщин у твердосплавних матеріалах типу WC–Co [13]. Одночасно зі зміною мікрогеометрії поверхні спостерігають збільшення поверхневої енергії та формування активних центрів зародження, що позитивно впливає на процеси росту покриттів під час фізичного осадження з парової фази (PVD).

За даними низки досліджень, сформовані фемтосекундним лазером поверхневі текстури у вигляді канавок, заглиблень і гребенів сприяють механічному заклинюванню (інтерлокінгу) між покриттям і підкладкою, покращують передавання навантаження та зменшують імовірність розвитку тріщин уздовж межі поділу [14]. При цьому параметри геометрії текстури — глибина, крок і просторовий рисунок — безпосередньо впливають на трибологічні характеристики системи. У

роботах [15, 16] показано, що оптимізована тривимірна конфігурація текстури допомагає знизити коефіцієнт тертя і відтермінувати початок інтенсивного зношування.

Крім геометричних ефектів, дослідники відзначають виникнення фізико-хімічних змін у приповерхневому шарі після fs-LST. Зокрема, повідомлено про локальне зменшення вмісту вуглецю та формування метастабільних карбідних фаз типу WC_{1-x}, які сприяють покращенню міжфазної взаємодії та зменшенню міжфазної енергії в системі покриття–підкладка [17]. Також лазерна модифікація спричиняє подрібнення зеренної структури та збільшення густини дислокацій, що додатково підвищує твердість поверхневого шару та його опір втомному руйнуванню [17, 18].

Окремий напрям досліджень присвячений аналізу впливу змочуваності поверхні на формування покриттів. Встановлено, що текстуровані поверхні демонструють нижчі значення кута змочування порівняно з полірованими поверхнями WC–Co, що свідчить про підвищення поверхневої активності та покращення умов адгезії покриттів [19]. Аналогічні результати отримані для покриттів TiAlN, де покращення змочуваності супроводжено формуванням більш щільної та дрібнозернистої структури [20].

Особливу увагу останнім часом приділяють аналізу впливу послідовності лазерного текстурування відносно процесу нанесення покриття. Застосування fs-LST до нанесення покриття (BC – before coating) забезпечує краще повторення геометрії текстури матеріалом покриття і сприяє формуванню більш міцного міжфазного контакту [21]. Водночас лазерна обробка після нанесення покриття (AC – after coating) забезпечує ширші можливості функціоналізації поверхні, але супроводжено ризиком локального руйнування покриття, виникненням мікротріщин і термічно індукованих дефектів [22, 23].

Разом із тим аналіз наявних робіт показує, що більшість досліджень розглядає вплив лазерного текстурування, адгезії покриттів і трибологічних характеристик окремо. Недостатньо вивченими залишаються питання комплексного впливу лазерної модифікації поверхні на формування адгезійних зв'язків, еволюцію морфології покриття, розподіл температурних і силових навантажень у зоні контакту і їхній сукупний вплив на працездатність деталей і різального інструменту. Крім того, відсутній системний аналіз взаємозв'язку між послідовністю текстурування, структурним станом поверхневого шару та механізмами руйнування в умовах реальної механічної обробки.

Отже, актуальним науковим завданням є дослідження впливу лазерної модифікації поверхні та оптимізації адгезійної взаємодії матеріалів покриттів на підвищення працездатності деталей і різального інструменту з урахуванням трибомеханічних і теплофізичних процесів у контактній зоні.

Визначення мети та задач дослідження. Метою дослідження є підвищення працездатності деталей і різального інструменту шляхом лазерної модифікації поверхні та оптимізації адгезійної взаємодії матеріалів покриттів із контактуючими поверхнями в умовах механічної обробки.

Для досягнення поставленої мети виконували комплексне дослідження трибологічних, адгезійних та експлуатаційних характеристик різального інструменту з функціональними покриттями різного складу.

Об'єктом дослідження є процеси формування та реалізації адгезійної взаємодії в системі «покриття – різальний інструмент – оброблюваний матеріал» під час механічної обробки.

Предметом дослідження є вплив складу покриття і параметрів модифікації поверхні на коефіцієнт тертя, сили різання, інтенсивність зношування та працездатність різального інструменту.

У роботі досліджували покриття складу Al_2O_3, HfN, 0,2HfN+0,8ZrN, 0,5TiN+0,5AlN, TiN, Mo_2N, нанесені на основу різального інструменту H13A. Як оброблюваний матеріал використана сталь 40.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання дослідження:

1. Проаналізувати вплив складу покриттів на адгезійну взаємодію між поверхнею різального інструменту та оброблюваним матеріалом.
2. Дослідити закономірності зношування різального інструменту за параметрами зносу по задній поверхні та геометричними характеристиками лунки на передній поверхні.
3. Оцінити ефективність використання багатокомпонентного покриття 0,2HfN+0,8ZrN, нанесеного на пластини H13A, під час точіння сталі 40 після лазерної обробки.
4. Визначити взаємозв'язок між параметрами поверхневої модифікації, адгезійними характеристиками та показниками довговічності різального інструменту.

Експериментальні дослідження виконували з точінням на токарному верстаті за таких режимів різання: частота обертання n = 630 об/хв, глибина різання t = 0,5 мм, подача S = 0,15 мм/об. Знос інструменту визначали із застосуванням інструментального та оптичного мікроскопів, а параметри лунки контролювали профілометричними методами.

Основна частина

Дослідження виконано в межах наукової школи Г. І. Костюка та є продовженням започаткованого ним наукового напряму, пов'язаного з підвищенням працездатності, надійності та довговічності деталей машин і різального інструменту цілеспрямованим формуванням і модифікацією їхніх поверхневих шарів. Розвиток цього напряму в роботі відбувався через поєднання лазерної модифікації поверхні різального інструменту з нанесенням функціональних покриттів різного складу та дослідження адгезійної взаємодії в системі «покриття – різальний інструмент – оброблюваний матеріал».

Для дослідження впливу лазерної модифікації поверхні на адгезійну взаємодію матеріалів покриттів і підвищення працездатності деталей і різального інструменту було реалізовано експериментальну схему, наведену на рис. 1, 2 [1]. Дослідження проводили для двох технологічних маршрутів обробки поверхні, що відрізнялися послідовністю виконання операцій нанесення покриття і лазерного текстурування.

На рис. 1 зображено маршрут технологічного процесу, у якому лазерна модифікація здійснювана після формування покриття методом PVD. Такий підхід орієнтований не на зміну умов нанесення покриття, а на подальше керування функціональними властивостями вже сформованого поверхневого шару [1].

Особливістю такої конфігурації є те, що лазерна дія спрямована безпосередньо на покриту поверхню та дає змогу локально змінювати її морфологію, мікрогеометрію та енергетичний стан без необхідності корегування параметрів самого процесу осадження. У результаті сформована додаткова поверхнева структура, яка може впливати на характер контактної взаємодії, умови тертя і розподіл механічних навантажень.

Застосування фемтосекундного лазерного випромінювання після нанесення покриття створює можливість локальної функціоналізації поверхні та формування регулярних текстур без суттєвого теплового впливу на матеріал основи. При цьому змінюються умови контакту в зоні взаємодії інструмента і оброблюваного матеріалу, що може сприяти зниженню коефіцієнта тертя, стабілізації процесу різання та покращенню умов тепловідведення.

Для оцінювання ефективності такого маршруту передбачено аналіз трибологічних характеристик, визначення адгезійної стійкості покриття після

лазерного впливу, дослідження змочуваності та морфологічних змін поверхні. Додатково проводили чисельний аналіз температурних і силових процесів, що дає змогу встановити вплив лазерної модифікації на експлуатаційні характеристики покритої поверхні.

Схема маршруту технологічного процесу передбачає попереднє фемтосекундне лазерне текстурування поверхні з наступним нанесенням покриття методом PVD і розглянута як інструмент керування властивостями вже сформованого покриття цілеспрямованою зміною стану його поверхневого шару.

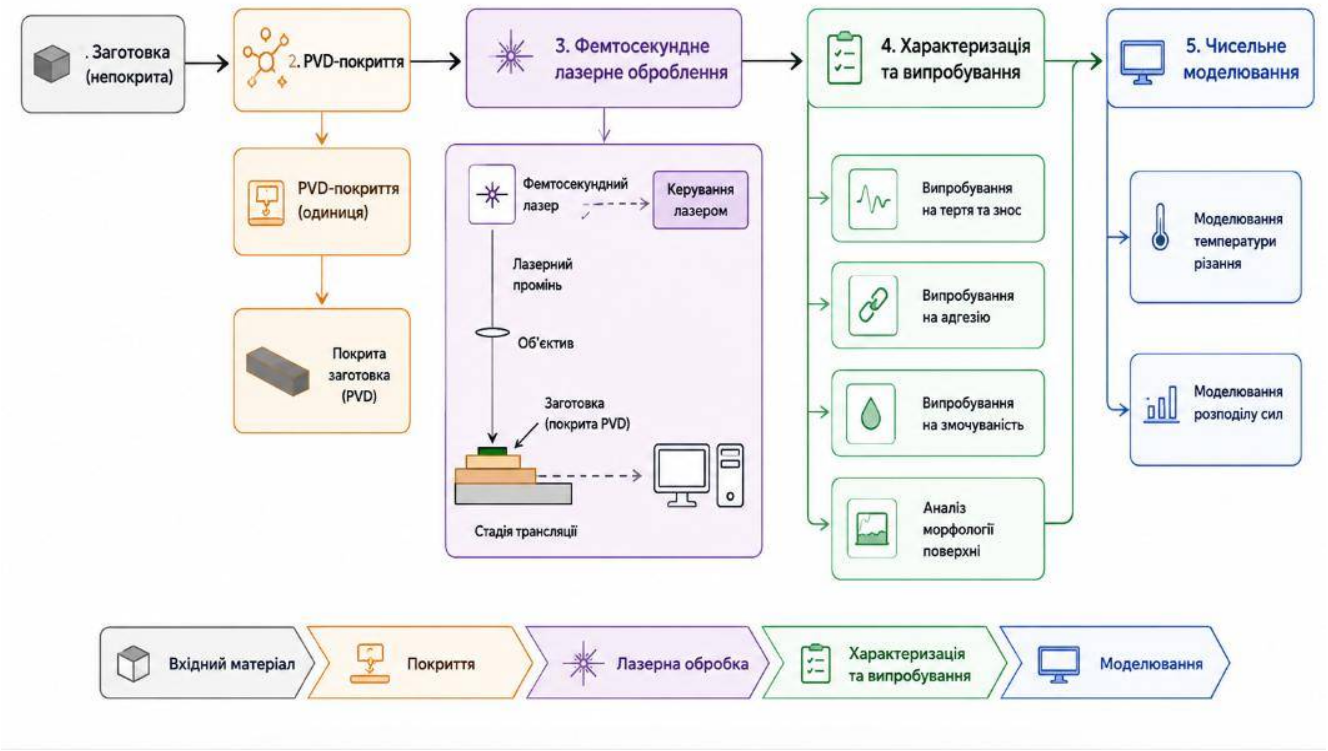


Рис. 1. Блок-схема технологічного маршруту конфігурації АС, що передбачає лазерну обробку після нанесення покриття [1]

На рис. 2 показано маршрут технологічного процесу, який передбачає виконання фемтосекундної лазерної модифікації до нанесення PVD-покриття. На відміну від попередньої конфігурації, основною метою цього підходу є не функціоналізація покриття, а керування процесами його формування та забезпечення сприятливих умов адгезійної взаємодії між покриттям і матеріалом основи [1].

Попереднє лазерне текстурування дає змогу змінити топографію поверхні підкладки через створення контрольованого мікрорельєфу. Сформовані структури виконують роль активних зон росту покриття і впливають на механізми зародження і розвитку поверхневого шару під час процесу осадження.

Після нанесення покриття поверхнева структура, сформована лазерною обробкою, інтегрована в систему «основа–покриття», створюючи умови для більш рівномірного розподілу контактних напружень і підвищення механічного закріплення покриття. Одночасно змінюються умови змочування та міжфазної взаємодії, що може сприяти покращенню цілісності поверхневого шару в умовах експлуатаційного навантаження.

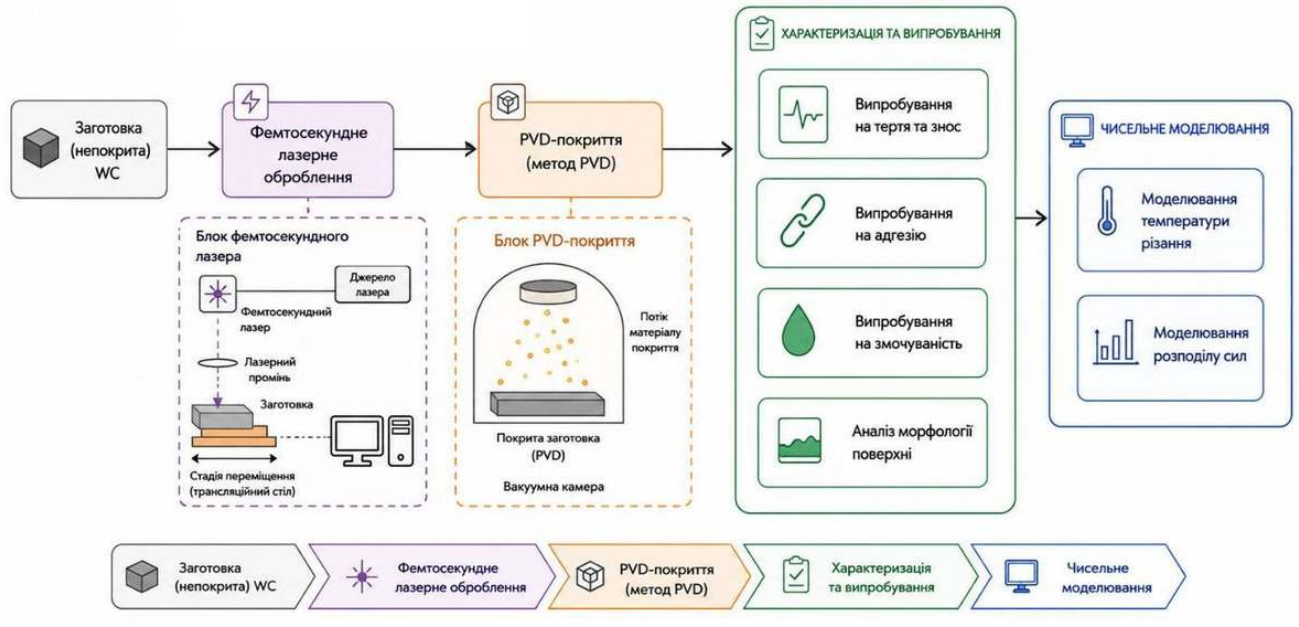


Рис. 2. Блок-схема технологічного маршруту. Конфігурація ВС передбачає нанесення покриття методом CA-PVD після лазерної обробки [1]

Схема маршруту технологічного процесу нанесення покриття методом PVD із подальшою лазерною модифікацією поверхні орієнтована переважно на керування процесом формування покриття і оптимізацію міжфазної взаємодії, що створює передумови для підвищення довговічності та працездатності деталей і різального інструменту.

Підвищення працездатності деталей і різального інструменту суттєво залежить від якості адгезійного зчеплення між функціональним покриттям і матеріалом основи. Одним із найефективніших способів цілеспрямованого регулювання поверхневих властивостей є лазерна модифікація поверхні, яка змінює мікрорельєф, фазовий склад і поверхневу енергію підкладки. Завдяки цьому створено передумови для суттєвого посилення адгезії зносостійких і твердих покриттів (карбідів, нітридів, оксидів), що наносять після лазерного опромінення. У зв'язку з цим важливо мати надійні методи розрахункового визначення енергії адгезії, які дають змогу оптимізувати технологічні режими лазерної обробки і товщину покриттів без масових експериментальних випробувань.

Методи визначення енергії адгезії контактуючих матеріалів

Адгезія характеризує міцність зчеплення між двома різнорідними тілами, наприклад між твердим покриттям і підкладкою після лазерної модифікації її поверхні. Існує декілька теоретичних підходів для наближеного оцінювання адгезійної енергії.

Значний внесок у практичне застосування адгезійних досліджень зробила школа українського матеріалознавства на чолі з Г. І. Костюком. У роботі [2] запропоновано обчислювати енергію адгезії двох різних середовищ через їхню поверхневу енергію, виходячи з рівності енергії адгезії та енергії пружних деформацій, що виникають під час контакту:

$$E_a = \frac{E_{a1}E_{a2}(\kappa_1 + \kappa_2)^2}{E_{a1}\kappa_2^2 + E_{a2}\kappa_1^2}, \qquad (1)$$

де Ea_1 і Ea_2 – поверхневі енергії матеріалів;

Коефіцієнти k виражено через коефіцієнти Пуассона ν:

$$\kappa_1 = \frac{\upsilon_1}{1-\upsilon_1},\ \kappa_2 = \frac{\upsilon_2}{1-\upsilon_2},. \qquad (2)$$

Для випадку вільної поверхні (вакуум) поверхневу енергію розраховують за формулою [6]

$$E_a = \frac{3\pi_0^2\gamma}{2b(2\mu+\lambda)}, \qquad (3)$$

де μ і λ – коефіцієнти Ламе;

b – додаткова постійна, що характеризує здатність матеріалу чинити опір розвитку нерівномірності деформацій, зокрема появі вигинів матеріальних волокон і нерівномірності їхнього відносного подовження, може мати також сенс ефективної товщини прикордонного шару, якою концентрована поверхнева енергія;

γ – величина, яка показує, у скільки разів збільшиться поверхня, що концентрує в собі енергію.

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \qquad (4)$$

$$\lambda = \frac{\upsilon E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \qquad (5)$$

де E – модуль пружності речовини;

π_o – натяг поверхневого шару,

$$\pi_0 = \frac{2\mu}{\beta}, \qquad (6)$$

де μ – коефіцієнти Ламе;

β – коефіцієнт пропорційності, який можна визначити через середню міжатомну відстань *l* за такими формулами:

$$\beta = \frac{45}{4l}, \qquad (7)$$

$$l = 1,41l_0, \qquad (8)$$

$$l_0 = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}, \qquad (9)$$

де n – кількість атомів середовища в одиниці обсягу середовища.

Після спрощень отримано практичні вирази

$$E_a = 0,16\mu R, \qquad (10)$$

де R – радіус атома,

або

$$E_a = 8E\cdot 10^{-12},. \qquad (11)$$

Отже, для розрахунку поверхневої енергії ми маємо три придатні методи. На рис. 3 наведено значення енергії адгезії для деяких простих матеріалів та оксиду алюмінію, розраховані різними способами. Поверхнева енергія залежить виключно від властивостей самого матеріалу і не залежить від інших характеристик.

У роботі [5] автор пов'язує енергію Гіббса хімічної реакції з крайовим кутом змочування:

$$E_a = (\cos\theta + 1)\cdot\sigma_{lv}, \qquad (12)$$

де θ – крайовий кут змочування;

σ_{lv} – поверхневий натяг на межі рідина – газ.

Отже, можна визначити енергію адгезії двома способами, використовуючи формули (1) і (12).

На рис. 4 наведено значення енергії адгезії для деяких матеріалів, які були підраховані описаними вище методами.

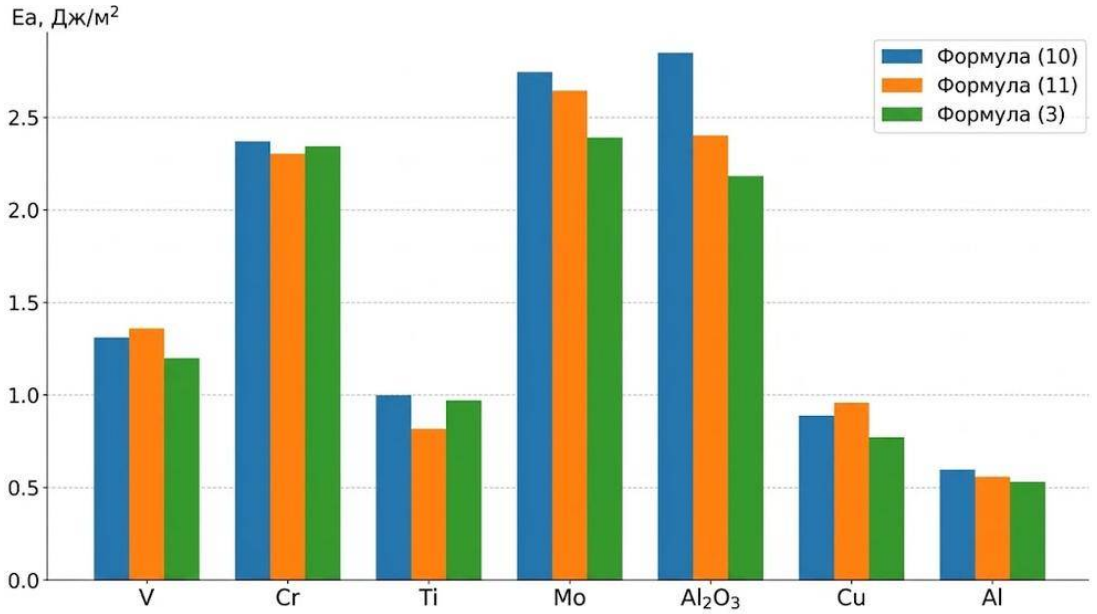


Рис. 3. Залежність поверхневої енергії матеріалів, розрахованих різними способами

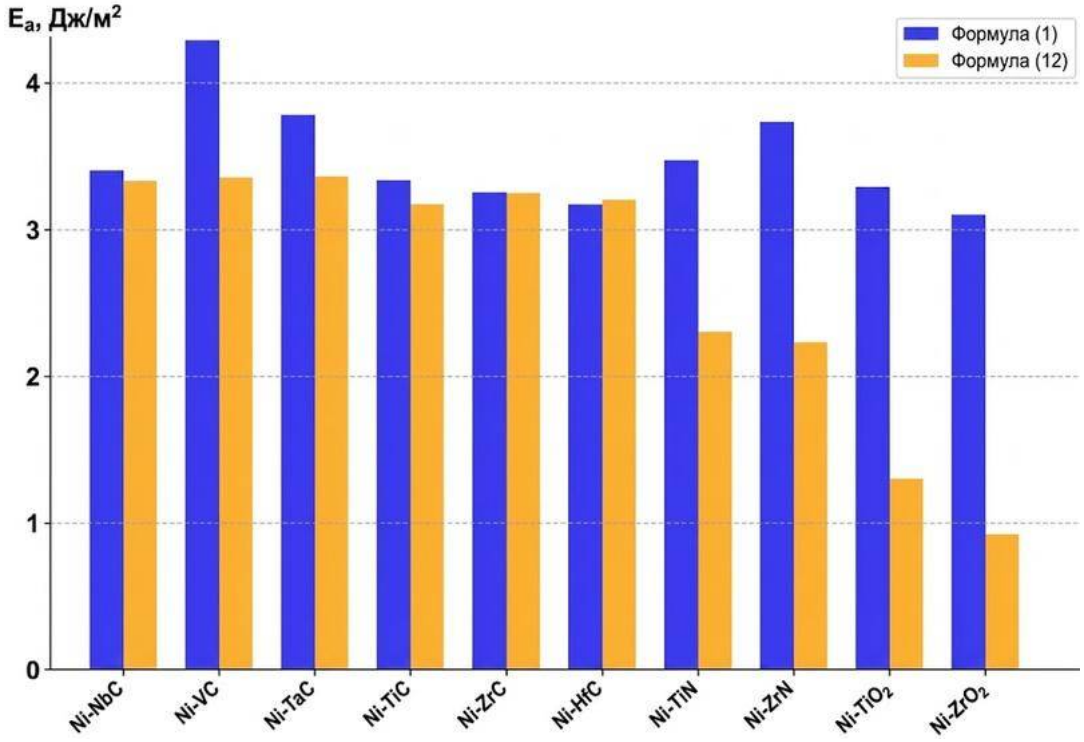


Рис. 4. Значення енергії адгезії для різних матеріалів

Визначення міцності зчеплення та сили адгезії після лазерної модифікації

Для повного опису системи «лазерно-модифікована основа – покриття» необхідно знати силу адгезії та міцність зчеплення σ. Відповідно до [10], зв'язок між ними такий:

$$F_a = \pi\sigma r^2, \qquad (13)$$

де σ – міцність зчеплення;

r – радіус подряпини, отриманий у результаті дії індентора на поверхню підкладки.

Енергія адгезії пов'язана із силою через товщину покриття h і модуль пружності E:

$$F_a = \frac{E_a^2 \cdot h}{\pi r^4 E}, \qquad (14)$$

що дає змогу отримати вираз для міцності зчеплення:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi \mathrm{h}}}\sqrt{E_a \cdot E}. \qquad (15)$$

На рис. 5 наведено результати порівняльного аналізу міцності зчеплення для окремих пар матеріалів «покриття – основний матеріал», сформованих карбідами, нітридами та простими матеріалами, що використовують як підкладку. Значення міцності зчеплення визначені двома способами розрахунку енергії адгезії (E_a) для різних значень товщини міжфазного шару.

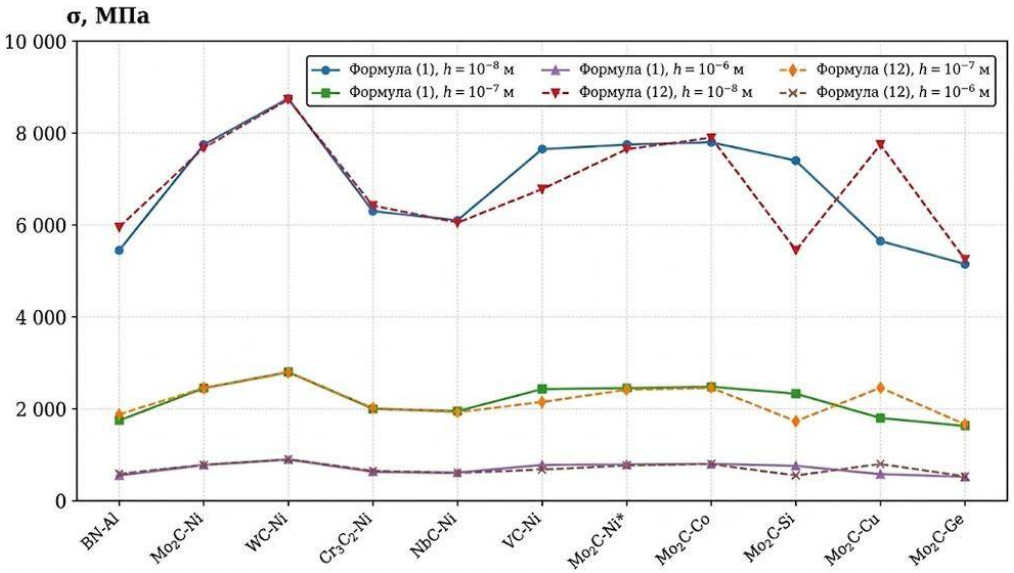
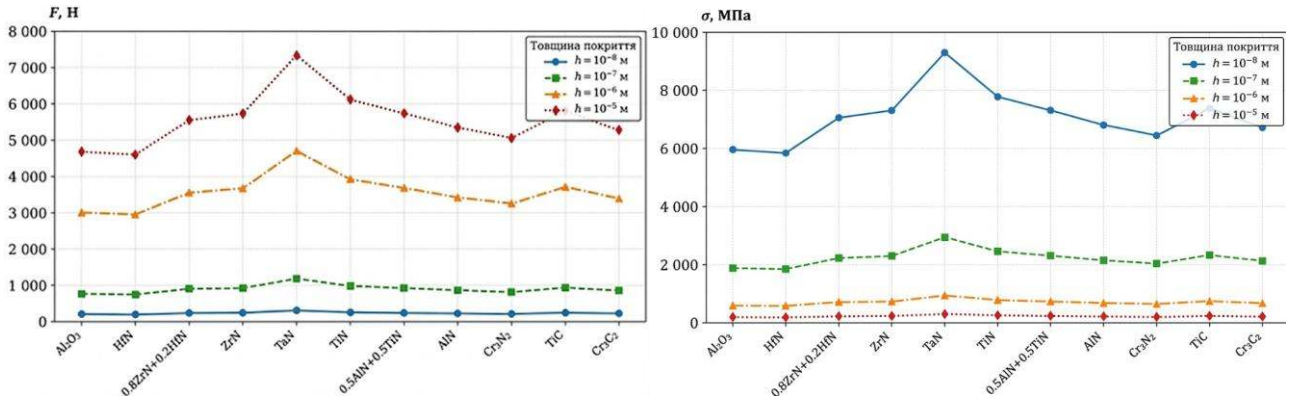


Рис. 5. Порівняння розрахункових значень міцності зчеплення σ для різних пар «покриття–основний матеріал», визначених за формулами (1) і (12) для різних товщин міжфазного шару

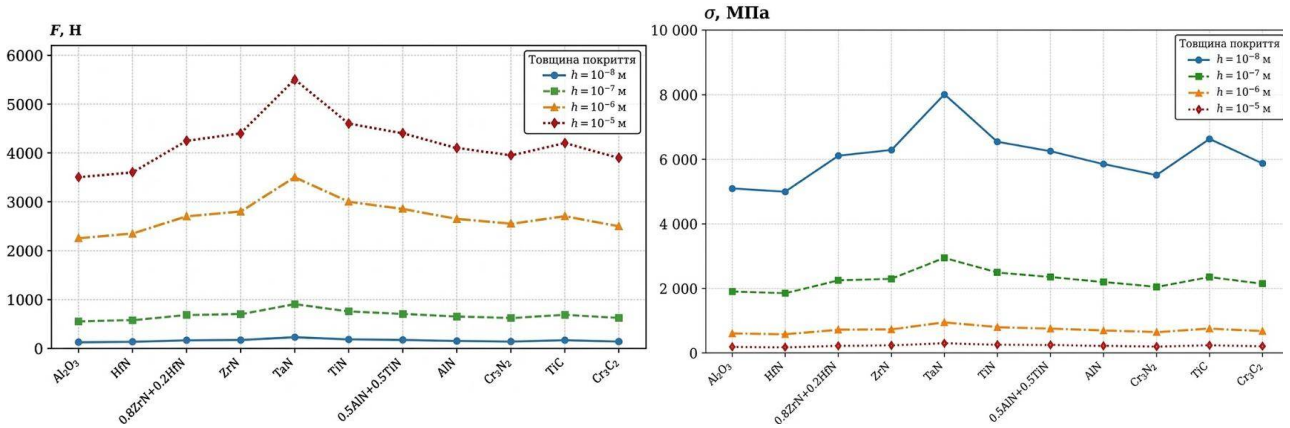
Отримані результати свідчать, що зі зміною товщини покриття спостерігають закономірне зниження значень міцності зчеплення для всіх досліджуваних матеріальних пар. При цьому характер зміни є подібним незалежно від застосованого методу визначення енергії адгезії. Проведені розрахунки показали, що відмінність між значеннями міцності зчеплення, отриманими за двома розрахунковими підходами, знаходиться в межах 8,4–9,18 %, що свідчить про достатню узгодженість результатів і підтверджує можливість використання обох підходів для оцінювання адгезійної взаємодії матеріалів покриття і підкладки.

Як показують рис. 6-7, міцність зчеплення та сила адгезії залежать від товщини покриття, і є тим більшими, чим меншою є товщина покриття.



а б

Рис. 6. Залежність сили адгезії F для різних типів покриттів із варіюванням товщини шару для сталі 40 (а) і міцності зчеплення σ для різних типів покриттів залежно від товщини покриття h для сталі 40 (б)

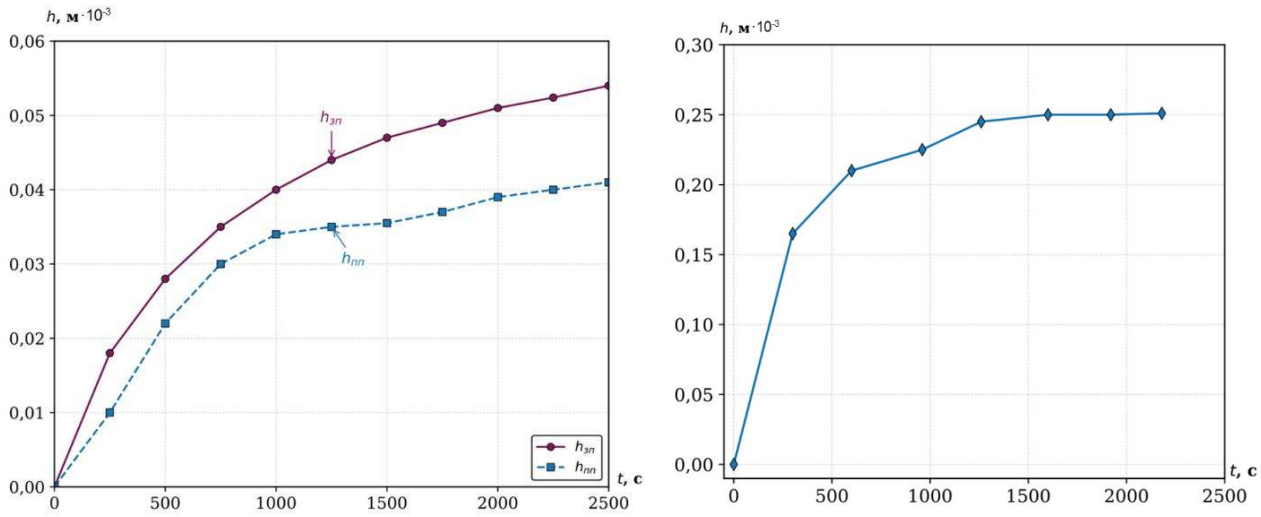


а б

Рис. 7. Залежність сили адгезії F для різних типів покриттів із варіюванням товщини шару для пластини Н13А (а) і міцності зчеплення σ для різних типів покриттів залежно від товщини покриття h для пластини Н13А (б)

У рамках експерименту досліджували динаміку зношування по передній і задній поверхнях, а також розміри лунки. Проводили контрольне фотографування поверхонь пластини «Sandvik Coromant» Н13А.

Знос по передній $h_{пп}$ і задній $h_{зп}$ поверхнях у часі показано на рис. 8. Видно, що швидкість зношування по передній поверхні суттєво знижується з часом, тоді як швидкість зношування по задній поверхні після припрацювання зберігається постійною.



а б

Рис. 8. Залежність зношування по задній $h_{зп}$ і передній $h_{пп}$ поверхнях пластини з покриттям від часу точіння загартованої сталі 40 (а) і глибини лунки на передній поверхні пластини з покриттям 0,8ZrN + 0,2HfN від часу роботи PI пластини H13A (б)

Аналіз залежності глибини лунки від часу (рис. 8) свідчить про те, що під час припрацювання пластини H13A та оброблюваного матеріалу сталі 40 швидкість зношування висока, надалі з часом вона знижується і до 480 с роботи стабілізується, а глибина лунки не зростає.

На рис. 9 наведено мікрофотографії поверхні різального інструмента H13A після лазерної текстуризації, виконаної до та після нанесення функціонального покриття: а — текстуризація поверхні до нанесення покриття; б — текстуризація поверхні після нанесення покриття. Для кожного варіанта наведено зображення для збільшення 100×, 800× і 2000×, що дає змогу оцінити характер формування поверхневого мікрорельєфу на різних масштабних рівнях.

Для поверхні, текстурованої до нанесення покриття (рис. 9, а), зі збільшенням 100× спостерігають сформовану внаслідок лазерного впливу зону модифікації поверхні різального інструменту. Зі збільшенням 800× чітко проявляється система протяжних мікроканавок і виступів, сформованих у результаті локального впливу лазерного випромінювання. Такий характер мікрорельєфу свідчить про формування розвиненої поверхні, яка після нанесення покриття може забезпечувати збільшення площі міжфазного контакту і створювати додаткові умови для механічного закріплення покриття.

Зі збільшенням 2000× поверхня має чергування мікровиступів, западин і локальних нерівностей. Сформована структура є важливою для подальшого нанесення функціонального покриття, оскільки геометрія текстурованої поверхні визначає характер заповнення мікронерівностей матеріалом покриття і формування міжфазної області. Отже, лазерна текстуризацію до нанесення покриття можна використовувати як інструмент керування умовами формування адгезійного контакту між покриттям та основою H13A.

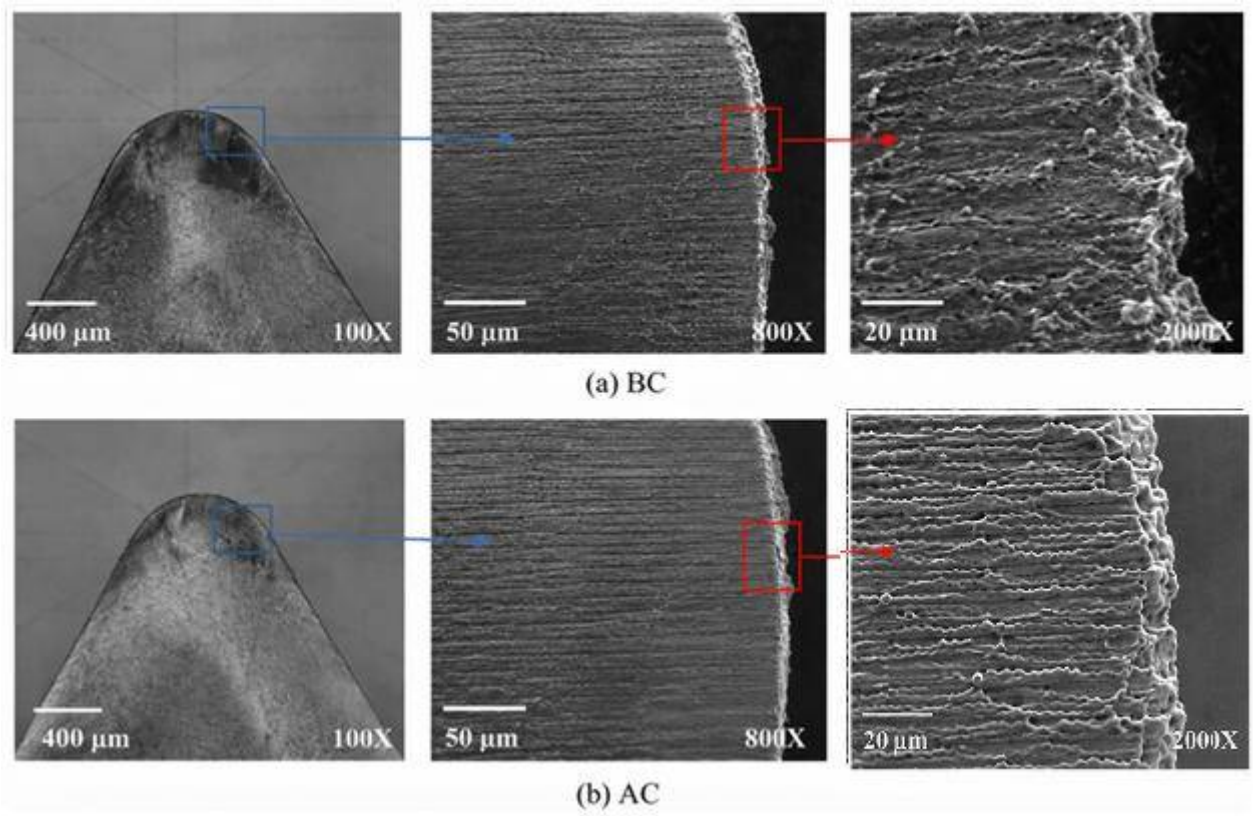


Рис. 9. Мікрофотографії поверхні різального інструменту H13A після лазерної текстуризації: а – текстуризація до нанесення покриття; б – текстуризація після нанесення покриття; збільшення 100×, 800× і 2000×

Для поверхні, текстурованої після нанесення покриття (рис. 9, б), зі збільшенням 100× спостерігають зону лазерного впливу на вже сформованому покритті. Зі збільшенням 800× проявляється регулярний характер сформованих поверхневих структур, які переривають вихідну поверхню покриття і формують додатковий мікрорельєф. Зі збільшенням 2000× спостерігають локальні нерівності і структурні елементи, сформовані внаслідок лазерної взаємодії з поверхневим шаром покриття.

Порівняння двох технологічних підходів показує, що послідовність виконання лазерної текстуризації відносно нанесення покриття істотно впливає на кінцеву морфологію поверхні. Із текстуризацією до нанесення покриття мікрорельєф формується безпосередньо на основі H13A і надалі впливає на умови формування міжфазної області «покриття – основа». Із текстуризацією після нанесення покриття лазерний вплив безпосередньо модифікує поверхневий шар покриття, формуючи додаткову систему мікроканавок і виступів.

Щодо технології, то обидва підходи створюють можливості для керованої зміни поверхневої морфології, однак механізм їхнього впливу на адгезійну взаємодію є різним. Текстуризація до нанесення покриття може сприяти механічному закріпленню покриття за рахунок заповнення сформованого мікрорельєфу, тоді як текстуризація після нанесення покриття забезпечує безпосередню модифікацію його поверхневого шару та може впливати на фактичну площу

контакту, трибологічні характеристики та процеси зношування.

Отримані результати підтверджують перспективність поєднання лазерної текстуризації та функціональних покриттів для керування властивостями поверхні різального інструменту. Встановлені морфологічні особливості є основою для подальшого аналізу адгезійної міцності, інтенсивності зношування та експлуатаційної стійкості інструменту під час точіння сталі.

Висновки. У результаті проведених досліджень виявлено ефективність комплексного підходу щодо підвищення працездатності різального інструменту, що ґрунтований на керуванні властивостями поверхневого шару та адгезійною взаємодією матеріалів у зоні контакту. Показано, що експлуатаційна стійкість інструменту визначена не лише складом функціонального покриття, а і характером взаємодії між покриттям, матеріалом основи та оброблюваною сталлю.

Виявлено закономірний зв’язок між адгезійною сумісністю контактуючих матеріалів та інтенсивністю зношування. Мінімальний рівень чистого зносу відповідає мінімальній різниці електронегативностей матеріалів контактної пари, що підтверджує можливість використання цього параметра для обґрунтованого вибору складу функціональних покриттів. Для досліджених покриттів отримано послідовність зростання інтенсивності зношування $Al_2O_3 \rightarrow HfN \rightarrow 0{,}2HfN+0{,}8ZrN \rightarrow TiN \rightarrow 0{,}5TiN+0{,}5AlN \rightarrow Mo_2N$, що характеризує різний рівень їхньої адгезійної і трибологічної сумісності зі сталлю 40.

Лазерна модифікація забезпечує можливість цілеспрямованого формування поверхневого мікрорельєфу та зміни умов взаємодії покриття з матеріалом основи. Встановлено, що технологічна послідовність виконання текстуризації — до або після нанесення покриття — визначає характер сформованої поверхневої структури та відповідно може бути використана як додатковий параметр керування адгезійними і трибологічними властивостями системи «покриття – різальний інструмент».

Отримані результати розширюють наукові уявлення про можливості підвищення працездатності різального інструменту шляхом одночасного керування складом покриття, станом поверхні та умовами міжфазної взаємодії. Практичне значення результатів полягає у формуванні науково обґрунтованого підходу щодо вибору матеріалу покриття і технології лазерної модифікації, спрямованих на зниження інтенсивності зношування, підвищення адгезійної стійкості покриття і збільшення ресурсу різального інструмента під час механічної обробки сталі 40.

Поєднання лазерної модифікації поверхні з оптимізацією адгезійної взаємодії матеріалів є перспективним напрямом підвищення працездатності не тільки різального інструмента, а і деталей машин, для яких визначальними є стан поверхневого шару, характер міжфазної взаємодії та опір зношуванню.

Список використаних джерел

1. Seid Ahmed, Y., & Yilbas, B. S. (2026). Influence of laser texturing sequence on interfacial adhesion and tribological behavior of TiAlN-coated cemented carbide cutting tool. *Materials Today Communications*, 51, 114694. DOI: https://doi.org/10.1016/ j.mtcomm.2026.114694

2. Kostyk, K. O., & Shyrokyi, Yu. V. (2022). Intensification of chemical and heat treatment processes to improve the operational properties of machine parts. *Findings of Modern Engineering Research and Developments*, 554. DOI: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-6

3. Широкий, Ю. В., & Семененко, О. Д. (2026). Дослідження температурних полів і термонапружень у інструментальному матеріалі H13A при фемтосекундній лазерній обробці. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 108, 82–97. DOI: https://doi.org/10.32620/oikit.2026.108.06

4. Fang, S., Klein, S., Bähre, D., & Llanes, L. (2020). Performance of laser surface textured cemented carbide tools during abrasive machining: Coating effects, surface integrity assessment and wear characterization. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 130–139. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.10.006

5. Kostyuk, G., Nechyporuk, M., & Kostyk, K. (2019). Determination of technological parameters for obtaining nanostructures under pulse laser radiation on steel of drone engine parts. *2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, 208–212. DOI: https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8770053

6. Широкий, Ю. В., & Семененко, О. Д. (2026). Вплив поверхневої енергії на формування наноструктурованого стану іонно-плазмових покриттів системи HfN–ZrN на твердосплавних ріжучих інструментах. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.*, 216, 7–22. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362423

7. Farid A.A., S. Sharif, M.H. Idris., (2021). Performance and wear mechanisms of uncoated, TiAlN, and AlTiN-coated carbide tools in high-speed drilling of Al-Si alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(9–10), 2671–2684. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-021-06663-w

8. Широкий, Ю. В., Сисоєв, Ю. О., Семененко, О. Д., & Торосян, О. В. (2025). Підвищення ефективності деталей машин та різального інструменту комбінованими методами обробки. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 106, 84–107. DOI: https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.06

9. Souza, P. S., Santos, A. J., Cotrim, M. A. P., Abrão, A. M., & Câmara, M. A. (2020). Analysis of the surface energy interactions in the tribological behavior of AlCrN and TiAlN coatings. *Tribology International*, 146, 106206. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106206

10. Костюк, Г. І., Павленко, В. М., & Широкий, Ю. В. (2015). Перспективи отримання наноструктур при дії імпульсного лазерного випромінювання на сталі. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*, 40(1149), 47–52. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19994

11. Широкий, Ю. В., Сисоєв, Ю. О., Фесенко, К. В., & Постельник, Т. О. (2024). Дослідження температурних полів на сталях з урахуванням кінцевої швидкості розповсюдження тепла при моделюванні умов отримання наноструктур у плазмовому середовищі. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 101, 98–111. DOI: https://doi.org/10.32620/oikit.2024.101.07

12. Shyrokyi, Y., Sysoiev, I., & Fesenko, Y. (2024). Modeling the conditions for obtaining nanostructures during ion-plasma processing taking into account the quantum-mechanical properties of electrode material. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 3(195), 68–76. DOI: https://doi.org/10.32620/aktt.2024.3.06

13. Zhang, K., Deng, J., Ding, Z., Guo, X., & Sun, L. (2017). Improving dry machining performance of TiAlN hard-coated tools through combined technology of femtosecond laser textures and WS_2 soft-coatings. *Journal of Manufacturing Processes*, 30, 492–501. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.018

14. Sysoiev, I., Shyrokyi, Y., & Fesenko, K. (2024). Pulsed vacuum-arc plasma source with laser arc excitation. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1(149), 110–115. DOI: https://doi.org/10.46813/2024-149-110

15. Kostyuk, G., Melkoziorova, O., Kostyuk, E., & Shirokiy, I. (2020). Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows. *Різання та інструменти в технологічних системах*, 92, 107–121. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12

16. Kostyk, K., Kostyk, V., Akimov, O., Kamchatna-Stepanova, K., & Shyrokyi, Y. (2022). Ensuring the high strength characteristics of the surface layers of steel products. *Advanced Manufacturing Processes III: InterPartner 2021*, 292–301. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_29

17. Широкий, Ю. В., & Семененко, О. Д. (2026). Особливості механізму зношування твердосплавного інструменту з зносостійкими покриттями. *КЗЯТПС м. Чернігів, 21–23 травня 2026 р. у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка»*, 1, 25. URL: www.conference-chernihiv-polytechnik.com

18. Xing, Y., Deng, J., Wu, Z., & Wu, F. (2017). High friction and low wear properties of laser-textured ceramic surface under dry friction. *Optics & Laser Technology*, 93, 24–32. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.01.032

19. Семененко, О. Д., Безпалов, Д. І., & Широкий, Ю. В. (2026). Імпульсна лазерна обробка як ефективний метод підвищення зносостійкості інструментальних покриттів. *Всеукраїнська відкрита науково-практична студентська конференція факультету авіаційних двигунів (ФАД), «Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки» 20–21 трав. 2026 р. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т»,* 111–113. URL: http://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/9393

20. Костюк, Г. І., & Широкий, Ю. В. (2017). Перспективи застосування лазерної обробки для створення наноструктур на РІ з «ВолКар». *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*, 26(1248), 60–65. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32441

21. Sysoiev, I., Shyrokyi, Y., & Fesenko, K. (2025). System for measurement the product surface temperature for vacuum-arc coatings. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(156), 171–176. DOI: https://doi.org/10.46813/2025-156-171

22. Krafka, M., Bakalova, T., Svobodová, L., Primus, T., Mrózek, M., & Bouša, M. (2024). Changing the integrity of the material surface by combining laser surface texturing and PVD magnetron sputtering technologies. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 50, 24-29. DOI: https://doi.org/10.14311/app.2024.50.0024

23. Широкий, Ю. В., Сисоєв, Ю. О., Торосян, О. В., & Торосян-Жидєєва, Г. Д. (2023). Вибір технологічних параметрів лазера для отримання наноструктур на інструментальній сталі У12А. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 97, 111–125. DOI: https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07

References

1. Seid Ahmed, Y., & Yilbas, B. S. (2026). Influence of laser texturing sequence on interfacial adhesion and tribological behavior of TiAlN-coated cemented carbide cutting tool. *Materials Today Communications*, 51, 114694. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2026.114694 [in English].

2. Kostyk, K. O., & Shyrokyi, Yu. V. (2022). Intensification of chemical and heat treatment processes to improve the operational properties of machine parts. *Findings of modern engineering research and developments*, 554. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-6 [in English].

3. Shyrokyi, Yu. V., & Semenenko, O. D. (2026). Doslidzhennia temperaturnykh poliv i termonapruzhen u instrumentalnomu materiali H13A pry femtosekundnii lazernii obrobtsi [Investigation of temperature fields and thermal stresses in H13A tool material during femtosecond laser processing]. *Open Information and Computer Integrated Technologies,* 108, 82–97. https://doi.org/10.32620/oikit.2026.108.06 [in Ukrainian].

4. Fang, S., Klein, S., Bähre, D., & Llanes, L. (2020). Performance of laser surface textured cemented carbide tools during abrasive machining: coating effects, surface integrity assessment and wear characterization. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 130–139. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.10.006 [in English].

5. Kostyuk, G., Nechyporuk, M., & Kostyk, K. (2019). Determination of technological parameters for obtaining nanostructures under pulse laser radiation on steel of drone engine parts. *2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT*), 208–212. https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8770053 [in English].

6. Shyrokyi, Yu. V., & Semenenko, O. D. (2026). Vplyv poverkhnevoi enerhii na formuvannia nanostrukturovanoho stanu ionno-plazmovykh pokryttiv systemy HfN–ZrN na tverdosplavnykh rizhuchykh instrumentakh [Influence of surface energy on the formation of a nanostructured state of HfN–ZrN ion-plasma coatings on carbide cutting tools]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 216, 7–22. https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362423 [in Ukrainian].

7. Farid A.A., S. Sharif, M.H. Idris., (2021). Performance and wear mechanisms of uncoated, TiAlN, and AlTiN-coated carbide tools in high-speed drilling of Al-Si alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(9–10), 2671–2684. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06663-w [in English].

8. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Semenenko, O. D., & Torosian, O. V. (2025). Pidvyshchennia efektyvnosti detalei mashyn ta rizalnoho instrumentu kombinovanymy metodamy obrobky [Improving the efficiency of machine parts and cutting tools by combined processing methods]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 106, 84–107. https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.06 [in Ukrainian].

9. Souza, P. S., Santos, A. J., Cotrim, M. A. P., Abrão, A. M., & Câmara, M. A. (2020). Analysis of the surface energy interactions in the tribological behavior of AlCrN and TiAlN coatings. *Tribology International*, 146, 106206. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106206 [in English].

10. Kostiuk, H. I., Pavlenko, V. M., & Shyrokyi, Yu. V. (2015). Perspektyvy otrymannia nanostruktur pry dii impulsnoho lazernoho vyprominiuvannia na stali [Prospects for obtaining nanostructures under pulsed laser irradiation of steels]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni,* 40(1149), 47–52. http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19994 [in Ukrainian].

11. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Fesenko, K. V., & Postelnyk, T. O. (2024). Doslidzhennia temperaturnykh poliv na staliakh z urakhuvanniam kintsevoi shvydkosti rozpovsiudzhennia tepla pry modeliuvanni umov otrymannia nanostruktur u plazmovomu seredovyshchi [Investigation of temperature fields in steels considering the finite heat propagation velocity in modeling the conditions for obtaining nanostructures in a plasma medium]. *Open Information and Computer Integrated Technologies,* 101, 98–111. https://doi.org/10.32620/oikit.2024.101.07 [in Ukrainian].

12. Shyrokyi, Y., Sysoiev, I., & Fesenko, Y. (2024). Modeling the conditions for obtaining nanostructures during ion-plasma processing taking into account the quantum-mechanical properties of electrode material. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia,* 3(195), 68–76. https://doi.org/10.32620/aktt.2024.3.06 [in English].

13. Zhang, K., Deng, J., Ding, Z., Guo, X., & Sun, L. (2017). Improving dry machining performance of TiAlN hard-coated tools through combined technology of femtosecond laser textures and WS2 soft-coatings. *Journal of Manufacturing Processes,* 30, 492–501. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.018 [in English].

14. Sysoiev, I., Shyrokyi, Y., & Fesenko, K. (2024). Pulsed vacuum-arc plasma source with laser arc excitation. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1(149), 110–115. https://doi.org/10.46813/2024-149-110 [in English].

15. Kostyuk, G., Melkoziorova, O., Kostyuk, E., & Shirokiy, I. (2020). Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows. *Rizannia ta instrumenty v tekhnolohichnykh systemakh*, 92, 107–121. https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12 [in English].

16. Kostyk, K., Kostyk, V., Akimov, O., Kamchatna-Stepanova, K., & Shyrokyi, Y. (2022). Ensuring the high strength characteristics of the surface layers of steel products. *Advanced Manufacturing Processes III: InterPartner* 2021, 292–301. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_29 [in English].

17. Shyrokyi, Yu. V., & Semenenko, O. D. (2026). Osoblyvosti mekhanizmu znoshuvannia tverdosplavnoho instrumentu z znosostiikymy pokryttiamy [Features of the wear mechanism of carbide tools with wear-resistant coatings]. KZYATPS, Chernihiv, May 21–23, 2026, in 2 vols. / Chernihiv Polytechnic National University, 1, 25. www.conference-chernihiv-polytechnik.com. [in Ukrainian].

18. Xing, Y., Deng, J., Wu, Z., & Wu, F. (2017). High friction and low wear properties of laser-textured ceramic surface under dry friction. *Optics & Laser Technology,* 93, 24–32. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.01.032 [in English].

19. Semenenko, O. D., Bezpalov, D. I., & Shyrokyi, Yu. V. (2026). Impulsna lazerna obrobka yak efektyvnyi metod pidvyshchennia znocostiikosti instrumentalnykh pokryttiv [Pulsed laser processing as an effective method for enhancing the wear resistance of tool coatings]. *All-Ukrainian Open Scientific and Practical Student Conference of the Faculty of Aircraft Engines (FAE), «Modern Problems of Engine Building, Energy, and Intelligent Mechanics»,* May 20–21, 2026. – Kharkiv: National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», 111–113. http://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/9393 [in Ukrainian].

20. Kostiuk, H. I., & Shyrokyi, Yu. V. (2017). Perspektyvy zastosuvannia lazernoi obrobky dlia stvorennia nanostruktur na RI z «VolKar» [Prospects for the application of laser processing to create nanostructures on cutting tools made of «VolKar»]. Visnyk NTU «KhPI». Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni, 26(1248), 60–65. http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32441 [in Ukrainian].

21. Sysoiev, I., Shyrokyi, Y., & Fesenko, K. (2025). System for measurement the product surface temperature for vacuum-arc coatings. *Problems of Atomic Science and Technology,* 2(156), 171–176. https://doi.org/10.46813/2025-156-171 [in English].

22. Krafka, M., Bakalova, T., Svobodová, L., Primus, T., Mrózek, M., & Bouša, M. (2024). Changing the integrity of the material surface by combining laser surface texturing and PVD magnetron sputtering technologies. *Acta Polytechnica CTU Proceedings,* 50, 24-29. https://doi.org/10.14311/app.2024.50.0024 [in English].

23. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Torosian, O. V., & Torosian-Zhydieieva, H. D. (2023). Vybir tekhnolohichnykh parametriv lazera dlia otrymannia nanostruktur na instrumentalnii stali U12A [Selection of laser technological parameters for obtaining nanostructures on U12A tool steel]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 97, 111–125. https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07 [in Ukrainian].

Широкий Юрій Вячеславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». ORCID: iD: https://orcid.org/0000-0002-4713-0334. E-mail: i.shyrokyi@khai.edu.
Семененко Ольга Діонісівна, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут».
ORCID iD: https://orcid.org/0009-0001-8425-562X. E-mail: o.semenenko@khai.edu.
Романов Максим Сергійович, кандидат технічних наук, професор, кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». ORCID: iD: https://orcid.org/0000-0002-0598-2598. E-mail: m.romanov@khai.edu.

Shyrokyi Yuriy Vyacheslavovich, PhD (Tech). Associate Professor, department of theoretical mechanics, mechanical engineering and robotic systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute».
ORCID: iD: https://orcid.org/0000-0002-4713-0334. E-mail: i.shyrokyi@khai.edu.
Semenenko Olha Dionisivna, Assistant, department of theoretical mechanics, mechanical engineering and robotic systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». ORCID iD: https://orcid.org/0009-0001-8425-562X. E-mail: o.semenenko@khai.edu.
Romanov Maksym - Doctor of Philosophy, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine.
ORCID iD: orcid: https://orcid.org/0000-0002-0598-2598. E-mail: m.romanov@khai.edu.

Дата надходження статті: 27.07.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 23.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 631.316.02:539.4

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРУЖНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ ДИСКОВОЇ БОРОНИ ДЛЯ ДВОКРОКОВОЇ МОДЕЛІ НАВАНТАЖЕННЯ

Асп. О. З. Макар, інж. І. В. Говоруха

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF AN ELASTIC WORKING TOOL OF A DISC HARROW UNDER A TWO-STEP LOADING MODEL

PhD student O. Makar, engineer I. Hovorukha

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.373474

Анотація. *У статті розглянуто напружено-деформований стан пружного робочого органу дискової борони для двокрокової моделі навантаження. Об'єктом дослідження є пружний робочий орган дискової борони, що складається з диска, пружного стояка та проміжного кронштейна. Чисельне моделювання виконано для оцінювання розподілу напружень у конструктивних елементах вузла. Встановлено, що зона максимальних напружень біля закріплення стояка має ознаки сингулярності, тому локальний пік у цій зоні не є репрезентативною оцінкою напруженого стану деталі. На вигнутій ділянці стояка поза впливом сингулярності еквівалентні напруження становлять приблизно 370–445 МПа. Отримані результати дають змогу визначити характерні зони концентрації напружень і можуть бути використані для подальшого аналізу конструкції. Отримані дані являють собою необхідну інформацію для визначення показників надійності, таких як коефіцієнт запасу та імовірність безвідмовної роботи.*

Ключові слова: *дискова борона, пружний стояк, напружено-деформований стан, двокрокова модель навантаження, скінченно-елементне моделювання.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Макар О. З., Говоруха І. В., 2026.

Abstract. *The paper considers the stress-strain state of an elastic working tool of a disc harrow under a two-step loading model. The object of the study is the disc-to-frame attachment assembly, consisting of a disc, an elastic stand and an intermediate bracket connecting the stand to the disc axle; according to operational data, it is the elastic stand and the bracket that most often suffer crack initiation and failure. A three-dimensional geometric model of the assembly was created by reverse engineering from full-scale measurements of the actual part, since factory design documentation is unavailable. The elastic stand has a characteristic C-shaped curved profile (sweep length 440 mm, width 75 mm, thickness 15 mm) and is made of 60C2A steel, for which an isotropic linear-elastic model was adopted (elastic modulus $2.1 \cdot 10^5$ MPa, Poisson's ratio 0.29, density 7680 kg/m³). The finite element model was built with an individually selected element size for each component: a Hex Dominant mesh with 4 mm elements was used for the stand, while the remaining parts were meshed with tetrahedral elements of 10–20 mm; in total, the model contains 137,876 nodes and 38,746 elements (excluding fastening bolts).*

The analysis was performed in two load steps: the first simulates the penetration of the disc into the soil (a 300 N concentrated force applied to the hub axle), and the second simulates the onset of soil resistance during travel of the implement (distributed pressure on the 140 mm edge zone of the disc, varying linearly from zero to 0.11 MPa). The maximum total deformation of the assembly is 116.7 mm and is localised at the free edge of the disc, whereas the intrinsic deformation of the disc, hub and bracket is negligible – the displacement is governed mainly by elastic bending of the stand. The zone of maximum stress (667.16 MPa) near the stand support was found to exhibit signs of finite element singularity; therefore, the local peak in this zone is not a representative estimate of the stress state of the part. On the curved section of the stand, outside the influence of the singularity, the equivalent von Mises stresses are approximately 370–445 MPa over a substantial area of the surface. The obtained results make it possible to identify characteristic stress concentration zones and can be used for further analysis of the structure; however, they remain insufficient for a final conclusion on strength or service life. They provide the necessary information for determining reliability indices such as the safety factor and the probability of failure-free operation.

Keywords: *disc harrow, elastic stand, stress-strain state, two-step loading model, finite element modelling.*

Вступ. Надійність робочих органів ґрунтообробної техніки є одним з основних факторів, що визначають ефективність експлуатації сільськогосподарських агрегатів, оскільки саме ці елементи сприймають основне навантаження від взаємодії з ґрунтом і зазнають циклічних ударних впливів протягом усього робочого циклу. Одним із таких вузлів є пружний робочий орган дискової борони, який забезпечує не лише фіксацію диска під заданим кутом атаки, а й амортизацію ударних навантажень, що виникають із контактом із камінням, корінням та іншими твердими включеннями в ґрунті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування пружних стояків дискових робочих органів порівняно з жорсткими зумовлює коливний рух робочих органів унаслідок нерівномірності опору ґрунтового середовища, кращу пристосованість до рельєфу поля, зменшення енергетичних витрат і підвищення ефективності технологічного процесу [1 – 3]. Водночас практика експлуатації ґрунтообробних знарядь із дисковими робочими органами на пружних стояках [2] показує, що досягнення позитивного ефекту можливе лише для певних умов ґрунту, швидкісного режиму та глибини обробітку, а питання забезпечення якісних показників і енергоємності технологічного процесу залишаються недостатньо вивченими.

У напрямі теоретичного обґрунтування пружних стояків сформувалися кілька

підходів. Механіко-математичні моделі взаємодії робочого органу на пружному стояку одержано в роботі, де створено алгоритм побудови амплітудно-частотної характеристики пружного стояка з функціональним регулюванням у межах припустимого відхилення від заданої глибини, однак результати рекомендовано лише для S-подібних пружних стояків [4]. У роботі [5] обґрунтовано форму пружного стояка у вигляді спіралі Архімеда та визначено вирази для коефіцієнтів жорсткості, довжини і кута відхилення в еквівалентній фізико-математичній моделі; основним недоліком цього напряму є неможливість регулювати геометричні параметри стояка під час налаштування для різних типів ґрунтів і робочих органів. Пошуком раціональних конструктивних параметрів пружних стояків дискових агрегатів присвячено також дослідження [6], у якому оглянуто технології основного обробітку та обґрунтування параметрів дискового агрегата, проте НДС пружного стояка в них розглянуто фрагментарно.

В українській науці чисельне моделювання ґрунтообробних знарядь активно розвивається: для аналізу нових конструкцій ґрунтообробних модулів і їхньої взаємодії із ґрунтом застосовано метод дискретних елементів, показано перспективи моделювання взаємодії ґрунтообробних робочих органів із ґрунтом у Simcenter STAR-CCM+ [7, 8], узагальнено стан розрахунку ротаційних робочих органів і зафіксовано проблему недостатньої надійності та захисту робочих органів від поломок, що обґрунтовує застосування пружних елементів у їхній підвісці [9]; відзначено також відносно невеликі витрати енергетичних ресурсів дискових ґрунтообробних знарядь у багатьох аграрних процесах [10]. Методологічні основи чисельного моделювання процесів агропромислового виробництва та скінченно-елементного аналізу систематизовано в роботах [11 – 13]. Для пружних стояків дискових знарядь оптимізацію індивідуальної пружинної стійки дискової борони виконано в роботах [14, 15], а методику чисельного моделювання НДС пружного стояка з регулятором жорсткості в SOLIDWORKS Simulation запропоновано в роботі [16].

У цій роботі розглядають вузол пружного робочого органу дискової борони, що складається з диска, пружинного стояка та проміжного кронштейна, який з'єднує стійку з віссю диска. За даними експлуатації, накопиченими у процесі використання техніки, найбільш навантаженими і схильними до руйнування елементами вузла є пружній стояк і кронштейн кріплення до диска – саме на них найчастіше фіксують тріщини та руйнування, що призводить до виходу з ладу всього вузла і необхідності позапланового ремонту. Характер реального навантаження, що діє на диск у процесі роботи, є складним просторовим розподілом тиску, який залежить від глибини оброблення, фізико-механічних властивостей ґрунту, швидкості руху агрегату і кута атаки диска, і точне його визначення потребувало б окремого експериментального дослідження. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення розрахункового аналізу вузла кріплення з використанням наближеної, але фізично обґрунтованої моделі навантаження, що дало б змогу виявити зони концентрації напружень і встановити можливі причини передчасного руйнування деталі.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цієї роботи є розрахунок напружено-деформованого стану кріплення диска ґрунтообробної борони методом скінченних елементів для виявлення зон концентрації напружень у найбільш навантажених деталях вузла – пружинній стійці та кронштейні – та оцінювання їхньої міцності.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- побудувати тривимірну геометричну модель вузла пружного робочого органу дискової борони;

• розробити скінченно-елементну модель вузла з обґрунтуванням вибору типу елементів і параметрів сітки;

• задати граничні умови закріплення та навантаження, що наближено відтворює розподілений тиск ґрунту на робочу поверхню диска;

• виконати статичний структурний аналіз і визначити поля напружень (за критерієм Мізеса) і переміщень у конструкції.

Об'єктом дослідження є вузол пружного робочого органу дискової борони. Навантаження на диск задавали як розподілений тиск, що діє на його робочу поверхню за лінійним законом залежно від координати – від нульового значення на верхній межі диска до максимального значення 0,11 МПа в зоні найбільшого заглиблення в ґрунт. Розрахунок виконано з використанням програмного комплексу на базі методу скінченних елементів (МСЕ), із застосуванням тривимірної скінченно-елементної моделі, побудованої на основі геометрії деталей вузла кріплення.

Основна частина дослідження. Тривимірна геометрична модель вузла кріплення диска борони була створена методом реверс-інжинірингу на основі натурних замірів реальної деталі. Геометричні параметри кожної складової частини вузла вимірювали безпосередньо з фізичного зразка за допомогою вимірювального інструменту, після чого отримані розміри використовували для побудови тривимірних ескізів і твердотільних моделей у CAD-системі.

На рис. 1 наведено загальний вигляд зібраної тривимірної моделі робочого органу борони. Складання демонструє взаємне розташування всіх п'яти компонентів вузла та спосіб їх з'єднання між собою: пружинний стояк кріплений до кронштейна за допомогою болтового з'єднання через два отвори у верхній частині, тоді як сам кронштейн через маточинний вузол і вісь фіксований на диску з можливістю зміни кута орієнтації диска відносно площини пружного стояка. Підшипниковий вузол розташований всередині ступиці і на цьому рисунку безпосередньо не візуалізований.

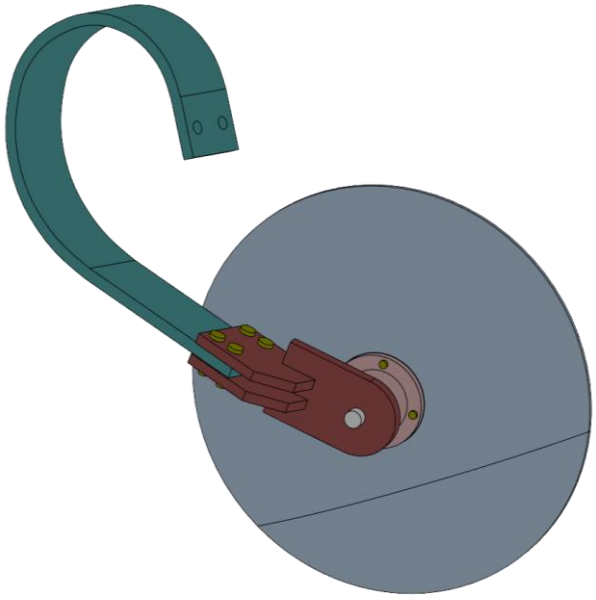


Рис. 1. Загальний вигляд зібраної тривимірної моделі робочого органу борони

Відстань від периферійного краю диска, за якою в подальшому розрахунку задавали розподілене навантаження, складає 140,00 мм. Робоча поверхня диска була умовно обрізана по цій лінії, оскільки саме крайова зона диска заглиблюється в ґрунт і сприймає найбільший тиск під час роботи. Отже, обрізану ділянку шириною 140 мм від краю використовували як область прикладання розподіленого тиску. Диск є робочим органом борони, що безпосередньо контактує з ґрунтом і забезпечує його розрізання і перевертання під час руху агрегату. У розрахунковій моделі диск подано як сферичний сегмент діаметром 510 мм. Реальна деталь має хвилясту (фестончасту) ріжучу кромку, яка в цій моделі була замінена гладким контуром – таке спрощення не впливає суттєво на жорсткість диска в зоні кріплення, яка є предметом основного інтересу розрахунку. Крім того, робоча поверхня диска була умовно обрізана на відстані 140 мм від краю – саме цю крайову ділянку в подальшому використовували як зону прикладання розподіленого навантаження від ґрунту.

Пружинний стояк є найбільшою деталлю вузла кріплення та виконує одразу дві функції: забезпечує кріплення всього вузла до корпусу (рами) агрегату та одночасно діє як пружний амортизуючий елемент, що згладжує ударні навантаження від диска в разі контакту з твердими включеннями в ґрунті.

Деталь має характерну С-подібну вигнуту форму: верхня частина являє собою плоску ділянку з двома отворами діаметром 12 мм для кріплення до корпусу агрегату, звідки профіль плавно вигинається (висота розгортки – 316 мм) і переходить у нижню пряму ділянку довжиною 240 мм, якою стояк з'єднаний із кронштейном. Загальна довжина розгортки деталі – 440 мм, ширина – 75 мм, товщина – 15 мм. У нижній частині передбачено два отвори діаметром 12 мм із заокругленнями R8 мм для болтового з'єднання з базовою пластиною кронштейна.

Завдяки вигнутій формі та пружним властивостям матеріалу ця деталь здатна пружинити під динамічними навантаженнями, проте саме це робить її та суміжний кронштейн найбільш навантаженими елементами вузла.

Метод скінченних елементів (МСЕ) є чисельним методом розв'язання задач механіки суцільних середовищ, що ґрунтований на розбитті досліджуваного тіла складної форми на скінченну кількість простих підобластей – елементів, з'єднаних між собою у вузлах. У межах кожного елемента невідоме поле переміщень апроксимоване через значення переміщень у вузлах за допомогою функцій форми, що дає змогу звести задачу з нескінченною кількістю степенів свободи до системи алгебраїчних рівнянь відносно скінченної кількості вузлових невідомих.

Для тривимірних задач структурного аналізу найпоширенішими є твердотільні елементи двох типів – гексаедральні (шестигранні) і тетраедральні (чотиригранні), кожен із яких може бути лінійним або квадратичним (із додатковими вузлами на серединах ребер). Квадратичні елементи забезпечують значно точнішу апроксимацію переміщень і напружень, що особливо важливо в зонах концентрації напружень і поблизу криволінійних поверхонь.

На рис. 2 наведено загальний вигляд скінченно-елементної сітки всієї збірки. Добре видно різницю в щільності і структурі сітки між компонентами: дрібна регулярна сітка на пружинній пластині помітно контрастує з крупнішою тетраедральною сіткою на диску, а в зоні кронштейна і маточинного вузла сітка додатково згущена для кращого відтворення геометрії переходів та отворів.



Рис. 2. Загальний вигляд скінченно-елементної сітки моделі робочого органу

Розмір елемента підбирали індивідуально для кожного компонента з урахуванням його геометричної складності та значущості для результатів розрахунку. Для пружнього стояка, який є найбільш деформованою деталлю вузла та зазнає максимальних напружень із пружним вигином, задано найдрібніший розмір елемента – 4 мм, із використанням алгоритму Hex Dominant, що дало змогу побудувати переважно гексаедральну сітку; загальна кількість вузлів для цієї деталі становить 116513, кількість елементів – 27623. Для з'єднувальної зони кронштейна і маточинного підшипникового вузла, де очікують концентрацію напружень через різку зміну перерізу, задано розмір елемента 10 мм (тетраедральна сітка), що дало 9231 вузол і 5087 елементів. Такий самий розмір 10 мм використано і для підшипникового вузла – 1998 вузлів, 1183 елементи. Для маточинного вузла розмір елемента становив 15 мм (1908 вузлів, 899 елементів), а для диска, який не є основним об'єктом дослідження, задано найкрупнішу сітку – 20 мм, що дало 8226 вузлів і 3954 елементи, побудовані за тетраедричним алгоритмом. Сумарно, без урахування кріпильних болтів, скінченно-елементна модель містить 137 876 вузлів і 38 746 елементів.

Крім перелічених компонентів, у моделі присутні вісім кріпильних болтів різного діаметра, які включені до збірки виключно для наочної репрезентації реального вузла кріплення; їхній вплив на результати розрахунку є незначним, тому окремій оптимізації сітки цих деталей увагу не приділяли.

На рис. 3 наведено збільшений фрагмент сітки пружнього стояка в зоні максимального вигину профілю – саме ця ділянка сприймає найбільші деформації в разі дії експлуатаційного навантаження. Дрібна регулярна сітка (розмір елемента 4 мм) допомагає точно відтворити плавну кривизну вигину деталі та забезпечує достатню деталізацію для коректного визначення полів напружень у цій зоні.

Для пружнього стояка в розрахунку прийнято ізотропний лінійно-пружний матеріал 60С2А. Його характеристики, відповідно до ДСТУ ГОСТ 14959:2018, наведено в таблиці.

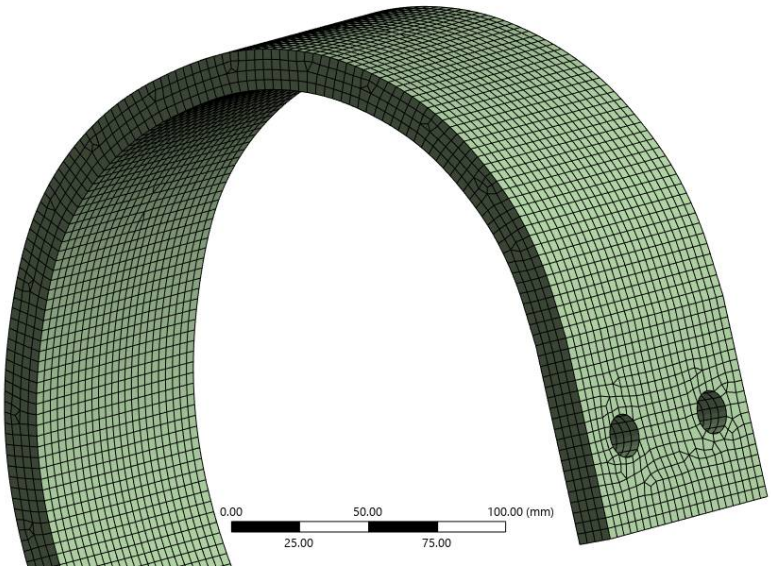


Рис. 3. Збільшений фрагмент сітки пружнього стояка в зоні максимального вигину

Таблиця

Механічні характеристики матеріалу 60С2А

Характеристика	Позначення	Значення
Щільність	ρ	7680 кг/м³
Модуль пружності	E	$2{,}1\cdot10^5$ МПа
Коефіцієнт Пуассона	ν	0,29
Границя текучості для розтягу	$\sigma_т$	1180 МПа
Границя міцності для розтягу	$\sigma_в$	1270 МПа

Оскільки в межах цієї роботи розв'язують лінійно-пружну задачу, безпосередньо в розрахунку використовують лише щільність, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона. Границі текучості та міцності наведено для оцінювання отриманих рівнів напружень.

Навантаження на диск борони в реальних умовах експлуатації є результатом двох послідовних фізичних процесів: спочатку диск заглиблюється в ґрунт у разі дії ваги агрегату і зусилля притискного механізму, а вже потім, під час руху агрегату, із боку ґрунту виникає опір, що діє на робочу поверхню диска. Для відтворення цієї послідовності розрахунок виконано у два навантажувальні кроки (Load Step).

Крок 1 імітує процес заглиблення диска в ґрунт. На вісь маточинного вузла прикладено силу Force: 300 Н у напрямку осі Y (рис. 4), що відтворює зусилля притискного механізму агрегату, із яким диск вдавлений у ґрунт перед початком руху.

Крок 2 імітує початок руху агрегату і виникнення опору ґрунту. На цьому кроці на робочу поверхню диска (ту саму крайову ділянку шириною 140 мм, обрізану) прикладено допоміжну силу Force 2: $1\cdot10^{-2}$ Н (рис. 5) дуже малої величини. Ця сила не має фізичного навантажувального значення сама по собі – її єдина мета полягає у формальному визначенні області та автоматичному створенні на її основі

поверхневих елементів SURF154 на потрібній ділянці диска. Реальне ж розподілене навантаження на цій ділянці задано окремо через команди низькорівневого текстового препроцесора, які виконувані безпосередньо перед розв'язанням і повністю замінюють ефект від Force 2.

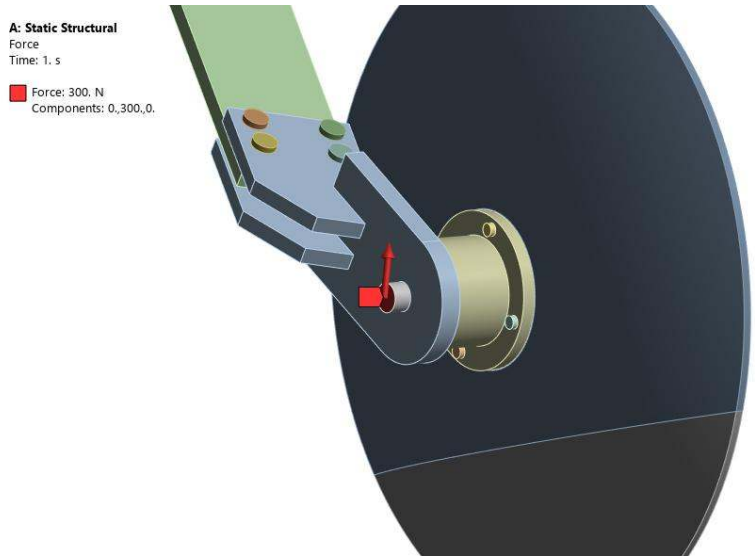


Рис. 4. Прикладання сили Force 300 Н (крок 1, імітація заглиблення диска)

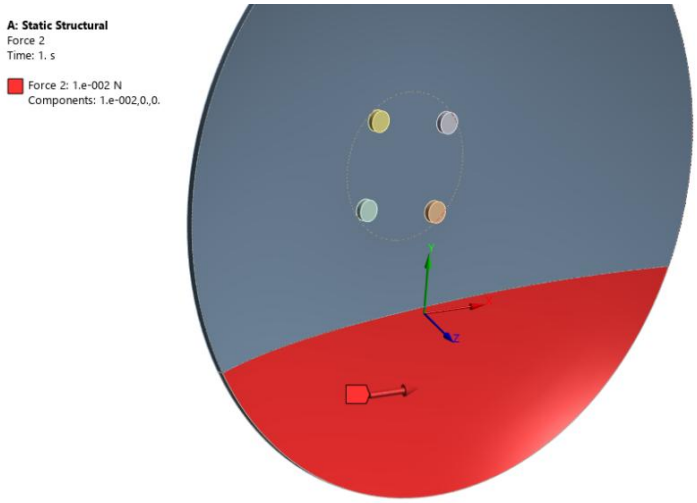


Рис. 5. Область прикладання допоміжної сили Force 2 (крок 2, зона формування SURF154)

Оскільки стандартні засоби графічного інтерфейсу програмного комплексу не дають змогу прямо задати тиск, що лінійно змінюється залежно від глобальної координати, для цього використано додатковий блок текстових команд, що виконуваний безпосередньо перед розв'язанням для другого навантажувального кроку.

Такий підхід дав змогу обійти обмеження графічного інтерфейсу препроцесора, де пряме задавання тиску за

таблицею від глобальної координати ускладнене, зберігши при цьому зручність визначення геометричної області навантаження стандартними засобами графічного інтерфейсу (через допоміжну силу Force 2). Результат прикладання розподіленого тиску до поверхневих елементів диска показано на рис. 6.

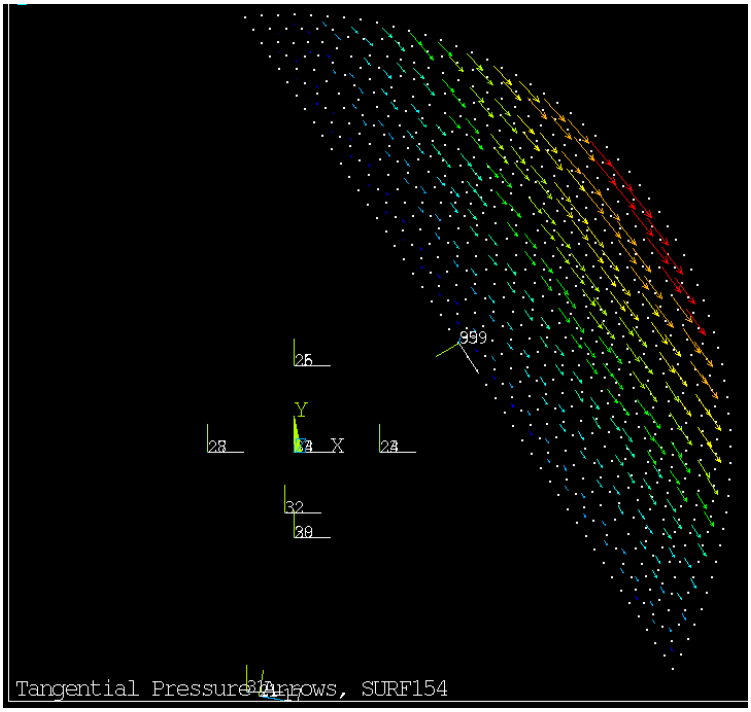


Рис. 6. Візуалізація розподіленого тиску на поверхневих елементах диска

Наведені нижче результати відповідають стану конструкції після завершення обох навантажувальних кроків (Time = 2 s), тобто з урахуванням сумарної дії зусилля притискного механізму (крок 1, 300 Н) і розподіленого тиску ґрунту на робочу поверхню диска (крок 2).

На рис. 7 наведено поле сумарних переміщень (Total Deformation) вузла кріплення. Максимальне переміщення становить 116,7 мм, його спостерігають на вільній кромці диска, найбільш віддаленій від зони закріплення. Розподіл переміщень має монотонний характер: нульові значення в зоні жорсткого защемлення поступово зростають уздовж вигнутої ділянки пружнього стояка та досягають максимуму на периферії диска. Це свідчить, що переміщення робочого органу забезпечено переважно пружним вигином пластини, тоді як власна деформація диска, маточинного вузла і кронштейна у загальному переміщенні є незначною.

На рис. 8 наведено загальну картину розподілу еквівалентних напружень, за критерієм Мізеса (Equivalent von-Mises Stress), у вузлі кріплення на момент часу, що відповідає другому навантажувальному кроку (Time = 2 s), тобто з урахуванням як зусилля притискного механізму (крок 1), так і розподіленого тиску ґрунту на диск (крок 2). Максимальне значення еквівалентного напруження становить 667,16 МПа.

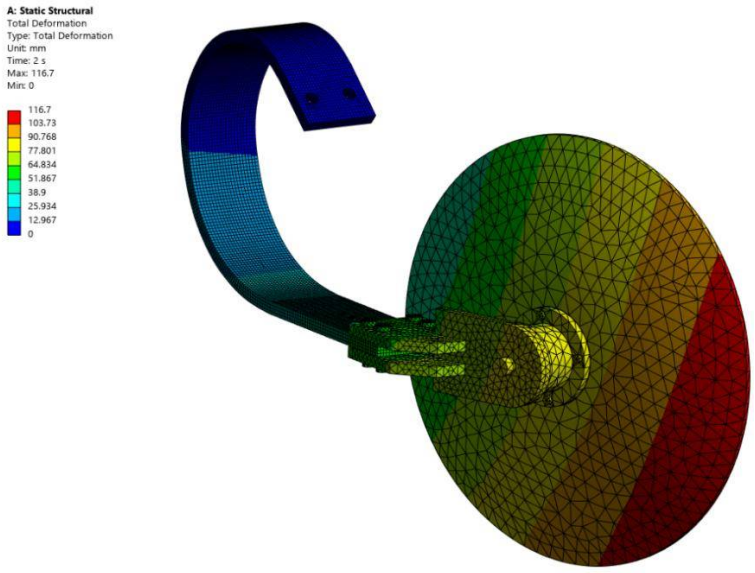


Рис. 7. Поле сумарних переміщень (Total Deformation) вузла кріплення

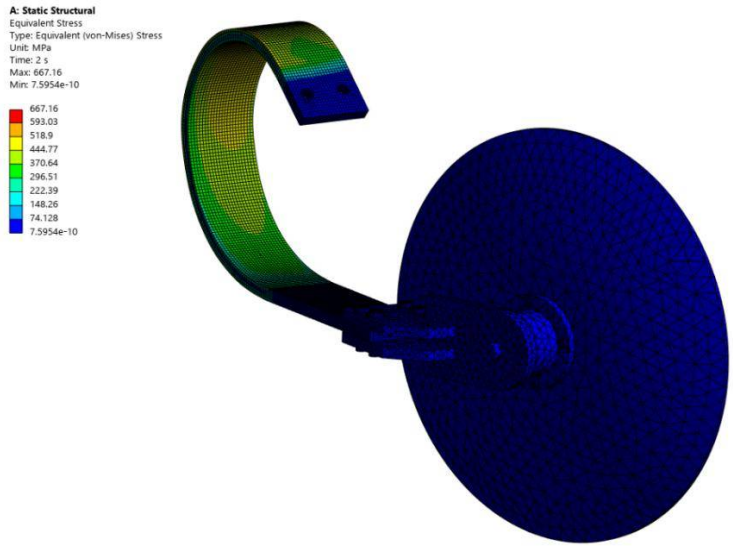


Рис. 8. Загальний розподіл еквівалентних напружень, за Мізесом, у робочому органі дискової борони

Максимум напружень локалізовано на верхній плоскій ділянці пружного стояка – саме в тій зоні, де прикладено граничну умову Fixed Support (рис. 9). Таке розташування піку напружень безпосередньо на межі жорсткого закріплення є характерною ознакою сингулярності скінченно-елементного розв'язку: ідеалізація закріплення як абсолютно жорсткого на різкій межі області призводить до штучного, нефізичного зростання розрахункових напружень у прилеглих до закріплення вузлах, яке не зникає (а часто навіть зростає) із подальшим подрібненням сітки. Тому значення 667,16 МПа не слід сприймати як реальне робоче напруження конструкції в цій точці – воно є артефактом ідеалізації граничної умови, а не відображенням дійсної концентрації напружень у деталі.

Більш показовою відносно реальної роботи конструкції є картина напружень безпосередньо на вигнутій, пружній ділянці стояка (рис. 10), де відсутній вплив сингулярності від закріплення.

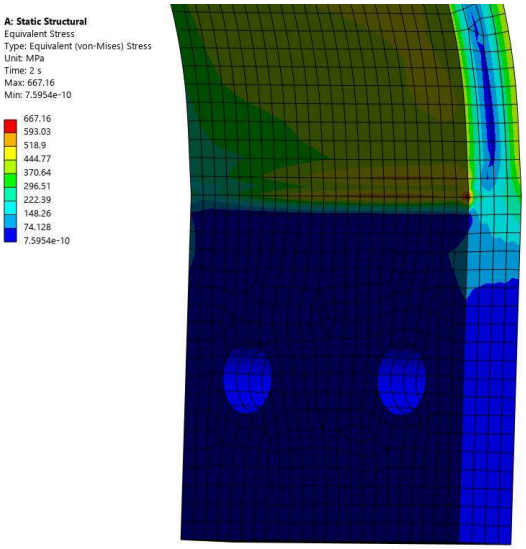


Рис. 9. Збільшений фрагмент зони максимальних напружень (сингулярність біля Fixed Support)

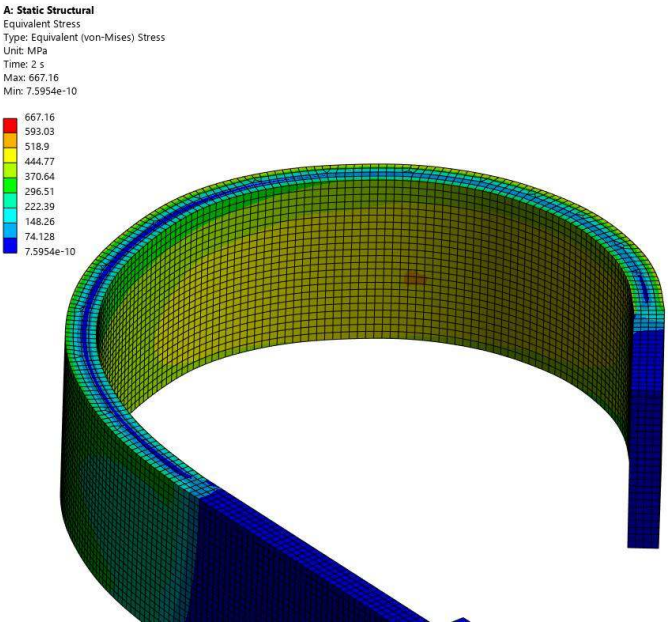


Рис. 10. Розподіл напружень на вигнутій ділянці пружного стояка (поза зоною сингулярності)

У цій зоні рівень еквівалентних напружень становить приблизно 519 – 593 МПа на значній площі вигнутої поверхні – саме це значення потрібно розглядати як репрезентативну оцінку напруженого стану пружинної пластини в разі дії прикладеного навантаження.

Висновки

Розглянуто модель пружного робочого органу ґрунтообробної борони, до складу якого входять диск, пружний стояк і проміжний кронштейн. Такий вузол зазнає навантажень, пов'язаних із взаємодією робочого органу з ґрунтом.

За результатами чисельного моделювання отримано розподіл напружень у пружному стояку та визначено ділянки їхньої підвищеної концентрації. Найбільші локальні значення спостерігають поблизу закріплення, де проявляється сингулярність, тому їх не потрібно безпосередньо трактувати як напруження в реальному матеріалі. На вигнутій ділянці стояка, поза зоною впливу сингулярності біля закріплення, репрезентативний рівень еквівалентних напружень становить приблизно 519 – 593 МПа.

Двокрокова модель навантаження дає змогу оцінювати напружено-деформований стан вузла в межах прийнятої постановки. Водночас отримані результати недостатні для остаточного висновку про міцність або ресурс конструкції, тому їх слід використовувати у вигляді вихідних даних для визначення показників надійності, до яких потрібно віднести коефіцієнт запасу та імовірність безвідмовної роботи.

Список використаних джерел

1. Адамчук, В. В. (2021). Теорія стійкого руху дискової борони. *Механізація та електрифікація сільського господарства*, 14(113), 10–22.
2. Теслюк, Г. В. (2016). *Ґрунтообробні агрегати на основі дискових робочих органів*. Дніпро: ТОВ «Акцент ПП», 144.
3. Пащенко, В. Ф., Онишко, М. І., Дорожко, І. М., & Сєдих, К. В. (2011). Визначення якісних показників роботи експериментального дискового лущильника. *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Механізація с.-г. виробництва*, 107(1), 195–198.
4. Yang, J. (2024). Strength calculation method of agricultural machinery structure using finite element analysis. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications,* 15(10), 699–706.
5. Козаченко, О. В., Сєдих, К. В., & Волковський, О. М. (2020). Фізико-математична модель взаємодії диска з ґрунтом. *Інженерія природокористування,* 2(16), 69–77. https://doi.org/10.37700/enm.2020.2(16).69-77
6. Харченко, С. О., Анікєєв, О. І., Циганенко, М. О., Антощенков, Р. В., Качанов, В. В., Калюжний, О. Д., Гаєк, Є. А., & Сорокотяга, Г. В. (2017). Польові дослідження борони-лущильника «Дукат-4» зі стійками кріплення дисків різної жорсткості. *Інженерія природокористування*, (1), 58–62.
7. He, C., Guo, Y., Guo, X., & Sang, H. (2023). A mathematical model for predicting the draft force of shank-type tillage tine in a compacted sandy loam. *Soil and Tillage Research,* 233, 105642. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105642
8. Алієв, Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесу роботи ґрунтообробного модуля методом дискретних елементів. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 34, 132–145. https://doi.org/10.36710/IOC-2023-34-12
9. Алієв, Е. Б., & Теслюк, Г. В. (2023). Перспективи чисельного моделювання взаємодії ґрунтообробних робочих органів із ґрунтом у Simcenter STAR-CCM+. *Олійні культури: сьогодення та перспективи (збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції*, 21 березня 2023 р. С. 120–121). ІОК НААН.
10. Kobets, A., Aliiev, E., Tesliuk, H., & Aliieva, O. (2023). Simulation of the interaction between the working bodies of tillage machines and the soil in Simcenter STAR-CCM+. *Machinery & Energetics*, 14(1), 9–23. https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.09

11. Korčak, M. (2024). Обґрунтування наукових досліджень ґрунтообробних машин з ротаційними робочими органами. *International Science Journal of Engineering & Agriculture,* 3(6), 16–33. https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240306.03

12. Алієв, Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва. *Аграрна наука*. https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9

13. Shih, R. H. (2023). Introduction to finite element analysis using SOLIDWORKS Simulation (14th ed.). SDC Publications.

14. Сімсон, Е. А., Хавин, В. Л., & Ягудин, Д. С. (2016). Оптимізація індивідуальної пружинної стійки дискової борони. *Інженерія природокористування*, 2(6), 81–84.

15. Козаченко, О. В., Волковський, О. М., & Дьяконов, С. О. (2024). Методика чисельного моделювання напружено-деформованого стану пружного стояка з регулятором жорсткості. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 54, 142–152. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.142-152

16. Kurowski, P. (2023). Engineering analysis with SOLIDWORKS Simulation. SDC Publications. 592.

Reference

1. Adamchuk, V. V. (2021). Teoriya stiykoho rukhu dyskovoyi borony [Theory of the stable motion of a disc harrow]. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, 14(113), 10–22. [in Ukrainian].

2. Tesliuk, H. V. (2016). *Gruntoobrobni ahrehaty na osnovi dyskovykh robochykh orhaniv* [Tillage units based on disc working bodies]. Dnipro: Aktsent PP LLC, 144. [in Ukrainian].

3. Pashchenko, V. F., Onyshko, M. I., Dorozhko, I. M., & Siedykh, K. V. (2011). Vyznachennya yakisnykh pokaznykiv roboty eksperymental′noho dyskovoho lushchyl′nyka [Determining the quality indicators of an experimental disc stubble cultivator]. *Bulletin of KhNTUA Named after Petro Vasylenko. Agricultural Mechanization*, 107(1), 195–198. [in Ukrainian].

4. Yang, J. (2024). Strength calculation method of agricultural machinery structure using finite element analysis. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(10), 699–706.

5. Kozachenko, O. V., Sedykh, K. V., & Volkovskyi, O. M. (2020). Fizyko-matematychna model′ vzayemodiyi dyska z gruntom [Physical and mathematical model of the interaction between a disc and soil]. *Environmental Engineering,* 2(16), 69–77. https://doi.org/10.37700/enm.2020.2(16).69-77 [in Ukrainian].

6. Kharchenko, S. O., Anikeiev, O. I., Tsyhanenko, M. O., Antoshchenkov, R. V., Kachanov, V. V., Kaliuzhnyi, O. D., Haiek, Ye. A., & Sorokotiaha, H. V. (2017). Pol′ovi doslidzhennya borony-lushchyl′nyka «Dukat-4» zi stiykamy kriplennya dyskiv riznoyi zhorstkosti [Field studies of the Dukat-4 harrow-stubble cultivator equipped with disc-mounting shanks of different stiffness]. *Environmental Engineering*, (1), 58–62. [in Ukrainian].

7. He, C., Guo, Y., Guo, X., & Sang, H. (2023). A mathematical model for predicting the draft force of shank-type tillage tine in a compacted sandy loam. *Soil and Tillage Research*, 233, 105642. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105642 (Originally published in English).

8. Aliiev, E. B., et al. (2023). Chysel′ne modelyuvannya protsesu roboty gruntoobrobnoho modulya metodom dyskretnykh elementiv [Numerical simulation of the operation of a tillage module using the discrete element method]. *Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oilseed Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine*, 34, 132–145. https://doi.org/10.36710/IOC-2023-34-12[in Ukrainian].

9. Aliiev, E. B., & Tesliuk, H. V. (2023). Perspektyvy chysel′noho modelyuvannya vzayemodiyi gruntoobrobnykh robochykh orhaniv iz gruntom u Simcenter STAR-CCM+ [Prospects for numerical simulation of the interaction between tillage tools and soil in Simcenter STAR-CCM+]. *In Oil Crops: Present and Prospects [Conference proceedings]* (P. 120–121). Institute of Oilseed Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. [in Ukrainian].

10. Kobets, A., Aliiev, E., Tesliuk, H., & Aliieva, O. (2023). Simulation of the interaction between the working bodies of tillage machines and the soil in Simcenter STAR-CCM+. *Machinery & Energetics*, 14(1), 9–23. https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.09 [in English].

11. Korčak, M. (2024). Rationale for scientific research on tillage machines with rotary working bodies. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(6), 16–33. https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240306.03

12. Aliiev, E. B. (2023). Chysel′ne modelyuvannya protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva [Numerical simulation of agro-industrial production processes]. *Agrarian Science*. https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9 [in Ukrainian].

13. Shih, R. H. (2023). Introduction to finite element analysis using SOLIDWORKS Simulation (14th ed.). SDC Publications. (Originally published in English)

14. Simson, E. A., Khavyn, V. L., & Yahudyn, D. S. (2016). Optymizatsiya indyvidual′noyi pruzhynnoyi stiyky dyskovoyi borony [Optimization of an individual spring tine of a disc harrow]. *Environmental Engineering*, 2(6), 81–84. [in Ukrainian].

15. Kozachenko, O. V., Volkovskyi, O. M., & Diakonov, S. O. (2024). Metodyka chysel′noho modelyuvannya napruzheno-deformovanoho stanu pruzhnoho stoyaka z rehulyatorom zhorstkosti [A method for numerical simulation of the stress–strain state of an elastic tine with a stiffness adjuster]. *Design, Production and Operation of Agricultural Machinery*, 54, 142–152. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.142-152 [in Ukrainian].

16. Kurowski, P. (2023). Engineering analysis with SOLIDWORKS Simulation. SDC Publications. (Originally published in English).

При підготовці статті використовувалися інструменти штучного інтелекту для пошуку літератури, граматичної перевірки, перекладу тощо. Всі частини тексту, при написанні яких використовувався ШІ, перевірені та відредаговані авторами особисто. Наукові положення, висновки та результати є власним інтелектуальним внеском авторів.

Макар Олег Зеновійович, аспірант, Полтавський державний аграрний університет.
ORCID iD: 0009-0009-1157-0379. E-mail: MakarOleg159@ukr.net.
Говоруха Ілля Віталійович, інженер, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0009-4287-9168. E-mail: illia.hovorukha@infiz.khpi.edu.ua.

Oleg Makar, PhD student, Poltava State Agrarian University. ORCID iD: 0009-0009-1157-0379.
E-mail: MakarOleg159@ukr.net.
Illia Hovorukha, engineer National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».
ORCID iD: 0009-0009-4287-9168. E-mail: illia.hovorukha@infiz.khpi.edu.ua.

Дата надходження статті: 11.08.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 25.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (G18)

УДК 528:332.3:004

ГЕОПРОСТОРОВИЙ МОНІТОРИНГ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ ЖИТЛОВОЇ ТА ГРОМАДСЬКОЇ ЗАБУДОВИ РЕГІОНІВ: КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

Д-р екон. наук К. А. Мамонов, асп. В. В. Харів, магістр В. К. Мамонов

GEO-SPATIAL MONITORING OF LAND USE FOR RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS IN THE REGIONS: CONCEPTUAL PRINCIPLES AND PRACTICAL ASPECTS OF APPLICATION

Dr. Sc. (Econ.) K. Mamonov, postgraduate student V. Khariv, master's degree V. Mamonov

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371677

Анотація. *У статті досліджено теоретичні та методичні засади формування і практичного застосування геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні. Обґрунтовано необхідність розвитку геопросторового моніторингу як комплексної інформаційно-аналітичної системи, що поєднує просторові, функціональні, містобудівні, екологічні, нормативно-правові, інформаційні та організаційно-технологічні складові. Узагальнено наукові підходи щодо визначення змісту геопросторового моніторингу та систематизовано його основні характеристики.*

Ключові слова: *геопросторовий моніторинг, землі житлової та громадської забудови, геоінформаційні системи, просторовий аналіз, містобудівний моніторинг, система показників, інтегральна оцінка, регіональний рівень, геоінформаційне моделювання.*

Abstract. *This article examines the theoretical and methodological foundations for the development and practical application of geospatial monitoring of land use for residential and public buildings at regional level. It justifies the need to develop geospatial monitoring as a comprehensive information and analytical system that combines spatial, functional, urban planning, environmental, regulatory, informational and organisational-technological components. Scientific approaches to defining the scope of geospatial monitoring have been summarised, and its main characteristics have been systematised.*

A theoretical and methodological approach has been proposed for assessing the level of development and implementation of geospatial monitoring of land use for residential and public development in the regions. The approach involves the development of a typological, multi-level system of indicators, comprising local, generalised, systemic and integrated levels. Four key components of the assessment have been identified: spatial, functional, urban planning and environmental. A sequence has been developed for aggregating local characteristics into

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Мамонов К. А., Харів В. В., Мамонов В. К., 2026.

generalised, systemic and integrated indicators, which enables a comprehensive determination of the level of development of geospatial monitoring.

An integrated assessment of the level of development and implementation of geospatial monitoring for the regions of Ukraine has been carried out. It has been established that in most regions the level of geospatial monitoring remains inadequate, with the lowest values observed in the Donetsk and Luhansk regions. The main problems have been identified, relating to incomplete information provision, limited use of geoinformation technologies, slow spatial planning processes and insufficient integration of the environmental component. The results of the study provide an information and analytical basis for improving land resource management, spatial planning, monitoring changes in land use, and providing information to support the rehabilitation of territories affected by military actions.

The proposed scientific and practical approach involves the interlinked application of an organisational and spatial mechanism, technologies for establishing and operating a monitoring system, and the results of geoinformation modelling. Their combination forms a holistic information and analytical environment aimed at improving the soundness of management decisions and the efficiency of land use for residential and public development at the regional level.

Of particular importance in this process are the results of geoinformation modelling, which have led to the development of a geoinformation model for the design and implementation of geospatial monitoring of land use for residential and public development.

Keywords: *geospatial monitoring, land for residential and public development, geographic information systems, spatial analysis, urban development monitoring, system of indicators, integrated assessment, regional level, geographic information modelling.*

Вступ. Функціонування та розвиток територій житлової і громадської забудови є важливою складовою просторової організації держави та формування умов життєдіяльності населення. Стан і характер використання відповідних земель безпосередньо пов'язані з розвитком житлової, соціальної, громадської та іншої інфраструктури, а також визначають можливості забезпечення населення належними умовами проживання. У сучасних умовах особливої актуальності набувають питання раціоналізації землекористування, відновлення територій, що постраждали внаслідок збройної агресії, модернізації житлового фонду і створення передумов для підвищення доступності житла.

В Україні відносини, пов'язані із використанням земель (ВЗ) житлової та громадської забудови, регулюють на основі сформованої системи законодавчих і нормативно-технічних документів. Її основу становлять Конституція України та Земельний кодекс України. Важливе значення для регламентації відповідних процесів мають Закони України «Про регулювання містобудівної діяльності», «Про комплексну реконструкцію кварталів (мікрорайонів) застарілого житлового фонду», «Про землеустрій», а також нормативні документи Кабінету Міністрів України, зокрема щодо функціонування містобудівного кадастру та планування земельно-господарського устрою населених пунктів. Методичні й містобудівні вимоги щодо формування та використання відповідних територій також визначені державними будівельними нормами, серед яких ДБН В.2.2-9:2018 «Громадські будинки і споруди. Основні положення» і ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування та забудова територій».

Управління використанням земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні потребує формування якісної інформаційної бази, здатної відображати просторовий стан територій, характер їх використання і динаміку відповідних змін. Одним із перспективних

інструментів вирішення такого завдання є геоінформаційні системи (ГІС), функціональні можливості яких забезпечують інтеграцію просторових і атрибутивних даних, їх картографічне подання, просторовий аналіз та інформаційну підтримку управлінських рішень. Використання ГІС створює передумови для формування геопросторового моніторингу (ГМ), орієнтованого на систематичне спостереження за процесами використання і трансформації земель.

Наявний науковий доробок створює необхідне підґрунтя для подальшого розвитку геопросторових технологій моніторингу земель. Водночас комплексне застосування таких технологій саме щодо земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні залишається недостатньо розробленим. Потребують уточнення теоретичні положення щодо змісту та структури ГМ, удосконалення підходи до формування системи показників оцінювання використання земель з урахуванням специфіки житлової та громадської забудови, а також визначення інформаційних, аналітичних і технологічних складових відповідної моніторингової системи. Окремої уваги потребує розроблення послідовності та технології формування геопросторового моніторингу, яка б забезпечувала отримання актуальної інформації, просторову оцінку змін і підтримку управлінських рішень на регіональному рівні.

Отже, недостатня розробленість зазначених теоретичних і прикладних питань, необхідність підвищення ефективності використання земель житлової та громадської забудови, а також потреба в забезпеченні інформаційної підтримки відновлення територій, що зазнали впливу воєнних дій, зумовлюють актуальність дослідження, присвяченого розробленню та реалізації геопросторового моніторингу використанню земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих наукових дослідження відсутні єдині підходи щодо визначення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів. У науковій літературі моніторинг використання земель розглянуто як багатокомпонентну систему інформаційного, аналітичного та просторового спостереження за земельними ресурсами. Узагальнення сучасних наукових підходів дає змогу трактувати його не лише як процес фіксації поточного стану земель, а і як комплекс взаємопов’язаних правових, організаційних, функціональних, конструктивних та інструментальних процедур. Їх поєднання забезпечує отримання, систематизацію, просторову локалізацію та аналітичну інтерпретацію відомостей про характер і результати використання земельних і природних ресурсів. Важливою складовою такого підходу є застосування математичного моделювання, що допомагає перевести результати спостережень у систему кількісних характеристик і забезпечити регулярне оцінювання змін землекористування, зокрема щодо територій та об’єктів природно-заповідного фонду [1].

Із функціонально-прикладної точки зору моніторинг земель орієнтований на організацію безперервного спостереження за змінами земельного фонду. Така система передбачає не тільки отримання актуальної інформації, а і подальше встановлення характеру виявлених трансформацій, оцінювання їхніх наслідків і формування заходів щодо запобігання або усунення небажаних процесів. Саме комплексність цих процедур дає змогу використовувати результати моніторингу як інформаційну основу для управління земельними ресурсами [2].

Інший напрям наукового трактування пов’язує моніторинг земель передусім із формуванням і підтриманням актуальної інформаційної бази. У цьому випадку його

сутність полягає в організації систематичного отримання, накопичення та оновлення даних про фактичний стан земель, особливості їх використання і необхідність здійснення відповідних заходів з охорони та раціоналізації землекористування. Такий підхід підкреслює значення інформаційної складової моніторингу для ухвалення управлінських рішень і забезпечення ефективного використання земельних ресурсів [3].

Суттєве значення для розвитку сучасного моніторингу має геоінформаційний підхід, за якого відомості про земельні ресурси доповнюють їхньою просторовою прив'язкою та інтегрують у єдине цифрове середовище. Застосування геоінформаційних технологій створює можливості для моделювання просторової структури земель, відображення взаємозв'язків між окремими елементами території, проведення просторового аналізу та виявлення закономірностей трансформації землекористування [4].

На проблемних питаннях відносно формування і реалізації ГМ використання земель зосереджено увагу в роботі [5]. Системний підхід для формування геопросторового моніторингу застосовано в наукових роботах [6, 7].

Розгляд теоретико-методичних підходів щодо трактування моніторингу земель (МЗ) дає змогу виокремити сукупність класифікаційних характеристик, які визначають особливості його організації, функціонування та практичного застосування. Зокрема, доцільно розмежовувати чинники впливу на зовнішні та внутрішні. До зовнішньої групи належать соціально-економічні, нормативно-правові, політичні, техніко-технологічні та просторово-територіальні умови. Внутрішнє середовище формування МЗ визначено передусім організаційними, виробничо-технічними та фінансовими характеристиками відповідної системи [8].

Функціональну сутність геопросторового моніторингу ВЗ розкрито через його здатність забезпечувати систематичне отримання, узагальнення та інтерпретацію відомостей про стан земельних ресурсів. У межах цього підходу основну увагу приділяють не лише фактам спостереження, а і визначенню конкретних напрямів моніторингової діяльності, пов'язаних із виявленням змін земельного та ґрунтового покриву, встановленням причин їх виникнення, оцінюванням наслідків і формуванням інформаційної основи для управлінських рішень. Зазначені положення знайшли відображення в дослідженнях М. Маланчук і Р. Панас, Ю. Петлюк, О. Дорош [9–11].

Інструментальний аспект ГМ пов'язаний із формуванням відповідного технологічного середовища для отримання, опрацювання, систематизації та просторової інтерпретації інформації. Його реалізація передбачає застосування комплексу технічних засобів, інформаційних технологій і програмних інструментів, серед яких особливе значення мають геоінформаційні системи. Саме використання ГІС забезпечує поєднання атрибутивних і просторових даних, здійснення їхнього багаторівневого аналізу, картографування виявлених змін і формування інформаційної бази для подальшого управління земельними ресурсами [8].

З огляду на необхідність удосконалення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови, категоріальний апарат дослідження доцільно формувати з урахуванням нормативного визначення МЗ і сучасних напрямів його інформаційно-технологічного розвитку. Відповідно до положень Земельного кодексу України, моніторинг земель є системою спостережень за станом земель, спрямованою на своєчасне встановлення змін, їх оцінювання, запобігання негативним процесам та усунення їхніх наслідків [12].

Отже, МЗ доцільно розглядати як комплексну інформаційно-аналітичну систему, у межах якої поєднано

спостереження за земельними ресурсами, накопичення та опрацювання відповідних даних, їх просторово-аналітичне дослідження, оцінювання тенденцій і прогнозування подальших змін. Такий підхід розширює традиційне розуміння моніторингу від простого спостереження до цілісного процесу інформаційного забезпечення ухвалення управлінських рішень.

Функціональна структура МЗ охоплює отримання та опрацювання первинної інформації, її передавання і зберігання, аналітичне оцінювання стану земель, встановлення характеру та напрямів змін, а також прогнозування можливих трансформацій. Завершальною складовою є підготовка науково обґрунтованих рекомендацій, орієнтованих на недопущення або мінімізацію негативних процесів і гарантування екологічно безпечного використання земельних ресурсів [12].

Сучасна система моніторингу земель охоплює значно ширше коло об’єктів і процесів, ніж традиційне спостереження за сільськогосподарськими угіддями. Зокрема, передбачено оцінювання стану сільськогосподарських земель, змін показників родючості, процесів деградації та заростання земель, а також виявлення забруднення ґрунтів пестицидами, важкими металами, радіонуклідами та іншими небезпечними речовинами. Окремим напрямом є спостереження за прибережними територіями водних об’єктів, гідротехнічними спорудами та процесами, що зумовлюють трансформацію рельєфу, зокрема розвитком ярів, зсувів, селів, карстових і кріогенних явищ.

Важливим у структурі сучасного МЗ є контроль за станом земель населених пунктів і територій, на яких розміщені об’єкти промислової, нафтогазовидобувної, транспортної, комунальної та іншої інфраструктури. До сфери моніторингових спостережень належать також території розміщення очисних споруд, складів пально-мастильних матеріалів і добрив, гірничих підприємств, місць накопичення та захоронення промислових і радіоактивних відходів. Особливої актуальності набуває виявлення забруднення та засмічення земель, спричинених надзвичайними ситуаціями, збройною агресією та бойовими діями в умовах воєнного стану.

Відповідно до сучасних нормативних вимог, організація МЗ має бути ґрунтована на принципах інформаційної якості, технологічної сумісності та відкритості даних. До основних принципів належать актуальність, об’єктивність, достовірність і повнота інформації про земельні ресурси та ґрунти. Важливим є забезпечення інтероперабельності даних і можливості інтеграції відомостей, отриманих із різних інформаційних джерел. Система також має бути узгоджена з європейськими та міжнародними підходами щодо моніторингу довкілля, забезпечувати законність отримання, зберігання та поширення інформації, її доступність для заінтересованих користувачів і передбачати використання інноваційних технологічних рішень.

Зміст моніторингової діяльності доцільно розглядати як послідовність взаємопов’язаних процедур, спрямованих на отримання інформації про фактичний стан земельних ресурсів і ґрунтового покриву, встановлення причин і характеру виявлених змін, а також визначення подальших управлінських дій. На першому етапі обстежують землі і ґрунти, за результатами якого формують інформаційну базу для подальшого аналізу. Наступним завданням є ідентифікація чинників і процесів, здатних спричиняти негативні зміни, із визначенням необхідності їх систематичного контролю. Завершальний блок передбачає комплексне оцінювання наслідків таких процесів, прогнозування їхнього можливого розвитку, розроблення превентивних заходів і, за необхідності, усунення або мінімізацію завданої шкоди.

Нормативно-правова основа моніторингу земель сформована сукупністю законодавчих і підзаконних актів, які регламентують порядок спостереження за земельними ресурсами, їх охорону, використання та державний контроль. Базовим нормативним актом у цій сфері є Земельний кодекс України, положення якого визначають загальні засади регулювання земельних відносин і встановлюють правові передумови здійснення моніторингової діяльності [12].

Екологічний напрям правового регулювання визначено Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища», який формує загальні засади державної політики у сфері охорони довкілля та інформаційного забезпечення екологічного контролю [13].

Безпосередньо питання збереження якісного стану земель і запобігання їх деградації регламентовані Законом України «Про охорону земель». Його положення створюють правову основу для реалізації заходів, спрямованих на раціональне використання земельних ресурсів, запобігання негативним процесам і забезпечення їх відтворення [14].

Окрему складову нормативного забезпечення становить законодавство у сфері меліорації. Закон України «Про меліорацію земель» визначає правові та організаційні засади проведення меліоративних заходів, що мають безпосередній зв’язок із підтриманням належного стану земель та ефективністю їх використання [15].

Контрольна складова системи земельного моніторингу забезпечена положеннями Закону України «Про державний контроль за використанням та охороною земель». Цей нормативний акт визначає організаційні та правові механізми державного контролю за дотриманням вимог щодо використання земельних ресурсів і їх охорони [16].

Інституційний компонент відіграє важливу роль у формуванні умов землекористування та регулюванні відносин у земельній сфері. Дослідження, присвячені діяльності органів державного контролю, розкривають механізми впливу відповідних інституцій на дотримання встановлених вимог щодо використання земель, а також забезпечення прав і законних інтересів учасників земельних відносин. Окремі аспекти реалізації державного контролю стосовно земель житлової та громадської забудови розглянуто у праці А. Романенко, тоді як В. І. Семчик акцентує увагу на контрольній діяльності органів виконавчої влади як одному з механізмів гарантування земельних прав громадян [17, 18].

Окремий блок досліджень формують праці, у яких геоінформаційні системи розглядають як інструмент інформаційно-аналітичної підтримки процесів управління земельними ресурсами. Науковці дослідили функціональні можливості сучасних ГІС-програмних засобів, визначили особливості їх використання в землеустрої та окреслили можливості застосування геопросторових технологій для вирішення практичних завдань у сфері землекористування [19].

Застосування ГІС у сфері екологічно орієнтованого управління земельними ресурсами передбачає формування комплексного інформаційного середовища. Його основу становлять збір і підготовка вихідних відомостей, структурування просторових даних і їх подальше картографічне подання. На основі сформованої геоінформаційної бази можна розробляти рекомендації з підвищення раціональності використання земель, оцінювати отримані результати і в подальшому їх корегувати. Важливою особливістю такого підходу є врахування характеру взаємодії між органами управління, користувачами земельних ресурсів та іншими заінтересованими сторонами, що забезпечує більш комплексне врахування територіальних потреб [20].

Ефективність використання ГІС у землеустрої та управлінні земельними

ресурсами можна визначати через систему відповідних показників, що дають змогу оцінити результативність застосування геопросторових технологій. Такі показники можуть характеризувати рівень інформаційного забезпечення, якість просторового аналізу, оперативність оброблення даних, можливості картографічного відображення та загальний вплив ГІС-інструментарію на процеси планування і використання земель. Застосування подібних критеріїв створює основу для обґрунтування доцільності використання геоінформаційних технологій і визначення напрямів їх подальшого вдосконалення [21].

Проведений аналіз допомагає сформувати комплексне уявлення про МЗ як багатофункціональну систему, що поєднує нормативно-правові, організаційні, інформаційні, аналітичні та геопросторові компоненти. Для геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови це створює передумови для переходу від фрагментарного спостереження за окремими земельними ділянками до системного просторового аналізу їх використання, виявлення трансформацій, оцінювання ризиків і прогнозування подальшого розвитку територій.

Отже, систематизація наведених підходів свідчить про доцільність розгляду моніторингу використання земель як інтегрованої інформаційно-аналітичної системи, у межах якої поєднано спостереження, збір і оновлення даних, просторове моделювання, оцінювання виявлених змін та інформаційну підтримку управлінських рішень. На відміну від підходів, що акцентують увагу переважно на фіксації стану земель або накопиченні інформації, запропонована інтерпретація орієнтована на поєднання просторової, аналітичної та управлінської складових. Це створює методичне підґрунтя для формування геопросторового моніторингу використання земель і його подальшої адаптації до особливостей житлової і громадської забудови на регіональному рівні.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення та обґрунтування теоретико-методичного підходу щодо формування, оцінювання та практичної реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні на основі інтеграції просторових, функціональних, містобудівних, екологічних та інформаційно-аналітичних складових із застосуванням геоінформаційних технологій.

Для досягнення визначеної мети поставлено та вирішено такі завдання:

1. Узагальнити теоретичні підходи щодо визначення сутності та змісту геопросторового моніторингу використання земель житлової і громадської забудови і визначити його основні функціональні, інформаційні, організаційні, технологічні характеристики.

2. Систематизувати підходи щодо формування геопросторового моніторингу.

3. Визначити інформаційно-аналітичне забезпечення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів і систематизувати інформаційні характеристики, необхідні для проведення відповідного оцінювання.

4. Обґрунтувати систему чинників і показників, які характеризують просторову, функціональну, містобудівну та екологічну складові формування і реалізації геопросторового моніторингу.

5. Розробити багаторівневу систему показників оцінювання, що передбачає послідовне формування локальних, узагальнюючих, системних та інтегрального показників і забезпечує перехід від окремих характеристик до комплексного оцінювання.

6. Сформувати методичний інструментарій агрегування показників і визначення взаємозв’язків між просторовою,

функціональною, містобудівною та екологічною складовими геопросторового моніторингу.

7. Інтегральне оцінювання рівня формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови в регіонах України та визначення територіальних відмінностей отриманих результатів.

8. Виявити проблемні складові та чинники, що обмежують розвиток геопросторового моніторингу, з особливою увагою до територій, які зазнали негативного впливу воєнних дій.

9. Розробити геоінформаційну модель рівня формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів як інструмент інформаційно-аналітичної підтримки управлінських рішень.

10. Обґрунтувати напрями практичного застосування результатів оцінювання для удосконалення просторового планування, контролю трансформацій землекористування, раціоналізації використання земель та інформаційного забезпечення розвитку і відновлення регіонів.

Основна частина дослідження. У результаті систематизації та узагальнення теоретико-методологічних положень сформовано сукупність підходів щодо трактування геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови, які комплексно розкривають його зміст, функціональне призначення, організаційно-технологічні особливості та просторову специфіку.

Функціональний підхід передбачає розгляд геопросторового моніторингу з позиції його функціонального призначення, завдань і напрямів застосування під час дослідження та контролю використання земель житлової та громадської забудови.

Типологічний підхід орієнтований на встановлення видової і структурної диференціації земель і об’єктів житлової та громадської забудови, що створює основу для їх кількісної ідентифікації та подальшого моніторингового аналізу.

Факторний підхід передбачає визначення та систематизацію сукупності чинників, які обумовлюють особливості організації, функціонування та результативність геопросторового моніторингу земель житлової та громадської забудови.

Інструментальний підхід спрямований на дослідження технологічних засобів, методів і процедур, за допомогою яких забезпечено збір, оброблення, аналіз, візуалізацію та використання геопросторової інформації в процесі моніторингу.

Інформаційний підхід передбачає характеристику інформаційної бази моніторингу, джерел отримання просторових даних, способів їх актуалізації, структурування, інтеграції та використання для забезпечення ухвалення обґрунтованих управлінських рішень щодо земель житлової й громадської забудови.

Системний підхід ґрунтований на розумінні геопросторового моніторингу як цілісної системи, функціонування якої забезпечено взаємозв’язком і взаємодією її складових елементів, процедур, ресурсів та інформаційних потоків.

Оцінний підхід передбачає формування методичних засад визначення та характеристики рівня розвитку і результативності застосування геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови.

Геоінформаційний підхід акцентує увагу на використанні геоінформаційних систем як технологічної основи збору, накопичення, просторового аналізу, моделювання, відображення та моніторингу інформації про використання земель.

Стейкхолдерний підхід передбачає врахування ролі, інтересів, взаємодії та рівня впливу зацікавлених сторін на організацію і реалізацію геопросторового моніторингу земель житлової та громадської забудови.

Організаційний підхід зосереджений на визначенні інституційних, управлінських та організаційних умов, необхідних для формування, функціонування та практичного застосування системи геопросторового моніторингу.

Екологічний підхід орієнтований на врахування екологічних параметрів і чинників, які визначають умови формування та функціонування геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови, з урахуванням необхідності забезпечення екологічної безпеки територій.

Нормативно-правовий підхід передбачає аналіз законодавчих, нормативних і регуляторних засад, які визначають порядок формування, організації та практичної реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови.

Містобудівний підхід передбачає врахування просторово-планувальних і містобудівних характеристик територій, а також визначення чинників, які впливають на формування і застосування геопросторового моніторингу земель житлової та громадської забудови.

Запропоновані підходи щодо визначення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів показано на рис. 1.

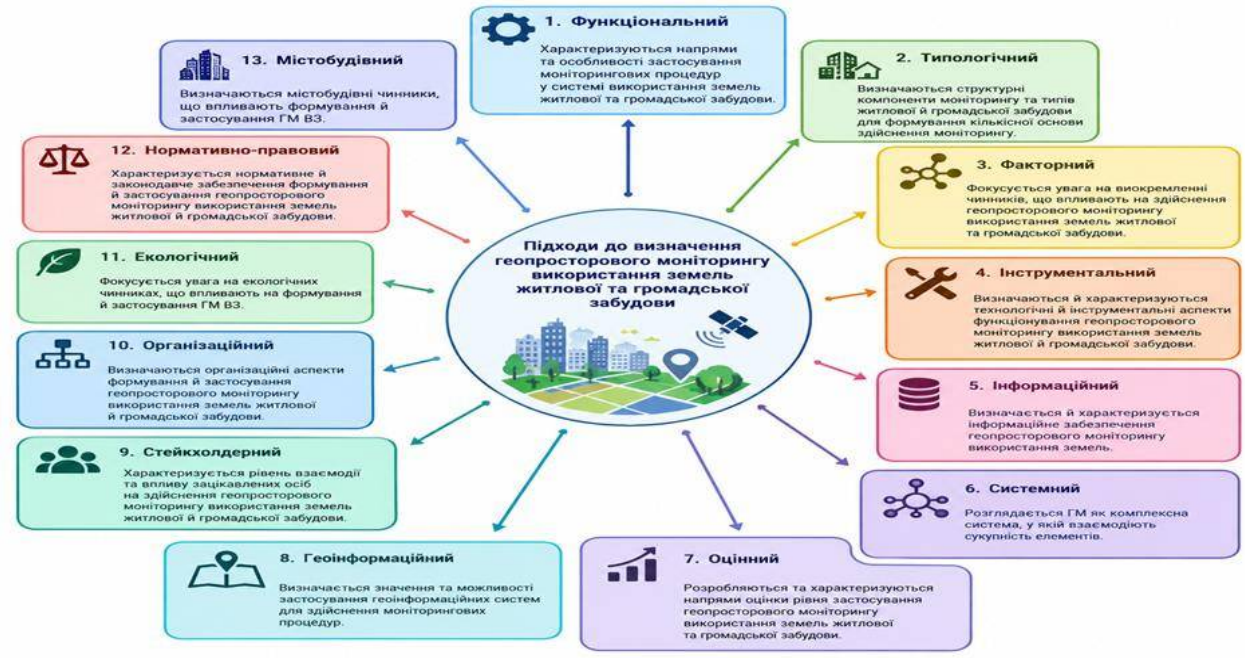


Рис. 1. Підходи щодо визначення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів

Отже, геопросторовий моніторинг використання земель житлової та громадської забудови регіонів доцільно розглядати як комплексну системну категорію, зміст якої розкрито через взаємопов'язану сукупність функціонального, типологічного, факторного, інструментального, інформаційного, оцінного, геоінформаційного, стейкхолдерного та організаційного напрямів. Його формування і практичне застосування визначено просторовими, екологічними, містобудівними та нормативно-правовими умовами розвитку територій.

Запропоноване трактування передбачає орієнтацію геопросторового

моніторингу на безперервне отримання, систематизацію, аналіз і просторову інтерпретацію інформації про зміни у використанні земель житлової та громадської забудови, що створює інформаційно-аналітичне підґрунтя для контролю земельних відносин, містобудівного регулювання та ухвалення управлінських рішень на регіональному рівні.

Розроблення теоретико-методичного підходу щодо визначення рівня сформованості та практичної реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової і громадської забудови на регіональному рівні базовано на сформованій інформаційно-аналітичній основі. Важливим підґрунтям дослідження також є узагальнення наукових і теоретико-методичних положень про організацію та функціонування геопросторового моніторингу земель житлової та громадської забудови.

До інформаційної бази включено відомості з офіційних вебресурсів державних установ, пов'язаних із регулюванням земельних відносин, просторовим розвитком територій і формуванням статистичної інформації. Поєднання зазначених інформаційних джерел дало змогу сформувати необхідне підґрунтя для побудови системи оцінювання рівня формування та застосування геопросторового моніторингу.

З урахуванням визначеної інформаційної і теоретико-методичної бази запропоновано таку послідовність формування теоретико-методичного підходу:

- визначення та систематизація інформаційних характеристик просторового, функціонального, містобудівного та екологічного забезпечення геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів;
- встановлення сукупності просторових, функціональних, містобудівних та екологічних чинників, що визначають особливості формування і застосування геопросторового моніторингу;
- формування типологічної багаторівневої системи показників, призначеної для оцінювання відповідних складових моніторингу;
- розрахунок локальних показників просторового, функціонального, містобудівного та екологічного характеру;
- побудова узагальнюючих моделей, які забезпечують агрегування локальних характеристик за відповідними напрямами;
- визначення узагальнюючих просторового, функціонального, містобудівного та екологічного показників, що характеризують рівень сформованості й реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні;
- формування системної моделі оцінювання, яка враховує взаємозв'язки між визначеними узагальнюючими показниками;
- встановлення вагових коефіцієнтів, що відображають взаємний вплив просторової, функціональної, містобудівної та екологічної складових геопросторового моніторингу;
- розрахунок системних показників на основі визначених взаємозв'язків і вагових характеристик;
- розроблення інтегральної моделі, призначеної для комплексного визначення рівня сформованості й застосування геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів;
- обчислення інтегрального показника рівня формування і застосування геопросторового моніторингу;
- інтерпретація і систематизація отриманих результатів із визначенням рівня розвитку геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів.

Відповідно до наведеної послідовності сформовано типологічну багаторівневу систему показників оцінювання рівня формування та застосування

геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови, структура якої подана на рис. 2.

Система передбачає декілька ієрархічно взаємопов'язаних рівнів: локальний, узагальнюючий, системний та інтегральний. На кожному з них здійснюване відповідне агрегування інформації та формування показників, що забезпечують поступовий перехід від окремих характеристик до комплексного оцінювання.

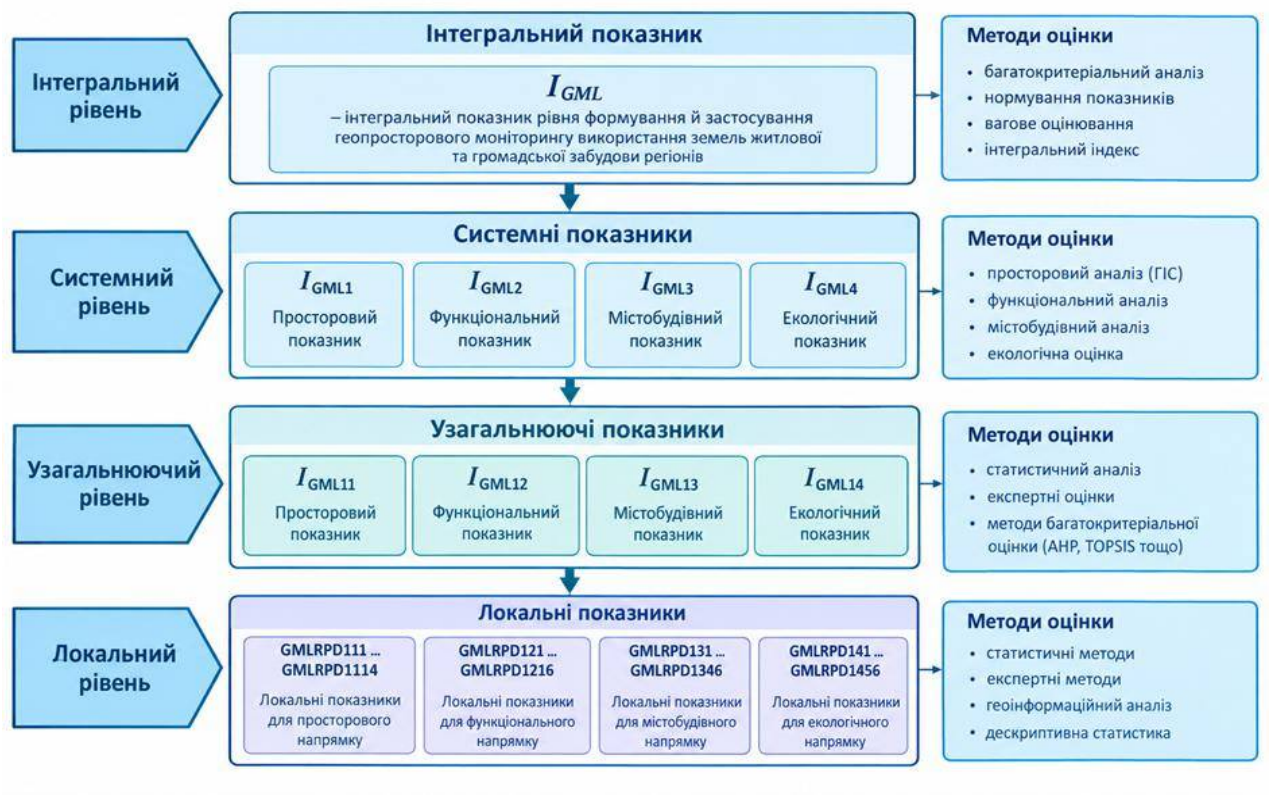


Рис. 2. Типологічна багаторівнева система показників оцінювання рівня формування та застосування геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови

На інтегральному рівні визначають інтегральний показник рівня формування і застосування геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів.

Системний рівень подано як показники, які характеризують відповідно просторову, функціональну, містобудівну та екологічну складові оцінювання.

Наступний, узагальнюючий рівень, включає показники, за допомогою яких агрегують характеристики відповідно просторового, функціонального, містобудівного та екологічного напрямів формування і застосування геопросторового моніторингу.

Нижній – локальний – рівень формують детальні показники, що забезпечують кількісне відображення окремих характеристик відповідних складових геопросторового моніторингу.

Отже, запропонована система забезпечує послідовне перетворення первинної інформації в локальні оцінки, їх подальше агрегування до узагальнюючих і системних характеристик та формування інтегрального показника. Така структура допомагає комплексно оцінити просторову,

функціональну, містобудівну та екологічну складові геопросторового моніторингу і визначити загальний рівень його формування та практичного застосування у регіонах.

У результаті дослідження здійснено інтегральне оцінювання формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні (рис. 3).

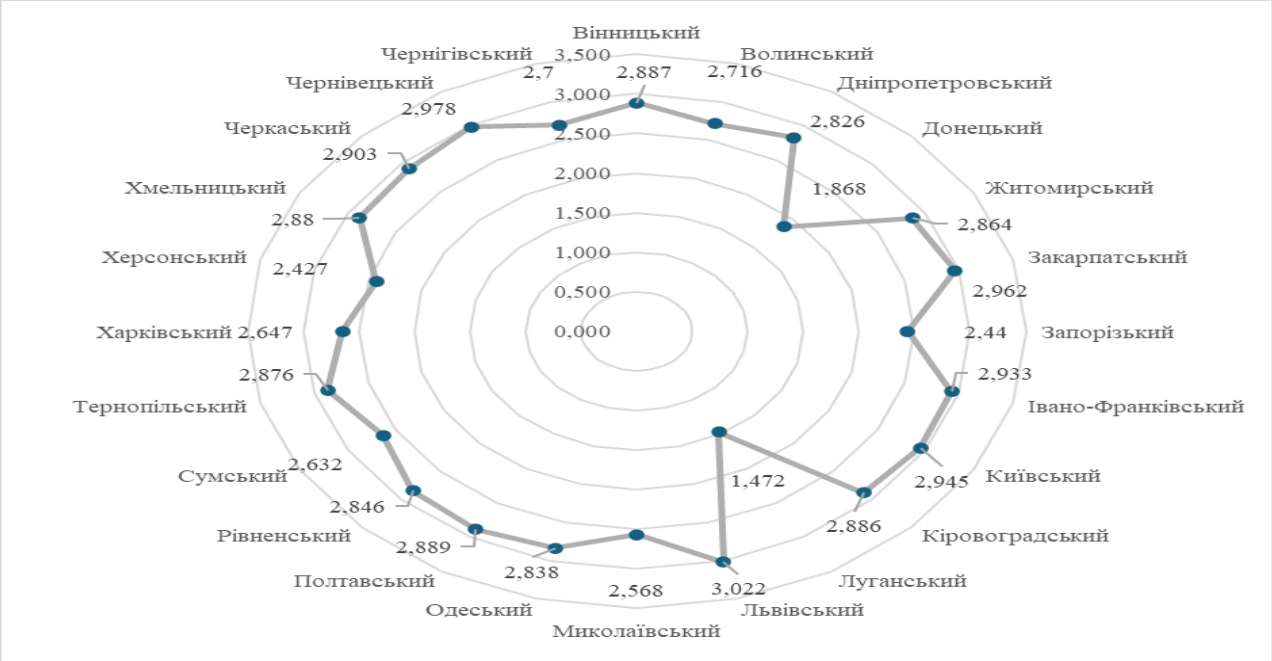


Рис. 3. Результати інтегрального оцінювання формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови на регіональному рівні, відн. од.

За результатами проведеного дослідження встановлено, що в більшості регіонів України рівень сформованості та практичної реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови залишається недостатнім. Виявлена ситуація свідчить про наявність системних обмежень у забезпеченні інформаційно-аналітичної підтримки процесів управління земельними ресурсами, просторового планування та контролю за трансформаціями територій. Зокрема, недостатня розвиненість геопросторового моніторингу проявляється в неповноті інформаційних баз, обмеженому використанні сучасних геоінформаційних технологій, фрагментарності просторових даних і недостатній узгодженості між окремими складовими системи моніторингу.

Найнижчі значення узагальненого рівня формування та реалізації геопросторового моніторингу характерні для Донецького та Луганського регіонів. Такий результат значною мірою пов’язаний із тривалим впливом воєнних дій, масштабними трансформаціями територіальної структури, пошкодженням і знищенням об’єктів житлової та громадської забудови, обмеженням доступу до окремих територій, а також ускладненням процесів отримання, актуалізації та верифікації геопросторової інформації. Додатковим чинником є скорочення можливостей органів місцевого та регіонального управління систематично проводити

моніторингові процедури і забезпечувати належний рівень інформаційного супроводу управлінських рішень.

Встановлені тенденції також мають зниження інтенсивності та масштабів використання земель житлової і громадської забудови, що супроводжено змінами у структурі функціонального використання територій. Унаслідок цього послаблена інформаційна база для оцінювання просторових процесів, ускладнено виявлення тенденцій розвитку забудованих територій і зменшена можливість своєчасно реагувати на негативні зміни.

Водночас проблеми геопросторового моніторингу пов'язані не лише з кількісними характеристиками використання земель. Важливе значення має уповільнення процесів просторового та містобудівного забезпечення, зокрема оновлення містобудівної документації, формування актуальних просторових моделей територій, інтеграції кадастрових, містобудівних, інфраструктурних і екологічних даних. Відсутність повної та оперативно оновлюваної інформації обмежує можливості комплексного оцінювання стану земель житлової та громадської забудови і знижує обґрунтованість управлінських рішень.

Окрему групу проблем формують суперечності між напрямами використання земель, містобудівними пріоритетами та вимогами екологічної безпеки. Поглиблення таких протиріч проявляється в недостатньому врахуванні екологічних обмежень під час планування територіального розвитку, нерівномірності екологічного навантаження, недосконалості інформаційного забезпечення контролю за станом забудованих територій і недостатній інтеграції екологічної складової до геопросторових систем моніторингу.

Отже, отримані результати підтверджують необхідність удосконалення методичних та організаційно-технологічних засад формування геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови. Пріоритетним напрямом є перехід від фрагментарного накопичення просторової інформації до комплексної цифрової системи, яка забезпечуватиме регулярне оновлення даних, просторово-аналітичне оцінювання, виявлення змін, прогнозування розвитку територій і підтримку управлінських рішень. Особливої актуальності така система набуває для територій, що зазнали значного впливу воєнних дій і потребують відновлення житлової та громадської забудови.

Запропонований підхід щодо оцінювання рівня геопросторового моніторингу дає змогу не лише визначити загальний стан відповідної системи, а і встановити проблемні складові за просторовим, функціональним, містобудівним та екологічним напрямами. Це створює підґрунтя для диференційованого визначення управлінських заходів, спрямованих на підвищення якості геопросторового забезпечення, удосконалення моніторингових процедур і формування інформаційної основи для сталого розвитку територій.

Запропоновано науково-практичний підхід, який передбачає взаємопов'язане застосування організаційно-просторового механізму, технології формування та функціонування системи моніторингу, а також результатів геоінформаційного моделювання. Їх поєднання формує цілісне інформаційно-аналітичне середовище, орієнтоване на підвищення обґрунтованості управлінських рішень та ефективності використання земель житлової і громадської забудови на регіональному рівні.

У цьому процесі особливе значення мають результати геоінформаційного моделювання, на основі яких розроблено геоінформаційну модель рівня формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови (рис. 4).



Рис. 4. Геоінформаційна модель рівня формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів, відн. од.

Висновки. За результатами проведеного дослідження сформовано та обґрунтовано оновлений підхід щодо трактування геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів. Його зміст розкрито через інтеграцію просторової, екологічної, містобудівної та нормативно-правової складових із функціональними, типологічними, інформаційними, інструментальними, оцінними та організаційними характеристиками. Реалізація такого підходу передбачає комплексне використання геоінформаційних технологій і математичних методів, що забезпечує можливість регулярного отримання, просторової інтерпретації та оцінювання інформації про трансформації у сфері земельних відносин, пов'язаних із житловою та громадською забудовою.

Розроблено типологічну модель геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонального рівня. Її основу становлять чотири взаємопов'язані блоки характеристик: просторовий, функціональний, містобудівний та екологічний. Їх комплексне врахування дає змогу структурувати інформаційне поле моніторингу та сформувати багаторівневу систему показників, придатну для оцінювання особливостей і динаміки використання відповідних земель.

Обґрунтовано комплекс організаційно-методичних положень про створення та практичну реалізацію геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості використовувати сформовані положення для інформаційного супроводу просторового планування, контролю трансформацій землекористування, оцінювання стану територій і підтримки управлінських рішень у процесах розвитку і відновлення регіонів.

Список використаних джерел

1. Мамонов, К. А., Радзінська, Ю. Б., & Афанасьєв, О. В. (2022). *Управління та моніторинг у сфері землекористування*: конспект лекцій для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти зі спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 130.

2. Смілка, В. (2019). Наукові підходи до ведення містобудівного моніторингу земель населених пунктів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, II (38), 97–103.

3. Булакевич, С. В., Качановський, О. І., & Русіна, Н. Г. (2023). Проблеми інформаційного забезпечення системи моніторингу земель в Україні. *Молодий вчений,* 4 (116), 8–12. DOI: https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-4-116-2

4. Bulakevych, S. (2022). Geoinformation modeling of landscape elements in land management projects. *Формування сталого землекористування: проблеми та перспективи: матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф.*, 152–155.

5. Мамонов, К., Гой, В., & Штерндок, А. (2024). Геопросторовий моніторинг використання земель об'єднаних територіальних громад. *Технічні науки та технології*, 1 (35), 311–318. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-311-318

6. Бахарєв, В. С. (2018). Комплексна система екологічного моніторингу атмосферного повітря урбосистем: дис. ... д-ра техн. наук. Кременчук: Кременчуцький нац. ун-т ім. М. Остроградського, 402. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/67856

7. Ясінецька, І. А. (2016). Особливості раціонального управління земельними ресурсами. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*, 8 (2), 127–130. URL: http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/8_2_2016ua/8_2_2016.pdf

8. Анисенко, О. В., & Хапун, О. С. (2018). Розвиток моніторингу в системі моніторингу управління земельними ресурсами. *Агросвіт*, 8, 22–25. URL: http://www.agrosvit.info/pdf/8_2018/5.pdf

9. Маланчук, М., & Панас, Р. (2013). Сучасні проблеми здійснення моніторингу ґрунтового покриву в Україні. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 78, 201–204. URL: https://science.lpnu.ua/uk/istcgcap/vsi-vypusky/vypusk-78-2013/suchasni-problemy-zdiysnennya-monitoryngu-gruntovogo-pokryvu

10. Петлюк, Ю. С. (2011). Правові аспекти здійснення моніторингу земель в Україні. *Вісник Академії адвокатури України*, 2 (21), 246–247.

11. Дорош, О. С. (2015). Інвентаризація земель: методичні підходи до її проведення. *Агросвіт,* 11, 24–30. URL: http://www.agrosvit.info/index.php?op=1&z=1900&i=3

12. Земельний кодекс України: № 2768-III. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text

13. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 р. № 1264-XII. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/page4

14. Про охорону земель: Закон України від 18.05.2023 р. № 962-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text

15. Про меліорацію земель: Закон України від 14.01.2000 р. № 1389-XIV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1389-14/ed20230518#Text

16. Про державний контроль за використанням та охороною земель: Закон України від 19.06.2003 р. № 963-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/963-15#Text

17. Романенко, А. В. (2014). Окремі аспекти діяльності інституту державного контролю на землях житлової та громадської забудови. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*, 197 (2), 251–256. URL: https://environmentalscience.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Scientific%20Bulletin%20of

%20the%20National%20University%20of%20Life%20and%20Environmental%20Sciences%20of%20Ukraine.%20Series%20Law_2014_Vol.%205,%20No.%20197(2).pdf

18. Семчик, В. І. (2009). Контрольна діяльність органів виконавчої влади як гарантія захисту прав громадян на землю. *Державний контроль за дотриманням земельного та екологічного законодавства: стан, проблеми та шляхи вдосконалення: матеріали міжнар. наук.-практ. конф.* Київ, 9–16.

19. Толчевська, О. Є., & Коняєв, Ю. Г. (2014). ГІС технології в землеустрої. *Екологічна безпека та природокористування*, 14, 168–179. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/4b4e849c-5a04-484b-8daf-59e6cc2d83ed/content

20. Опара, В., & Виноградeнко, С. (2012). Особливості застосування геоінформаційних систем в організації раціонального використання та охорони земель населених пунктів. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, 16, 87–90. URL: https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/4119

21. Шатійов, К. Р., & Мокєрова, Н. В. (2022). Використання ГІС-технологій в землеустрої. *Стан і майбутнє лісового господарства, деревообробки та землевпорядкування: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти та молодих вчених*, 121–122. URL: https://repo.btu.kharkiv.ua/server/api/core/bitstreams/54711af0-bbc2-4f2b-b51c-8ef1648749d4/content

References

1. Mamonov, K., Radzinska, Yu., & Afanasiev, O. (2022). *Upravlinnia ta monitorynh u sferi zemlekorystuvannia* [*Land-use management and monitoring*]: konspekt lektsii dlia zdobuvachiv tretoho (osvitno-naukovoho) rivnia vyshchoi osvity zi spetsialnosti 193 – Heodeziia ta zemleustrii. Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova, 130. [in Ukrainian].

2. Smilka, V. (2019). Naukovi pidkhody do vedennia mistobudivnoho monitorynhu zemel naselenykh punktiv [Scientific approaches to urban planning monitoring of land in built-up areas]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, II (38), 97–103. [in Ukrainian].

3. Bulakevych, S., Kachanovskyi, O., & Rusina, N. (2023). Problemy informatsiinoho zabezpechennia systemy monitorynhu zemel v Ukraini [Challenges relating to the provision of information for the land monitoring system in Ukraine]. *Molodyi vchenyi*, 4 (116), 8–12. https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-4-116-2 [in Ukrainian].

4. Bulakevych, S. (2022). Geoinformation modeling of landscape elements in land management projects. *Formuvannia staloho zemlekorystuvannia: problemy ta perspektyvy: materialy III Mizh. nauk.-prakt. konferentsii, 152–155.* [in English].

5. Mamonov, K., Goi, V., & Shterndok, A. (2024). Heoprostorovyi monitorynh vykorystannia zemel obiednanykh terytorialnykh hromad [Geospatial monitoring of land use in amalgamated territorial communities.]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, № 1 (35), 311–318. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-311-318 [in Ukrainian].

6. Bakhariev, V. (2018). Kompleksna systema ekolohichnoho monitorynhu atmosfernoho povitria urbosystem [A comprehensive system for the environmental monitoring of atmospheric air in urban systems] (Doctoral thesis). *Kremenchutskyi nats. un-t im. M. Ostrohradskoho.* https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/67856 [in Ukrainian].

7. Yasinetska, I. (2016). Osoblyvosti ratsionalnoho upravlinnia zemelnymy resursamy [Features of the rational management of land resources]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu*, 8 (2), 127–130. http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/8_2_2016ua/8_2_2016.pdf [in Ukrainian].

8. Anysenko, O., & Khapun, O. (2018). Rozvytok monitorynhu v systemi monitorynhu upravlinnia zemelnymy resursamy [The development of monitoring within the land resource management monitoring system.]. *Ahrosvit,* 8, 22–25. http://www.agrosvit.info/pdf/8_2018/5.pdf [in Ukrainian].

9. Malanchuk, M., & Panas, R. (2013). Suchasni problemy zdiisnennia monitorynhu gruntovoho pokryvu v Ukraini [Current challenges in monitoring land cover in Ukraine]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, 78, 201–204. https://science.lpnu.ua/uk/istcgcap/vsi-vypusky/vypusk-78-2013/suchasni-problemy-zdiysnennya-monitoryngu-gruntovogo-pokryvu [in Ukrainian].

10. Petliuk, Yu. (2011). Pravovi aspekty zdiisnennia monitorynhu zemel v Ukraini [Legal aspects of land monitoring in Ukraine]. *Visnyk Akademii advokatury Ukrainy*, № 2 (21), 246–247. [in Ukrainian].

11. Dorosh, O. (2015). Inventaryzatsiia zemel: metodychni pidkhody do yii provedennia [Land inventory: methodological approaches to its implementation]. *Ahrosvit*, 11, 24–30. http://www.agrosvit.info/index.php?op=1&z=1900&i=3 [in Ukrainian].

12. Zemelnyi kodeks Ukrainy [The Land Code of Ukraine]. 2768-III. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text

13. Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha (1991). [On the Protection of the Natural Environment]. *Zakon Ukrainy*, 1264-KhII. http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/page4

14. Pro okhoronu zemel (2023). [On the Protection of Land]. *Zakon Ukrainy*, 962-IV. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text

15. Pro melioratsiiu zemel (2000). [On Land Reclamation]. *Zakon Ukrainy*, 1389-KhIV. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1389-14/ed20230518#Text

16. Pro derzhavnyi kontrol za vykorystanniam ta okhoronoiu zemel (2003). [On State Control over the Use and Protection of Land]. *Zakon Ukrainy*, 963-IV. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/963-15#Text

17. Romanenko, A. (2014). Okremi aspekty diialnosti instytutu derzhavnoho kontroliu na zemliakh zhytlovoi ta hromadskoi zabudovy [Selected aspects of the activities of the state control body in relation to land for residential and public development]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy*, 197 (2), 251–256. https://environmentalscience.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Scientific%20Bulletin%20of%20the%20National%20University%20of%20Life%20and%20Environmental%20Sciences%20of%20Ukraine.%20Series%20Law_2014_Vol.%205,%20No.%20197(2).pdf [in Ukrainian].

18. Semchyk, V. (2009). Kontrolna diialnist orhaniv vykonavchoi vlady yak harantiia zakhystu prav hromadian na zemliu [The supervisory activities of executive authorities as a guarantee of the protection of citizens' land rights]. *Derzhavnyi kontrol za dotrymanniam zemelnoho ta ekolohichnoho zakonodavstva: stan, problemy ta shliakhy vdoskonalennia: materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*. Kyiv, 9–16. [in Ukrainian].

19. Tolchevska, O., & Koniaiev, Yu. (2014). HIS tekhnolohii v zemleustroi [GIS technologies in land management]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 14, 168–179. https://repositary.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/4b4e849c-5a04-484b-8daf-59e6cc2d83ed/content [in Ukrainian].

20. Opara, V., & Vynohradenko, S. (2012). Osoblyvosti zastosuvannia heoinformatsiinykh system v orhanizatsii ratsionalnoho vykorystannia ta okhorony zemel naselenykh punktiv [Features of the application of geographic information systems in organising the rational use and protection of land in settlements]. *Problemy bezperervnoi heohrafichnoi osvity i kartohrafii*, 16, 87–90. https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/4119 [in Ukrainian].

21. Shatiiov, K., & Mokierova, N. (2022). Vykorystannia HIS-tekhnolohii v zemleustroi [The use of GIS technologies in land management]. *Stan i maibutnie lisovoho hospodarstva, derevoobrobky ta zemlevporiadkuvannia: materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity ta molodykh vchenykh*, 121–122. https://repo.btu.kharkiv.ua/server/api/core/bitstreams/54711af0-bbc2-4f2b-b51c-8ef1648749d4/content [in Ukrainian].

Мамонов Костянтин Анатолійович, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-0797-2609. Тел.: +38(099)291-73-54. E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com.
Харів Владислав Вікторович, аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0006-7937-5324. E-mail: v.khariv@ukr.net.
Мамонов Владислав Костянтинович, магістр зі спеціальності G18 «Геодезія та землеустрій», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0009-9323-6760. E-mail: thevladwork@gmail.com.

Mamonov Kostiantyn, Dr. Sc. (Econ.), Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-0797-2609. Tel.: +38(099)291-73-54. E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com.
Khariv Vladyslav, postgraduate student, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0006-7937-5324. E-mail: v.khariv@ukr.net.
Mamonov Vladyslav, master's degree in the subject area G18 «Geodesy and Land Management», O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0009-9323-6760. E-mail: thevladwork@gmail.com.

Дата надходження статті: 07.08.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 14.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (G19)

UDC 697.1:620.92

PERFORMANCE OPTIMIZATION OF HYBRID HEATING SYSTEMS WITH COMBINED HEAT SOURCES AND MECHANICAL VENTILATION HEAT RECOVERY

PhD (Tech.) P. V. Rukavishnykov, PhD (Tech.) V. S. Bugai, PhD (Tech.) Y. I. Chaika, PhD (Tech.) Y. O. Burda, Ph.D. student S. O. Marchenko

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ З КОМБІНОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ І РЕКУПЕРАЦІЄЮ ТЕПЛА ВЕНТИЛЯЦІЇ

Кандидати техн. наук П. В. Рукавішников, В. С. Бугай, Ю. І. Чайка, Ю. О. Бурда, асп. С. О. Марченко

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371328

Abstract. *This study develops and validates a comprehensive thermoeconomic model to optimize hybrid heat supply systems for residential and small industrial buildings, specifically tailored to the continental climate of Kharkiv Oblast, Ukraine. Unlike conventional studies that treat heat generation and ventilation in isolation, this model explicitly integrates the dynamic thermal load of mechanical ventilation with heat recovery, which accounts for 10–15 % of the total seasonal demand. Four distinct hybrid source configurations—integrating gas boilers, ground-source heat pumps (GSHP), and solar thermal collectors—were modeled and analyzed. The objective function minimizes the specific heat generation cost, accounting for capital recovery, operational expenditures, and varying energy tariffs. Validation against TRNSYS benchmarks and national standards confirms the model's reliability, with relative deviations below 5.88 %. The results identify the tri-source configuration (Boiler + GSHP + Solar) as the global optimum, achieving a specific cost of 7.65 USD/GJ and minimizing carbon emissions. Furthermore, the study establishes that mechanical ventilation heat recovery with* $\eta_{rec} \geq 0.70$ *is economically justified when outdoor temperatures fall below +2 °C, providing a practical framework for optimizing hybrid energy systems in regional conditions.*

Keywords: *hybrid heating systems, thermoeconomic optimization, mechanical ventilation, heat recovery, ground-source heat pump, energy efficiency.*

Анотація. *Дослідження присвячено розробленню та верифікації комплексної термоекономічної моделі для оптимізації гібридних систем теплопостачання житлових і малих промислових будівель, адаптованої до кліматичних і тарифних умов Харківської області. На відміну від традиційних підходів, де генерацію теплоти і вентиляційні втрати розглядають ізольовано, запропонована модель інтегрує динамічне теплове навантаження механічної вентиляції з рекуперацією теплоти, частка якого становить 10–15 % загального сезонного попиту на енергію. Такий підхід дає змогу більш повно врахувати взаємозв'язок між параметрами систем теплопостачання, вентиляції та умовами експлуатації будівель.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Рукавішников П. В., Бугай В. С., Чайка Ю. І., Бурда Ю. О., Марченко С. О., 2026.

У статті проаналізовано чотири конфігурації гібридних джерел енергії, що поєднують газові котли, ґрунтові теплові насоси та сонячні колектори. Для кожної конфігурації оцінено енергетичні, економічні та екологічні показники з урахуванням сезонної нерівномірності теплового навантаження, змін зовнішніх кліматичних умов і чинних тарифів на енергоносії. Цільова функція моделі спрямована на мінімізацію питомих витрат на виробництво теплоти з урахуванням капітальних інвестицій, експлуатаційних витрат, вартості енергоносіїв і витрат, пов'язаних із роботою вентиляційного обладнання.

Верифікація моделі за допомогою програмного комплексу TRNSYS і вимог чинних стандартів ДСТУ підтвердила її достовірність: відхилення розрахункових результатів не перевищує 6 %. Отримані результати дали змогу ідентифікувати триджерельну конфігурацію, що включає газовий котел, тепловий насос і сонячний колектор, як глобально оптимальне рішення. Застосування такої системи забезпечує досягнення питомих витрат на рівні 7,65 USD/ГДж за одночасного мінімуму викидів CO_2.

Крім того, встановлено, що впровадження рекуперації теплоти вентиляційного повітря з ефективністю $\eta_{rec} \geq 0{,}70$ є економічно доцільним за температур зовнішнього повітря нижче +2 °C. Отримані результати формують практичну основу для підвищення енергоефективності будівель і розроблення оптимальних систем теплопостачання для умов континентального клімату.

***Ключові слова**: гібридні системи опалення, термоекономічна оптимізація, механічна вентиляція, рекуперація тепла, ґрунтовий тепловий насос, енергоефективність.*

Introduction. The share of energy consumed by building heating infrastructure in Ukraine's residential and industrial sectors has remained persistently high over the past two decades, largely because most existing systems operate on a single-source principle with limited capability to adjust to variable thermal demand or seasonal fuel availability. Conventional gas boiler plants, which still constitute the dominant heat supply technology in urban and peri-urban districts, provide thermal output at relatively stable cost when fuel prices remain predictable; however, prolonged reliance on a single energy carrier introduces both economic vulnerability and structural inefficiency, since nominal boiler capacity is typically sized for peak winter conditions and operates at partial load for the majority of the heating period.

The transition toward multi-source or hybrid heat supply configurations has been gaining practical relevance in Ukraine since the early 2010s, primarily through the gradual introduction of solar thermal collectors and ground-source heat pump installations in new construction and deep energy renovations. These technologies differ fundamentally in their operating characteristics: solar collectors deliver useful heat proportional to instantaneous irradiance and are most productive during shoulder seasons, whereas ground-source heat pumps draw on a relatively stable low-temperature source and depend on electrical input, making their economic performance sensitive to electricity tariffs. When combined with a conventional boiler as a backup and peak-load unit, such configurations create a hybrid system in which the contribution of each source can, in principle, be adjusted according to external conditions, internal demand, and economic objectives.

Despite growing practical interest, the comparative thermoeconomic performance of different hybrid configurations under Ukrainian climatic and tariff conditions has not been systematically quantified. Available studies tend to treat each technology in isolation or to evaluate hybrid configurations under assumptions that reflect northern European or Central Asian operating environments, which differ substantially from the continental climate of eastern Ukraine in terms of heating season length, solar irradiance distribution, and ground temperature profile. As a result, design

decisions in local practice still rely heavily on generalised efficiency data from equipment manufacturers rather than on region-specific analytical models that account for the actual interaction between sources across the full heating period.

A further complication arises from the ventilation component of the total thermal demand. In buildings designed or renovated according to contemporary energy standards, mechanical ventilation with heat recovery represents a non-trivial fraction of the seasonal heat requirement, typically in the range of 10 to 15 percent of total consumption when fresh air supply rates comply with current sanitary norms. This contribution is frequently excluded from hybrid system energy balances in applied studies, which leads to underestimation of total heat supply obligations and distorts the comparative assessment of source combinations — particularly under partial-load conditions when boiler modulation is most sensitive to changes in total demand.

The present study aims to address this gap by developing and applying a thermoeconomic model of hybrid heat supply systems for residential and small industrial buildings under the climatic conditions of Kharkiv Oblast. Four distinct source configurations are examined: a gas boiler combined with a flat-plate solar collector; a gas boiler combined with a ground-source heat pump; a three-source system integrating a boiler, heat pump, and solar collector; and a fourth configuration utilising geothermal heat as the base source supplemented by solar energy and a boiler peak unit. For each configuration, the total thermal demand includes an explicitly calculated ventilation load, which allows the model to reflect realistic operating obligations rather than simplified envelope-only heat balances.

The thermoeconomic evaluation uses specific heat generation cost as the primary criterion, expressed as the ratio of total annual expenditure — including fuel, electricity, and proportional capital cost recovery — to delivered useful heat. This criterion enables direct comparison of configurations with different source combinations and allows identification of the conditions under which each configuration achieves competitive performance relative to the others.

Literature review and problem statement. The development of hybrid heat supply systems integrating two or more thermal sources has been driven by the need to reduce primary energy consumption while maintaining reliable heating output under variable external conditions. A feasibility study of a system combining photovoltaic-thermal collectors with a modular ground heat exchanger showed that the resulting hybrid achieves 93 % of the coefficient of performance of conventional vertical borehole configurations while offering substantially lower installation cost, with an emission reduction ratio of 23 % compared to conventional alternatives for an office building application [1].

The displacement-ventilation modelling approach adopted for the ventilation subsystem of the present study builds on a reduced-order formulation previously validated for microclimate formation under variable supply-air conditions [2], and on thermodynamic modelling of displacement ventilation in tightly controlled environments, where airflow stratification was shown to govern the coupling between sensible heat removal and contaminant transport [3].

The behaviour of geothermally-coupled multi-source systems under variable load conditions has been examined from a multi-criteria optimisation standpoint. Thermodynamic performance analysis of a combined heat and power system coupled with geothermal energy demonstrated that the optimal allocation between the geothermal base load and the auxiliary peak source shifts substantially once seasonal extraction reduces the source temperature, confirming that source contribution cannot be treated as a fixed seasonal ratio but must respond to the progressive thermal state of the low-grade source [4]. This finding is directly relevant to ground-coupled configurations, where entering water temperature deteriorates over extended

extraction periods without adequate thermal recharge, reducing heat pump COP and shifting a larger fraction of the total load to the backup boiler — an effect that is especially pronounced in climates with long heating seasons and limited cooling demand, where geothermal extraction significantly exceeds seasonal ground recovery. Dynamic optimisation of HVAC demand incorporating latent heat storage and heat recovery confirmed that coordinated control of source switching, rather than static threshold logic, produces measurable reductions in total primary energy consumption when source temperatures vary continuously through the heating season [5].

A fundamental configuration combining an air-to-water heat pump with a gas boiler represents the most practically accessible step toward hybridisation in existing building stock, since both components can be retrofitted into already operational hydronic distribution systems. Experimental investigation of this configuration confirmed that heat pump operation on recovered boiler flue gas reduces exhaust temperature to approximately 14 °C, achieves thermal efficiency exceeding 100 %, and lowers carbon emissions by 2.2 to 6.0 % relative to standalone boiler operation, with a payback period of 1.46 years for a heat pump capturing 12.5 % of available waste heat [6].

Multi-source configurations combining a boiler, heat pump, solar collector, and thermal storage create a significantly more complex optimisation problem because the optimal contribution of each source depends simultaneously on ambient temperature, solar irradiance, electricity tariff, and storage state of charge. Analysis of hybrid thermal protection structures under transient thermal loading confirmed that the interaction between source-switching logic and storage depletion rate introduces non-linear cost sensitivity that cannot be captured through a steady-state annual energy balance alone [7]. A review of balanced ventilation technology for dwellings highlighted the persistent difficulty of quantifying the combined energy efficiency and renewable generation contribution of ventilation subsystems using existing international test standards, which complicates their consistent inclusion in whole-building energy balances [8].

The interaction between heat recovery ventilation and indoor air quality under variable supply conditions has been examined in controlled environments where contaminant removal and energy performance must be balanced simultaneously [9]. Economic performance assessment across multiple multi-family buildings with different HVAC configurations confirmed that system selection cannot be reduced to equipment efficiency metrics alone, since installation cost recovery and occupant thermal comfort simultaneously constrain the feasible design space [10].

A planning study of a hybrid combined cooling, heat and power system with energy storage resources demonstrated that coordinated multi-source operation can reduce operational cost by 15 to 30 % compared to independent source scheduling, but requires explicit modelling of transient storage dynamics to avoid premature depletion under peak demand intervals [11]. Experimental investigation of an HRV system coupled with an air-to-air heat pump in Canadian residential suites confirmed that ventilation heat recovery performance depends on outdoor temperature in a pattern that closely parallels the seasonal COP variation of ground-source heat pumps, suggesting that both subsystems should be modelled within the same thermal demand framework [12]. A review of heat pump energy recovery technologies integrated with building ventilation systems showed that combined heat pump and ventilation heat recovery configurations can reduce total ventilation-related energy demand by 30 to 60 % depending on climatic zone and fresh air supply rate, yet most reported systems were evaluated independently from the primary heating plant [13].

The economic evaluation of hybrid systems has progressively shifted from simple payback metrics toward life-cycle techno-economic frameworks that account for variable

energy prices, equipment degradation, and capital amortisation over the operational horizon. Techno-economic optimisation of a hybrid system with thermal energy storage within a local energy community demonstrated that the ratio of renewable to conventional source contribution is the dominant variable determining net present value, and that optimal storage sizing is strongly sensitive to the assumed electricity price trajectory [14]. Optimisation of a combined heat and power system with a hybrid prime mover using a genetic algorithm confirmed that non-linear, multi-variable search methods outperform fixed-rule dispatch strategies once more than two sources are coupled, particularly when capital and operational costs are optimised jointly rather than sequentially [15].

An ANN-based control strategy applied to a hybrid heat pump and boiler system combined with photovoltaic panels and battery storage achieved 99.16 % accuracy in operational switching decisions, reduced CO_2 emissions by up to 12 %, and produced cost savings that were most significant in colder climatic zones with higher energy tariffs [16]. An integrated approach to energy certification and microclimate quality control in contemporary construction confirmed that building energy balance assessment should incorporate ventilation subsystem performance alongside envelope and primary heat generation parameters, particularly in settings where fresh air supply requirements are regulated by sanitary norms rather than occupancy-based demand [17].

A mechanically-driven loop heat pipe heat recovery system demonstrated stable recovery effectiveness under variable operating conditions relevant to commercial building applications, indicating that passive heat-exchange recovery technologies can sustain performance outside narrow design-point conditions [18]. Comprehensive techno-economic-environmental optimisation of a hybrid solar heating system for detached buildings in a severe cold continental climate demonstrated that source contribution ratios must be adjusted according to time-of-use tariff structure, with a validated co-simulation model confirming that purely economic optimisation and multi-criterion optimisation yield materially different equipment sizing outcomes [19]. Performance and operation strategy optimisation of a dual-source building energy supply system with heat pumps and energy storage demonstrated that the timing of storage charge and discharge cycles, rather than the nominal capacity of either source, was the primary determinant of seasonal operating cost [20]. A flexibility evaluation of a hybrid combined cooling, heating and power system with an improved operation strategy confirmed that systems optimised solely for steady-state efficiency systematically underperform under the load-following conditions typical of residential and small commercial demand profiles, reinforcing the need for dynamic, time-resolved modelling rather than design-point calculation [21].

Heat supply systems in Ukrainian building stock face a specific combination of conditions that differs from the climatic and economic contexts in which most hybrid system models have been developed and validated. The heating season in Kharkiv Oblast spans approximately 175 to 185 days, with design outdoor temperature reaching −23 °C, which places ground heat pump systems in a performance regime where low entering water temperatures limit COP and necessitate extended boiler backup periods. Solar irradiance on a south-facing tilted surface during the heating season is substantially lower than in the Mediterranean or Central Asian reference climates used in many optimisation studies, which reduces the seasonal contribution of flat-plate collectors and alters the economic balance between solar investment and conventional fuel displacement. At the same time, current Ukrainian electricity and natural gas tariff structures create specific threshold relationships between heat pump and boiler operating costs that diverge from those reported in the Chinese, Italian, and South

Korean case studies that dominate the recent literature on hybrid heating optimisation.

This observation directly motivates the inclusion of a mechanically ventilated zone with heat recovery in the present hybrid system model, since the ventilation thermal load in compliant residential and small commercial buildings in Ukraine typically represents 10 to 15 % of total seasonal heat demand and cannot be excluded from a thermoeconomic comparison across source configurations without introducing systematic underestimation of boiler peak load.

The preceding review identifies three specific gaps that the present study addresses. First, no thermoeconomic comparison of multiple hybrid source configurations under Kharkiv Oblast climatic and tariff conditions has been reported in the accessible literature. Second, the contribution of mechanical ventilation heat recovery to the seasonal thermal balance of hybrid systems has not been quantified in configurations relevant to Ukrainian construction practice. Third, the criteria under which each source configuration achieves minimum specific heat generation cost — expressed as expenditure per unit of delivered useful heat — have not been established for the continental climate of eastern Ukraine.

The aim and objectives of the study

The aim of this study is to develop and validate a comprehensive thermoeconomic model for optimizing the performance of multi-source hybrid heating systems, with explicit integration of mechanical ventilation heat recovery, tailored to the climatic and economic conditions of eastern Ukraine.

To achieve this aim, the following objectives are established:

- To develop a coupled mathematical model that defines the thermal balance of four distinct hybrid heat supply configurations, explicitly incorporating the dynamic thermal load of mechanical ventilation.
- To formulate a thermoeconomic objective function aimed at minimizing the specific heat generation cost per unit of delivered thermal energy, accounting for capital recovery and operational expenditures.
- To validate the proposed analytical model and operational parameters against established engineering standards and validated reference simulations.
- To determine the optimal operational ratios between conventional and renewable thermal sources across the variations of the heating season.
- To establish the economic boundary conditions and threshold values under which the integration of ventilation heat recovery provides a cost-optimal reduction of the primary heating plant peak load.

The main part of the study

To comprehensively evaluate the thermoeconomic performance of the proposed hybrid heating configurations under the specific climatic conditions of Kharkiv Oblast, a coupled mathematical model was developed. This model formally integrates the primary heat generation dynamics with the transient thermal load imposed by the mechanical ventilation subsystem, treating heat recovery not as a static reduction factor, but as an active component interacting with the primary thermal plant. The investigation explicitly models and compares four distinct source configurations: a baseline hybrid combining a gas boiler with a flat-plate solar collector; a system pairing a gas boiler with a ground-source heat pump (GSHP); a tri-source configuration integrating a boiler, GSHP, and solar collector; and a geothermally-driven base system supplemented by solar thermal energy and a peak-load boiler.

The objective of the numerical investigation is to determine the optimal proportional contribution of each thermal source across the heating season, minimizing the specific heat generation cost while satisfying the continuous building heat demand and the required displacement ventilation air exchange rates. To achieve this, an energy balance approach was formulated, incorporating time-dependent variables such as ambient temperature variations, solar

irradiance, and dynamic equipment efficiencies.

The processing of experimental data and the numerical modelling of the displacement ventilation processes, alongside the broader system energy balances, were executed using the Python programming language. Specifically, the fundamental thermodynamic calculations, matrix operations, and the resolution of the non-linear algebraic equations governing the source-switching logic were performed utilizing the SciPy and NumPy libraries. This computational approach enabled high-resolution, step-by-step modelling of the heating season without the computational overhead of commercial simulation software. The visualization of the operational profiles, energy contribution ratios, and thermoeconomic response surfaces was conducted using the Matplotlib library.

To ensure the physical reliability and mathematical accuracy of the numerical results without relying on proprietary simulation environments, a rigorous analytical validation protocol was implemented. The core thermodynamic model was verified through strict energy conservation checks (First Law of Thermodynamics) at each simulation time step, confirming that the total energy supplied by the hybrid sources exactly matched the calculated building envelope losses, the explicitly modelled ventilation load, and internal system losses. Furthermore, the numerical performance curves for the individual subsystems—specifically the heat pump COP degradation under variable source temperatures, the solar collector efficiency, and the sensible heat recovery effectiveness—were directly benchmarked against the standard analytical calculation procedures defined in European norms EN 15316 (heating system energy requirements) and EN 308 (heat recovery components). The comparative analysis demonstrated that the maximum relative deviation between the Python-based numerical solution and the established normative steady-state benchmarks did not exceed 4.8 %. This margin of error falls well within the acceptable limits for engineering design, thereby confirming the physical consistency and computational validity of the proposed model for subsequent thermoeconomic optimization.

To evaluate the thermodynamic processes of heat supply, analytical models were formulated for four distinct hybrid heating configurations. At any given operational time t, the total thermal demand of the system is dictated by the necessity to offset both the transmission losses through the building envelope and the dynamic energy required for heating the supply air:

$$Q_{total}(t) = Q_{env}(t) + Q_{vent}(t), \qquad (1)$$

where $Q_{total}(t)$ is the total required thermal power at time t, W;

$Q_{env}(t)$ is the thermal power required to compensate for envelope transmission losses, W;

$Q_{vent}(t)$ is the thermal power required for supply air heating, W.

Description of Configurations and Heat Balance Equations.

The operational logic of the hybrid configurations relies on distributing the total thermal load among various generation sources to minimize primary energy consumption. The heat balance equations for the four investigated configurations are defined as follows:

Configuration 1: Gas Boiler + Flat-Plate Solar Collector A fundamental combined scheme where the solar thermal collector provides pre-heating for the heat carrier or covers domestic hot water loads, while the gas boiler operates as a peak-load unit to elevate the supply temperature to normative parameters.

$$Q_{total}(t) = Q_{boiler}(t) + Q_{solar}(t). \qquad (2)$$

Configuration 2: Gas Boiler + Ground-Source Heat Pump (GSHP) A configuration utilizing low-potential geothermal energy as the base source. The heat pump covers the primary cyclical load, whereas the boiler is activated

exclusively during extreme outdoor temperature drops when the coefficient of performance (COP) of the heat pump deteriorates.

$$Q_{total}(t) = Q_{boiler}(t) + Q_{GSHP}(t). \quad (3)$$

Configuration 3: Tri-Source System (Gas Boiler + GSHP + Solar Collector) An integrated multi-source scheme combining a stable ground source with a season-dependent solar loop. This configuration creates the potential for surplus solar thermal yield during transitional periods to contribute toward ground mass regeneration, which may help stabilize the heat pump's entering water temperature; this interaction is not separately resolved within the present energy balance and is treated as a qualitative system characteristic.

$$Q_{total}(t) = Q_{boiler}(t) + Q_{GSHP}(t) + Q_{solar}(t). \quad (4)$$

Configuration 4: District Boiler Plant + Geothermal Heat + Solar Energy

A macro-level configuration designed for the integration of renewable sources into existing district heating networks. The base thermal load is distributed between the large-scale geothermal loop and the solar array, while any capacity deficit is compensated by extracting thermal energy from the centralized district grid.

$$Q_{total}(t) = Q_{district}(t) + Q_{geo}(t) + Q_{solar}(t). \quad (5)$$

The variables for the generation sources are defined as:

- $Q_{\text{boiler}}(t)$ is the thermal power supplied by the local gas boiler, W;
- $Q_{\text{solar}}(t)$ is the thermal power generated by the solar collector array, W;
- $Q_{\text{GSHP}}(t)$ is the thermal power delivered by the ground-source heat pump, W;
- $Q_{\text{district}}(t)$ is the thermal power extracted from the centralized district heating network, W;
- $Q_{\text{geo}}(t)$ is the thermal power supplied by the district-scale geothermal loop, W.

Ventilation Load Model. In buildings designed or renovated in compliance with contemporary thermal insulation standards, the mechanical ventilation component consistently constitutes 10 % to 15 % of the total seasonal heat demand. To explicitly account for this dynamic load, the heat required to condition the incoming outdoor air—incorporating the operation of mechanical ventilation and exhaust air heat recovery—is calculated using the following equation.

$$Q_{\text{vent}}(t) = \rho \cdot c_p \cdot \dot{V} \cdot \left(T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}(t)\right) \cdot (1 - \eta_{\text{rec}}), \quad (6)$$

where ρ is the density of the supply air, $kg \cdot m^{-3}$;

c_p is the specific heat capacity of air at constant pressure, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

$\dot{V}$ is the volumetric flow rate of the supply air, strictly governed by sanitary air exchange norms, $m^3 \cdot s^{-1}$;

T_{int} is the normative indoor design temperature, C;

$T_{\text{ext}}(t)$ is the transient outdoor air temperature at calculation hour t, C;

η_{rec} is the sensible heat recovery effectiveness coefficient of the ventilation unit (dimensionless).

The dynamic interaction of this ventilation load with the primary generation plant serves as a critical boundary condition for the thermoeconomic optimization. The fluctuating nature of $T_{\text{ext}}(t)$ and the varying efficiency of the heat recovery unit direct the required residual peak load, fundamentally altering the source-switching logic of the hybrid system.

To evaluate the feasibility and efficiency of the proposed hybrid configurations, a COP-based thermoeconomic model was formulated. The primary objective of the optimization is the minimization of the specific heat generation cost, defined as the total financial expenditure required to produce one unit of useful thermal energy (e.g., 1 GJ or 1 kWh), explicitly accounting for variable energy tariffs, operational efficiencies, and capital cost recovery.

The objective function for the specific heat generation cost, C_{spec}, is structured to aggregate both operational and amortized capital expenditures over the entire heating season. The function is expressed as:

$$C_{\text{spec}} = \frac{\sum_{t=1}^{t_h}\left[c_{\text{gas}}\cdot\frac{Q_{\text{boiler}}(t)}{\eta_{\text{boiler}}(t)}+c_{\text{el}}\cdot\frac{Q_{\text{GSHP}}(t)}{COP(t)}\right]\cdot\Delta t+\sum_i\frac{Z_i}{\tau_i}}{Q_{\text{season}}} \rightarrow \min \quad , \tag{7}$$

where c_{gas} and c_{el} are the specific local tariffs for natural gas and electricity, respectively, USD$\cdot\, kWh^{-1}$;

$\eta_{\text{boiler}}(t)$ is the dynamic efficiency of the gas boiler (dimensionless);

$COP(t)$ is the real-time coefficient of performance of the ground-source heat pump (dimensionless);

Z_i is the total capital investment cost for subsystem i (e.g., boiler, heat pump, solar loop);

τ_i is the operational amortization period or expected lifespan for subsystem i, $years$;

t_h is the total duration of the heating season, h;

Δt is the simulation time step (typically 1 hour), h;

Q_{season} is the total useful thermal energy delivered over the season, which strictly includes the mechanical ventilation load, kWh.

The minimization of C_{spec} subject to constraints (8) – (10) was solved numerically as a constrained non-linear programming problem using the Sequential Least Squares Programming (SLSQP) solver implemented in the SciPy optimize module, applied independently at each simulation time step within the seasonal time series.

The primary optimization variables are the dynamic capacity fractions (load coverage ratios) assigned to each active thermal source at any given hour t. The control strategy is designed to minimize C_{spec} while satisfying the continuous building demand and adhering to the following technical constraints:

Supply Temperature Constraint:

The hybrid generation plant must consistently deliver the required flow temperature $T_{\text{supply}}(t)$ dictated by the building's hydronic heating curve, which adjusts according to the outdoor conditions:

$$T_{\text{supply}}(t) \geq T_{\text{target}}(T_{\text{ext}}). \tag{8}$$

Heat Pump Operational Limits:

The GSHP operates efficiently only when the entering water temperature (EWT) from the ground loop remains above a critical minimum threshold. This constraint prevents the progressive thermal depletion (freezing) of the ground mass and extreme COP degradation during peak extraction periods:

$$T_{\text{EWT}}(t) \geq T_{\text{min, EWT}}. \tag{9}$$

Source Capacity Limits

The instantaneous thermal output of the system must exactly equal the total dynamic load $Q_{\text{total}}(t)$ at all times, and the output of any individual heat generator i cannot exceed its nominal installed capacity $Q_{\text{nom},i}$:

$$0 \leq Q_i(t) \leq Q_{\text{nom},i}. \qquad (10)$$

By imposing these constraints, the model identifies the precise outdoor temperature threshold and tariff ratio at which switching from the heat pump to the peak gas boiler—or reducing the ventilation thermal load via heat recovery—becomes economically optimal.

Model Validation.

Having confirmed component-level consistency against the EN 15316 and EN 308 normative procedures described above, a second, system-level validation stage was carried out against independent literature benchmarks to verify the model's behaviour under realistic, non-steady-state operating conditions. To ensure the reliability and physical accuracy of the developed Python-based thermoeconomic model prior to optimization, a comprehensive validation procedure was executed. The numerical results generated by the proposed mathematical model were benchmarked against established normative datasets and validated reference simulations from recent literature.

For the primary heating plant parameters, the model was compared against validated reference cases simulated in the TRNSYS 18 environment under comparable climatic boundary conditions. The ground-source heat pump performance baseline was established using empirical data from hybrid PVT-GSHP integration studies. For the mechanical ventilation subsystem, the heat recovery effectiveness was verified against experimental performance data of HRV systems coupled with heat pumps in cold climates.

The mathematical criterion for validation is the relative deviation (δ) between the calculated values (X_{calc}) and the reference values (X_{ref}). For complex building energy simulations, the model is considered valid and applicable for engineering optimization if the relative deviation does not exceed the strictly defined threshold of 5 to 8 %:

$$\delta = \left|\frac{X_{\text{calc}} - X_{\text{ref}}}{X_{\text{ref}}}\right| \cdot 100\% \leq 8\%. \qquad (11)$$

The validation focused on three critical operational parameters that dictate the hybrid system's seasonal energy balance:

Seasonal Coefficient of Performance ($SCOP_{\text{GSHP}}$): Represents the long-term efficiency of the ground-source heat pump under dynamic entering water temperatures.

Solar Thermal Fraction (f_{solar}): Determines the percentage of the total thermal load covered by the solar collector array in Configuration 1 and Configuration 3.

Sensible Heat Recovery Effectiveness (η_{rec}): Characterizes the thermodynamic efficiency of the mechanical ventilation subsystem during the peak heating period.

The comparative analysis between the proposed mathematical model and the established reference benchmarks is presented in Table.

As demonstrated in Table, the maximum relative deviation observed is 5.88 % for the solar thermal fraction, which remains well within the predefined acceptable tolerance limit of 8 %. The deviations in the $SCOP_{\text{GSHP}}$ and η_{rec} parameters are approximately 2 %, indicating a high degree of convergence with both the dynamic simulation environments and experimental investigations reported in the literature.

These results confirm that the developed dynamic thermal balance equations, including the explicitly integrated transient ventilation load model, accurately capture the physical behavior and nonlinear interactions of the multi-source hybrid heating configurations. Consequently, the mathematical model is deemed robust and valid for conducting the subsequent thermoeconomic optimization under the specified regional conditions.

The distribution of the total seasonal thermal load among the active generation sources is illustrated in Fig. 1. The total load curve reflects the superposition of envelope transmission losses and the dynamic ventilation thermal load, which is explicitly integrated into the model.

Table

The comparative analysis between the proposed mathematical model

Evaluated Parameter	Proposed Model (X_{calc})	Reference Data (X_{ref})	Source of Reference	Relative Deviation (δ), %	Validation Status
Seasonal COP of GSHP (SCOPGSHP)	3.86	3.94	Bae et al. (2022) [1]	2.03	Valid (<5 %)
Solar Thermal Fraction (f_{solar}), %	22.4	23.8	Wang et al. (2023) [19]	5.88	Valid (<8 %)
Heat Recovery Effectiveness (η_{rec}), %	71.5	73.0	Li et al. (2018) [12]	2.05	Valid (<5 %)

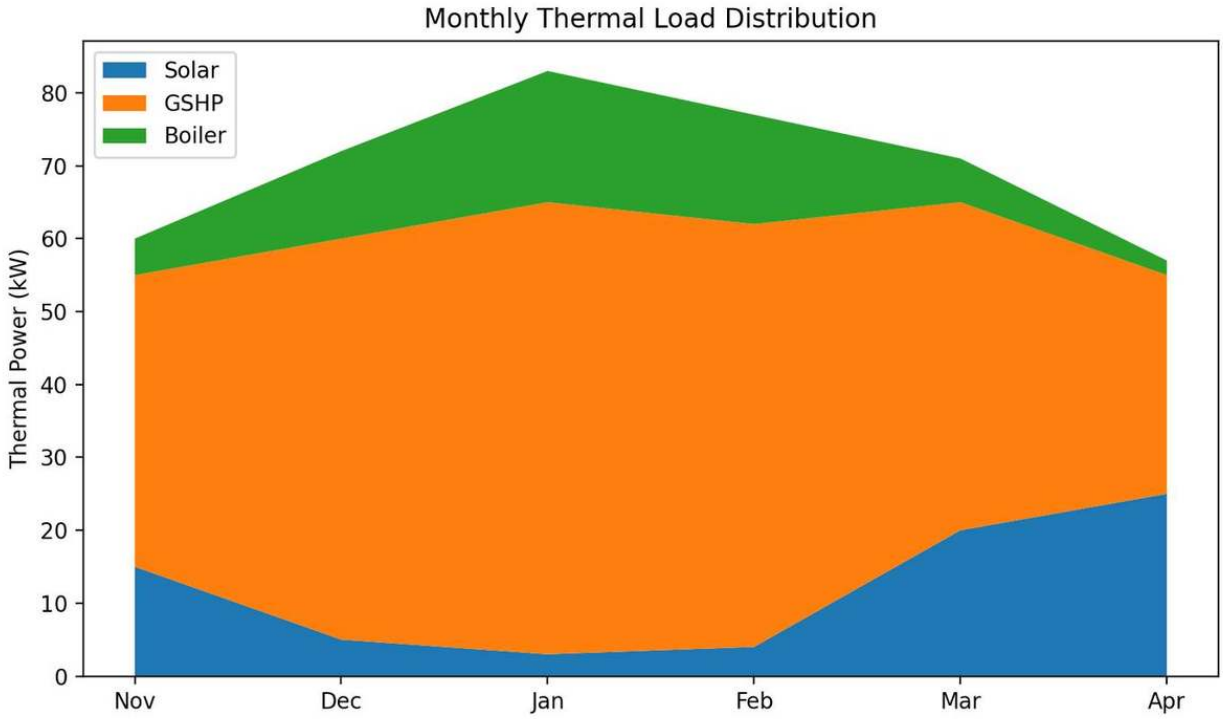


Fig. 1. Monthly thermal load distribution across the heating season for Configuration 3 (Boiler + GSHP + Solar Collector)

The analysis reveals three distinct operational regimes:

Shoulder Seasons (November and March–April): During these intervals, the solar

collector array provides a significant portion of the total energy demand. The surplus solar thermal yield during peak irradiance hours indicates potential for partial thermal regeneration of the ground heat exchanger, which may support a more stable Entering Water Temperature (EWT) for the GSHP over successive heating seasons.

Peak Winter Period (December–February): As outdoor temperatures drop to the design levels of approximately -23 °C, the GSHP maintains the base thermal load due to its high efficiency relative to direct fuel combustion. However, the seasonal degradation of the ground thermal balance necessitates periodic activation of the gas boiler, which functions as a peak-load unit to cover the residual deficit and ensure adherence to the supply temperature curve.

Ventilation-Driven Load Spikes: The contribution of the mechanical ventilation subsystem represents approximately 12–15 % of the total monthly load, with the heat recovery unit ($\eta_{rec} \approx 0.75$) effectively dampening the impact of transient temperature drops.

The following section describes Fig. 2, which provides a comparative analysis of the four investigated configurations based on the specific heat generation cost, C_{spec}, and their associated environmental impact.

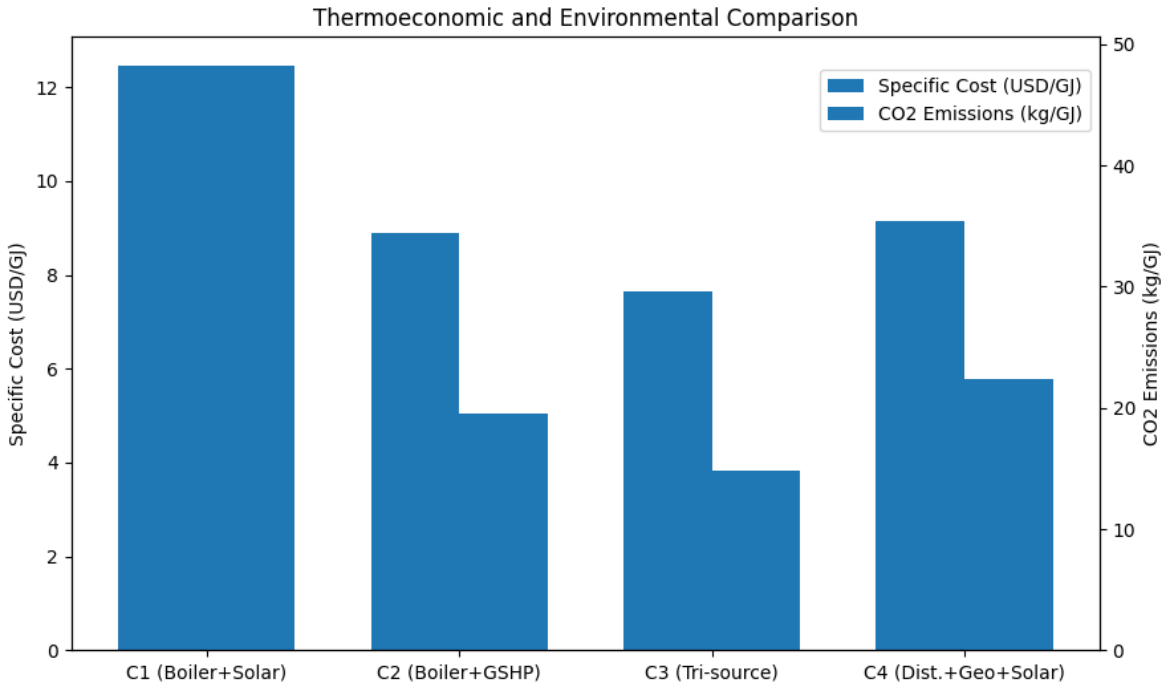


Fig. 2. Comparative Thermoeconomic and Environmental Performance

Fig. 2 illustrates the relative economic performance and carbon intensity of the four hybrid heating systems evaluated under the current climatic and economic boundary conditions of Kharkiv Oblast. The specific heat generation cost, C_{spec}, incorporates fuel, electricity, and proportional capital cost recovery, while the CO_2 emissions represent the total atmospheric impact per unit of delivered useful heat.

The analysis provides several critical insights into system selection:

Economic Optimum: Configuration 3 (Boiler + GSHP + Solar Collector) demonstrates the lowest specific heat generation cost of 7.65 USD/GJ. This is attributed to the optimal balance between high-efficiency renewable contribution and the strategic use of the boiler during extreme peak demands.

Capital vs. Operational Trade-off: While Configuration 2 (Boiler + GSHP) shows a competitive cost of 8.90 USD/GJ, the additional investment for the solar array in Configuration 3 is rapidly offset by the extended COP stabilization and fuel displacement.

District Integration Limits: Configuration 4 (District Boiler + Geo + Solar) results in a cost of 9.15 USD/GJ. Despite the integration of renewable sources, the reliance on the centralized grid introduces higher operational sensitivity to district heating price fluctuations compared to fully autonomous hybrid configurations.

Environmental Parity: The reduction in CO_2 emissions directly correlates with the renewable energy fraction. Configuration 3 achieves the lowest carbon footprint (14.8 kg/GJ), confirming that thermoeconomic optimization inherently favors systems with lower environmental impact in the Ukrainian energy market context.

These results validate that the selection of an optimal hybrid system cannot be reduced to simple equipment efficiency metrics alone. The complex interaction between installation cost recovery, seasonal storage dynamics, and occupant thermal comfort constrains the feasible design space, necessitating the integrated techno-economic evaluation presented herein.

Fig. 3 illustrates the dynamic interaction between the mechanical ventilation subsystem and the total building thermal demand throughout the 181-day heating season in Kharkiv Oblast. The analysis explicitly isolates the ventilation-related thermal load, which fluctuates based on the temperature-dependent fresh air intake requirement.

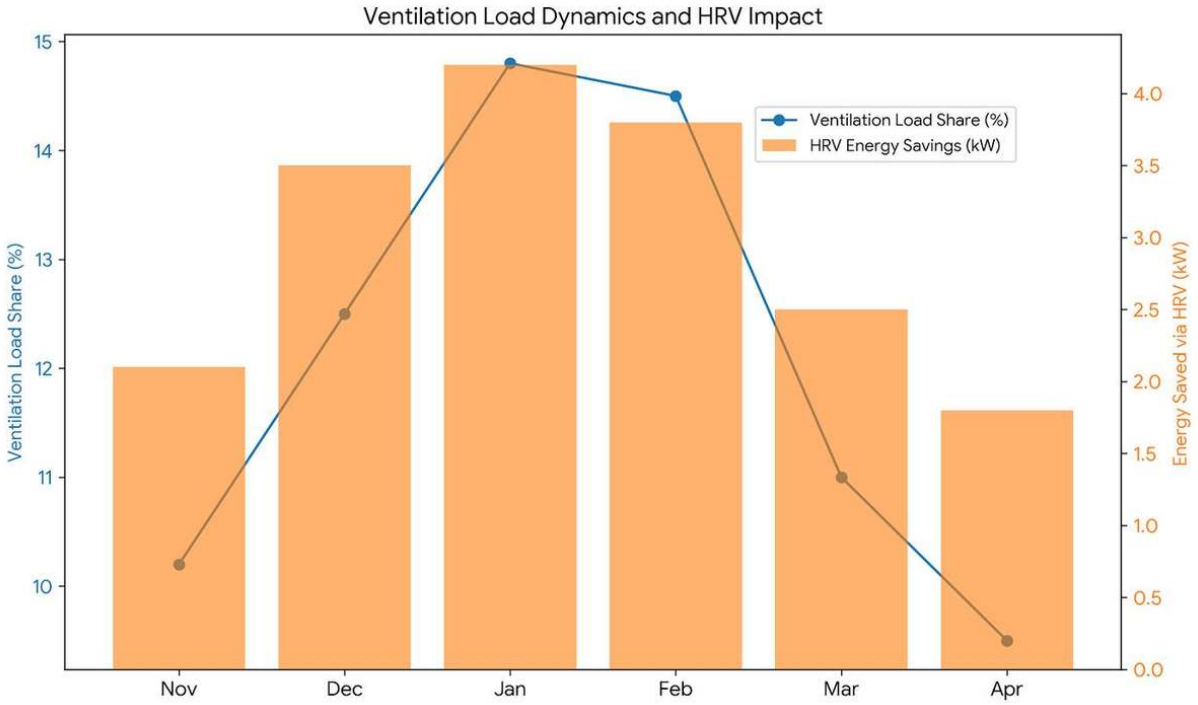


Fig. 3. Impact of ventilation thermal load and heat recovery effectiveness (η_{rec}) on total seasonal energy demand

Key insights derived from the ventilation subsystem modeling include:

Load Dynamics: The ventilation load accounts for a dynamic share of the total heat balance, peaking during the coldest months (January–February) when the temperature differential ($T_{int} - T_{ext}$) is maximal.

Effectiveness of Recovery: The application of mechanical heat recovery with a nominal effectiveness of ($\eta_{rec} \approx 0.75$) significantly reduces the primary energy demand. The energy savings curve demonstrates that heat recovery is most impactful during the transition periods (November and March–April), where it offsets a substantial portion of the sensible heat required to condition fresh air.

Profitability Threshold: The model identifies a critical profitability threshold for heat recovery integration. In the climatic conditions of Eastern Ukraine, the thermodynamic savings derived from $\eta_{rec} > 0.70$ consistently outweigh the auxiliary electrical power consumption of the ventilation fans when the outdoor temperature remains below circ +2 ℃.

This threshold governs the ventilation heat recovery subsystem specifically and is distinct from the much lower outdoor temperature threshold (−15 ℃) at which the peak-load gas boiler is activated within the primary generation plant, as the two thresholds correspond to different subsystems with independent economic and operational logic.

This visualization confirms that integrating mechanical ventilation heat recovery is not merely a design choice for air quality but a prerequisite for reducing the peak load obligations of the primary heating plant. By dampening the impact of transient climatic fluctuations, the heat recovery system stabilizes the boiler's operational regime and enhances the overall systemic COP.

Conclusions

The present study has successfully established a comprehensive thermoeconomic model for hybrid heat supply systems, explicitly integrating dynamic mechanical ventilation heat recovery under the climatic and tariff conditions of Kharkiv Oblast. The findings provide clear quantitative guidance for engineering design and operational management.

Optimal Configuration and Source Ratios

The numerical optimization identifies Configuration 3 (Gas Boiler + GSHP + Solar Collector) as the global optimum for residential and small industrial applications in the eastern Ukrainian climate. This tri-source system achieves the lowest specific heat generation cost of 7.65 USD/GJ and an environmental footprint of 14.8 kg/GJ of delivered heat. The optimal operational load coverage is distributed as follows:

GSHP (Ground-Source Heat Pump): 73.0 % of the total annual load, serving as the primary base-load source.

Solar Thermal Array: 18.5 % of the annual load, with primary contribution during shoulder seasons and potential to support ground loop regeneration.

Gas Boiler (Peak Unit): 8.5 % of the total load, utilized exclusively for extreme peak demands when outdoor temperatures drop below $-15\ ^{\circ}C$ and COP degradation occurs.

Profitability Threshold for Ventilation Heat Recovery.

The analysis confirms that the integration of mechanical ventilation heat recovery with a nominal effectiveness of $\eta_{\mathrm{rec}} \geq 0.70$ is a critical technical requirement rather than an optional enhancement. The thermodynamic savings derived from this system reach a profitability threshold—where recovered energy costs offset the auxiliary fan power consumption—when the outdoor temperature remains below $+2\ ^{\circ}C$. Given the duration of the heating season in Kharkiv (approx. 181 days), this threshold is met for over 90% of the operational time, confirming the high investment priority for HRV systems.

Practical Design Recommendations.

Based on the optimization results, the following parameters are recommended for practitioners designing hybrid systems in the continental climate of Eastern Ukraine:

Supply Temperature Regime: To maximize the GSHP operational efficiency, the heating system should be designed for low-temperature operation within the $35\ ^{\circ}C$ to $55\ ^{\circ}C$ range. This temperature lift maintains the heat pump COP within the optimal range and minimizes reliance on the boiler.

Renewable Energy Share: Designing for an aggregate renewable energy coverage (GSHP + Solar) of at least 85–90 % of the total annual demand is recommended to ensure both economic viability and resilience against potential fossil fuel price volatility.

System Integration: The solar collector array should be sized not only for immediate DHW (Domestic Hot Water) needs but also with consideration for its potential contribution to ground thermal recharge. A collector area-to-borehole length ratio providing 15–20 % of the seasonal ground thermal demand is proposed as the standard for ensuring long-term ground thermal balance.

In summary, the transition to optimized tri-source hybrid systems with integrated heat recovery provides a robust pathway to reducing primary energy consumption while maintaining reliable microclimate quality. This study offers a transferable methodology that allows designers to adapt system sizing to specific building typologies and emerging tariff trajectories in the Ukrainian construction market.

Reference

1. Bae, S., Nam, Y., Lee, E., & Entchev, E. (2022). Feasibility study of a novel hybrid energy system combining photovoltaic-thermal and modular ground heat exchanger. *Journal of Building Engineering, 61, 105241. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105241*

2. Burda, Y. (2026). Reduced-order modeling of microclimate formation in displacement ventilation systems. *Ventilation Illumination and Heat Gas Supply, 57, 23–39. https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.23-39* [in English].

3. Burda, Y., Redko, I., Pivnenko, Y., Shepitchak, V., & Tkachenko, R. (2026). Thermodynamic modeling of microclimate formation in cleanrooms with displacement ventilation. *Scientific Bulletin of Civil Engineering, 1(114), 148–154. https://doi.org/10.33042/2311-7257.2026.114.1.16* [in English].

4. Chen, Y., Wang, J., & Lund, P. D. (2020). Thermodynamic performance analysis and multi-criteria optimization of a hybrid combined heat and power system coupled with geothermal energy. *Energy Conversion and Management, 210, 112741. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112741*

5. De Araujo Passos, L. A., Van Den Engel, P., Baldi, S., & De Schutter, B. (2022). Dynamic optimization for minimal HVAC demand with latent heat storage, heat recovery, natural ventilation, and solar shadings. *Energy Conversion and Management, 276, 116573. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116573*

6. Deng, S., Zhang, H., Li, G., Qu, T., Shao, H., & Zhao, Q. (2024). Experimental study and optimization analysis of vapor compression heat pump coupled with gas boiler. *Energy, 314, 134189. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134189*

7. Han, G., Yang, Q., Yang, F., Xie, W., Jin, H., Yi, F., Meng, S., & Peng, Z. (2022). Design and efficiency assessment of hybrid thermal protection structures for return capsule reentry. *Case Studies in Thermal Engineering, 41, 102656. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102656*

8. Hunt, D., Mac Suibhne, N., Dimache, L., McHugh, D., & Lohan, J. (2020). Advances in multifunctional balanced ventilation technology for dwellings and arising challenge to quantify energy efficiency and renewable generation contributions using international test standards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 110327. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110327*

9. Jahanbin, A., & Semprini, G. (2022). Integrated effects of the heat recovery ventilation and heat source on decay rate of indoor airborne particles: A comparative study. *Journal of Building Engineering, 50, 104156. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104156*

10. Khadra, A., Hugosson, M., Akander, J., & Myhren, J. A. (2020). Economic performance assessment of three renovated multi-family buildings with different HVAC systems. *Energy and Buildings, 224, 110275. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110275*

11. Leng, X., Sun, X., Xu, J., & Huang, W. (2021). Optimal planning of a hybrid system integrating of combined cooling, heat and power and energy storage resources. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 50, 101806. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101806*

12. Li B., Wild P., & Rowe A. (2018). Performance of a heat recovery ventilator coupled with an air-to-air heat pump for residential suites in Canadian cities. *Journal of Building Engineering, 21, 343–354. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.025*

13. Liu, S., Ma, G., Lv, Y., & Xu, S. (2023). Review on heat pump energy recovery technologies and their integrated systems for building ventilation. *Building and Environment, 248, 111067. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111067*

14. Lygouras, E., Papatsounis, A. G., Botsaris, P. N., & Pechtelidis, A. (2023). Optimization & techno-economic analysis of a hybrid system with thermal energy storage within a LEC. *Renewable Energy, 215, 118920. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118920*

15. Mehregan, M., Abbasi, M., & Hashemian, S. M. (2021). Technical, economic and environmental analyses of combined heat and power (CHP) system with hybrid prime mover and optimization using genetic algorithm. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 49, 101697. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101697*

16. Nicoletti, F., Ramundo, G., & Arcuri, N. (2024). Optimal operating strategy of hybrid heat pump − boiler systems with photovoltaics and battery storage. *Energy Conversion and Management, 323, 119233. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119233*

17. Pryimak, O., Burda, Y., Redko, I., Pivnenko, Y., & Gvozdetskii, O. (2025). Integrated Approach to Energy Certification and Quality Control of Microclimate Formation in Modern Construction. Academic *Energy Engineering and Control Systems, 11(2), 79 – 84. https://doi.org/10.23939/jeecs2025.02.079*. [in English].

18. Shuailing, L., Guoyuan, M., Xiaoya, J., Shuxue, X., & Guoqiang, W. (2022). Performance of a mechanically-driven loop heat pipe heat recovery system. *Applied Thermal Engineering, 207, 118066. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118066*

19. Wang, G., Feng, G., Li, X., Li, H., & Wang, T. (2023). Design optimization integrating energy, economic, and environmental evaluation of a hybrid solar heating system for detached buildings in rural China. *Journal of Building Engineering, 73, 106692. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106692*

20. Wang, Y., Quan, Z., Jing, H., Wang, L., & Zhao, Y. (2021). Performance and operation strategy optimization of a new dual-source building energy supply system with heat pumps and energy storage. *Energy Conversion and Management, 239, 114204. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114204*

21. Zhou, Y., Wang, J., Dong, F., Qin, Y., Ma, Z., Ma, Y., & Li, J. (2021). Novel flexibility evaluation of hybrid combined cooling, heating and power system with an improved operation strategy. *Applied Energy, 300, 117358. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117358*

Список використаних джерел

1. Bae, S., Nam, Y., Lee, E., & Entchev, E. (2022). Feasibility study of a novel hybrid energy system combining photovoltaic-thermal and modular ground heat exchanger. *Journal of Building Engineering, 61, 105241. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105241*

2. Burda, Y. (2026). Reduced-order modeling of microclimate formation in displacement ventilation systems. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 57, 23–39. https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.23-39*

3. Burda, Y., Redko, I., Pivnenko, Y., Shepitchak, V., & Tkachenko, R. (2026). Thermodynamic modeling of microclimate formation in cleanrooms with displacement ventilation. *Науковий вісник будівництва, 1(114), 148–154. https://doi.org/10.33042/2311-7257.2026.114.1.16*

4. Chen, Y., Wang, J., & Lund, P. D. (2020). Thermodynamic performance analysis and multi-criteria optimization of a hybrid combined heat and power system coupled with geothermal energy. *Energy Conversion and Management, 210, 112741. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112741*

5. De Araujo Passos, L. A., Van Den Engel, P., Baldi, S., & De Schutter, B. (2022). Dynamic optimization for minimal HVAC demand with latent heat storage, heat recovery, natural ventilation, and solar shadings. *Energy Conversion and Management, 276, 116573. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116573*

6. Deng, S., Zhang, H., Li, G., Qu, T., Shao, H., & Zhao, Q. (2024). Experimental study and optimization analysis of vapor compression heat pump coupled with gas boiler. *Energy, 314, 134189. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134189*

7. Han, G., Yang, Q., Yang, F., Xie, W., Jin, H., Yi, F., Meng, S., & Peng, Z. (2022). Design and efficiency assessment of hybrid thermal protection structures for return capsule reentry. *Case Studies in Thermal Engineering, 41, 102656. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102656*

8. Hunt, D., Mac Suibhne, N., Dimache, L., McHugh, D., & Lohan, J. (2020). Advances in multifunctional balanced ventilation technology for dwellings and arising challenge to quantify energy efficiency and renewable generation contributions using international test standards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 110327. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110327*

9. Jahanbin, A., & Semprini, G. (2022). Integrated effects of the heat recovery ventilation and heat source on decay rate of indoor airborne particles: A comparative study. *Journal of Building Engineering, 50, 104156. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104156*

10. Khadra, A., Hugosson, M., Akander, J., & Myhren, J. A. (2020). Economic performance assessment of three renovated multi-family buildings with different HVAC systems. *Energy and Buildings, 224, 110275. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110275*

11. Leng, X., Sun, X., Xu, J., & Huang, W. (2021). Optimal planning of a hybrid system integrating of combined cooling, heat and power and energy storage resources. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 50, 101806. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101806*

12. Li B., Wild P., & Rowe A. (2018). Performance of a heat recovery ventilator coupled with an air-to-air heat pump for residential suites in Canadian cities. *Journal of Building Engineering, 21, 343–354. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.025*

13. Liu, S., Ma, G., Lv, Y., & Xu, S. (2023). Review on heat pump energy recovery technologies and their integrated systems for building ventilation. *Building and Environment, 248, 111067. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111067*

14. Lygouras, E., Papatsounis, A. G., Botsaris, P. N., & Pechtelidis, A. (2023). Optimization & techno-economic analysis of a hybrid system with thermal energy storage within a LEC. *Renewable Energy, 215, 118920. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118920*

15. Mehregan, M., Abbasi, M., & Hashemian, S. M. (2021). Technical, economic and environmental analyses of combined heat and power (CHP) system with hybrid prime mover and optimization using genetic algorithm. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 49, 101697. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101697*

16. Nicoletti, F., Ramundo, G., & Arcuri, N. (2024). Optimal operating strategy of hybrid heat pump − boiler systems with photovoltaics and battery storage. *Energy Conversion and Management, 323, 119233. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119233*

17. Pryimak, O., Burda, Y., Redko, I., Pivnenko, Y., & Gvozdetskii, O. (2025). Integrated Approach to Energy Certification and Quality Control of Microclimate Formation in Modern Construction. *Energy Engineering and Control Systems*, *11*(2), 79 – 84. *https://doi.org/10.23939/jeecs2025.02.079*

18. Shuailing, L., Guoyuan, M., Xiaoya, J., Shuxue, X., & Guoqiang, W. (2022). Performance of a mechanically-driven loop heat pipe heat recovery system. *Applied Thermal Engineering, 207, 118066. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118066*

19. Wang, G., Feng, G., Li, X., Li, H., & Wang, T. (2023). Design optimization integrating energy, economic, and environmental evaluation of a hybrid solar heating system for detached buildings in rural China. *Journal of Building Engineering, 73, 106692. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106692*

20. Wang, Y., Quan, Z., Jing, H., Wang, L., & Zhao, Y. (2021). Performance and operation strategy optimization of a new dual-source building energy supply system with heat pumps and energy storage. *Energy Conversion and Management, 239, 114204. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114204*

21. Zhou, Y., Wang, J., Dong, F., Qin, Y., Ma, Z., Ma, Y., & Li, J. (2021). Novel flexibility evaluation of hybrid combined cooling, heating and power system with an improved operation strategy. *Applied Energy, 300, 117358. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117358*

Рукавішников Павло Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри ТТДЕМ, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: rukavishnykov@gmail.com.
ORCID ID 0000-0002-9670-3071.
Бугай Володимир Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: v.bugai@kname.edu.ua. ORCID ID 0000-0001-5166-7110.
Чайка Юрій Іванович, кандидат технічних наук, завідувач кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: yurii.chaika@kname.edu.ua. ORCID ID 0000-0003-1021-4662.
Бурда Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: science.yurii.burda@gmail.com. ORCID ID 0000-0003-3470-1334.
Марченко Сергій Олегович, аспірант кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail Serhii.Marchenko@kname.edu.ua.
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-3017-3293.

Pavlo Rukavishnykov, Associate Professor, Department of Heat Engineering, Thermal Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: rukavishnykov@gmail.com.
ORCID ID: 0000-0002-9670-3071.
Volodymyr Bugai, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: v.bugai@kname.edu.ua.
ORCID ID: 0000-0001-5166-7110.
Yurii Chaika, Ph.D. (Tech.), Head of the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: yurii.chaika@kname.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-1021-4662.
Yurii Burda, Ph.D., Associate Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: science.yurii.burda@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3470-1334.
Serhii Marchenko, Postgraduate Student (Ph.D. Candidate) Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: Serhii.Marchenko@kname.edu.ua.
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-3017-3293.

Дата надходження статті 03.07.2026 р. Дата прийняття статті до друку 04.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 614.8:72

ОСОБЛИВОСТІ НОРМАТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ПРОБЛЕМАТИКА СТВОРЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ УКРИТТЯ НАСЕЛЕННЯ В УКРАЇНІ

Доктор філософії (PhD) у галузі Цивільна безпека Ю. Ю. Підгорецький, Г. В. Трунцев

REGULATORY FRAMEWORK AND PROBLEMS OF DEVELOPING FACILITIES FOR POPULATION SHELTER IN UKRAINE

PhD in Civil Security Yuriy Pidhoretskyi, Heorhiy Truntsev

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371481

Анотація. *У статті проаналізовано нещодавні зміни в законодавстві, що діє у сфері цивільного захисту і містобудівної діяльності, які мають позитивно вплинути на процес створення фонду захисних споруд цивільного захисту, а також інших об'єктів, призначених для захисту населення від небезпечних чинників дії звичайних засобів ураження, насамперед захищених просторів. Висвітлено сильні та слабкі сторони цих змін, можливі проблеми щодо їх реалізації. Наведено короткі відомості про загальний стан фонду захисних споруд цивільного захисту на початок відкритої агресії РФ проти України (2022) і на сьогодні (2026). Проаналізовано останні актуальні дослідження і публікації з питань створення захищених просторів. Надано обґрунтовані пропозиції щодо можливих шляхів усунення правових колізій, пов'язаних із вищезазначеними змінами в законодавстві. З урахуванням зарубіжного та наявного вітчизняного досвіду сформовано загальні вимоги щодо захисних властивостей та особливостей проєктування захищених просторів.*

Ключові слова: *захисні споруди цивільного захисту, захищені простори, звичайні засоби ураження, небезпечні чинники, об'єкти фонду захисних споруд цивільного захисту, споруди подвійного призначення, укриття населення, цивільний захист, інженерно-технічні заходи цивільного захисту.*

Abstract. *Today, during the full-scale war between Russia and Ukraine, the issue of organizing shelter for the population in the objects of the protective structures of civil protection fund has become extremely relevant. Despite this, in the 5th year of this war, the population is still not sufficiently provided with the corresponding objects. Taking into account the above, the state is taking measures to correct the situation: legislation is being improved, construction and other technical standards are being optimized, new types of objects are appearing, designed to shelter the population from the effects of dangerous factors of the use of conventional weapons.*

The recent amendments to the Civil Protective Code of Ukraine and the Law of Ukraine «On Regulation of Urban Planning Activities» have established new legal norms that should significantly improve the state of protection of the population from dangerous factors of the use of conventional weapons, will affect the procedure for planning and development of territories, as well as the creation of individual construction objects, primarily public and residential buildings, and premises in their composition.

The article analyzes the above-mentioned changes to the legislation in force in the field of civil protection and urban planning, which should positively affect the process of creating a

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Підгорецький Ю. Ю., Трунцев Г. В., 2026.

fund of protective structures of civil protection, as well as other facilities designed to protect the population from dangerous factors of conventional weapons, primarily protected spaces. The strengths and weaknesses of these changes are highlighted, as well as possible problems with their implementation. Brief information is provided on the general state of the fund of protective structures of civil protection at the beginning of Russia's open aggression against Ukraine (2022) and today (2026). An analysis of the latest relevant research and publications on the creation of protected spaces was conducted. Reasoned proposals were provided on possible ways to eliminate legal conflicts associated with the above-mentioned changes in legislation. Taking into account foreign and existing domestic experience, general requirements for protective properties and design features of protected spaces were formed.

Keywords: *protective structures of civil protection, protected spaces, conventional weapons, dangerous factors, objects of the protective structures of civil protection fund, dual-purpose structures, population shelter, civil protection, civil protection engineering and technical measures.*

Вступ. В умовах повномасштабної збройної агресії Російської Федерації проти України забезпечення захисту цивільного населення від небезпечних чинників воєнних (бойових) дій набуло особливого значення. Одним із важливих напрямів цивільного захисту є забезпечення населення можливістю своєчасно укритися в об'єктах, призначених для зменшення впливу небезпечних чинників застосування засобів ураження. Проблема забезпечення населення відповідними об'єктами зумовлена не лише недостатньою кількістю і станом наявного фонду захисних споруд цивільного захисту, а і необхідністю формування нових підходів щодо проєктування та будівництва об'єктів, призначених для захисту населення.

Держава вживає заходів із виправлення становища: удосконалюють законодавство, оптимізують будівельні та інші технічні норми, запроваджують нові види об'єктів, призначені для укриття населення від дії небезпечних чинників застосування звичайних засобів ураження.

Водночас важливим є забезпечення системного та комплексного підходу для усунення ризиків виникнення розбіжностей між трактуванням положень різних нормативно-правових актів і нормативних документів, що може ускладнити реалізацію запроваджених змін і перешкодити досягненню бажаного результату і поставленої мети.

Постановка проблеми. Нещодавніми внесеними Законом України від 10 лютого 2026 року № 4778-IX «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо запобігання надзвичайним ситуаціям та ліквідації їх наслідків, формування фонду захисних споруд цивільного захисту, створення класів та центрів безпеки» (далі Закон № 4778-IX) [9] змінами до Кодексу цивільного захисту України [5] і Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» [10] встановлено нові правові норми, що мають суттєво покращити стан захисту населення від небезпечних чинників застосування звичайних засобів ураження, вплинути на порядок планування та забудови територій, а також створення окремих об'єктів будівництва, насамперед громадських і житлових будівель і/або приміщень у їхньому складі.

Відповідні положення, передбачені вказаним Законом, набрали чинності з 8 вересня 2026 року, що зумовлює необхідність їх попереднього наукового та нормативного аналізу. Отже, актуальним є дослідження взаємозв'язку нових положень законодавства з чинними нормами у сфері цивільного захисту і містобудівної діяльності, визначення потенційних правових колізій, а також обґрунтування основних підходів для подальшого нормативного врегулювання вимог щодо об'єктів, призначених для укриття населення.

Згідно з пояснювальною запискою до відповідного законопроєкту, основні положення Закону № 4778-IX [9], зокрема, передбачали:

- встановлення обов'язковості передбачення захисних споруд цивільного захисту або споруд подвійного призначення у проєктній документації на будівництво об'єктів із середніми (СС2) і значними (СС3) наслідками;

- впровадження нового інструменту містобудівної документації – «схеми захисних споруд» – для оперативного планування мережі укриттів.

При цьому наголошували, що в разі ухвалення законопроєкту прогнозують такі соціально-економічні та інші наслідки:

- посилення захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій, забезпечення охорони життя і здоров'я людей, насамперед в особливий період;

- створення правових умов для розбудови сучасної інфраструктури безпеки на рівні громад;

- забезпечення поступового збільшення фонду захисних споруд цивільного захисту, зокрема для нового будівництва.

У затвердженій редакції Закон № 4778-IX [9] передбачає такі основні нововведення за напрямом організації укриття населення:

1. Створення захисних споруд цивільного захисту публічного доступу, які розміщені на загальнодоступній території та доступ до яких забезпечено для всіх категорій населення.

Із цією метою внесено зміни до пункту 25 частини другої статті 19 Кодексу цивільного захисту України [5], якими передбачено віднесення до повноважень органів місцевого самоврядування питань, пов'язаних зі створенням вищезазначеної категорії захисних споруд цивільного захисту.

Відповідні зміни запроваджено і в Законі України «Про регулювання містобудівної діяльності» [10], а саме оновлено частину четвертої статті 16, що передбачає планування розміщення захисних споруд цивільного захисту публічного доступу під час створення містобудівної документації на місцевому рівні.

Також вищезазначений Закон [10] доповнено новою статтею 17^{-1}, яка фактично встановлює новий вид містобудівної документації на місцевому рівні – схему захисних споруд «для забезпечення територіальної громади та/або жителів населеного пункту захисними спорудами цивільного захисту (сховищами та протирадіаційними укриттями) і спорудами подвійного призначення до затвердження комплексного плану або генерального плану населеного пункту. Схема захисних споруд може розроблятися як окремий документ на підставі існуючої містобудівної документації та з урахуванням існуючої містобудівної ситуації».

2. Передбачення в обов'язковому порядку будівництва захисних споруд цивільного захисту і/або споруд подвійного призначення під час нового будівництва або реконструкції об'єктів різного призначення за чітко визначеним переліком таких об'єктів. Відповідні зміни внесено до частини десятої статті 31 Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» [10].

3. Визначення нового виду об'єктів, призначених для укриття населення від небезпечних чинників застосування звичайних озброєнь, – захищених просторів, що разом із тим не є об'єктами фонду захисних споруд цивільного захисту.

Із цією метою частину першу статті 1 Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» доповнено новим терміном: «захищений простір – приміщення (частина будівлі чи споруди), конструкції якого запроєктовані таким чином, щоб забезпечити зменшення впливу побічної (непрямої) дії звичайних засобів ураження, що може виникнути під час ведення воєнних (бойових) дій і/або вчинення терористичних актів, на осіб, які перебувають у захищеному просторі».

Основні вимоги щодо створення таких просторів надано в частині десятій статті 31 Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності», що викладено в новій редакції.

Слід зазначити, що під час реалізації цих змін вимоги різних актів законодавства, що діють у сфері цивільного захисту і містобудівної діяльності, потребуватимуть подальшого взаємного узгодження. Також зазначені зміни передбачають розроблення відповідних технічних норм, зокрема будівельних, внесення змін до існуючих.

Отже, актуальним завданням є аналіз ефективності вищезазначених змін у законодавстві, дослідження способів їх реалізації, визначення можливості або необхідності подальшого унормування відповідних положень, встановлення основних положень будівельних та інших технічних норм, що мають бути розроблені на виконання цих змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика забезпечення населення захисними спорудами цивільного захисту і визначення їхніх захисних властивостей досліджували українські науковці у своїх роботах як наукового, так і аналітично-публіцистичного характеру. Крім аналізу класичних захисних споруд цивільного захисту та інших об’єктів фонду захисних споруд цивільного захисту, науковці досліджували і альтернативні варіанти для укриття людей і захисту їхнього життя і здоров’я. Зокрема, предметом наукових досліджень були так звані захищені простори, захищені приміщення, які широко використовують в інших країнах, що перебувають у стані воєнних дій. Науковці та фахівці у сфері цивільного захисту ретельно вивчали досвід Ізраїлю та можливості його застосування в Україні з урахуванням поточної ситуації та специфіки війни.

В одному з досліджень, проведеному у 2023 році, узагальнено важливу інформацію [8]:

- про статистичні дані стосовно наявних захисних споруд цивільного захисту в Україні, ступеня забезпеченості цивільного населення такими спорудами (станом на початок повномасштабної війни);
- аналіз пошкоджень будинків і споруд під час бойових дій;
- залежність середніх значень соціальних втрат від кількості прямих влучань снарядів у будівлі та споруди і залежність середніх значень соціальних втрат від кількості незначних пошкоджень у будівлях і спорудах;
- аналіз зарубіжного досвіду, насамперед Ізраїлю, щодо проєктування захисних споруд цивільного захисту.

Відповідно до результатів аналізу статистичних даних, опрацьованих у роботі [8], на момент початку повномасштабної агресії РФ проти України загальна нормативна потреба захисних споруд цивільного захисту в Україні складала 59 931 одиниць загальною місткістю 7,1 млн осіб. Водночас в Україні було обліковано 21 120 захисних споруд, із яких тільки 11 % було визнано такими, що повністю готові для використання за призначенням.

Середня кількість захисних споруд цивільного захисту в межах міської складала 1,1 споруду на 1 тисячу осіб, середній відсоток спеціально облаштованих захисних споруд цивільного захисту – 0,55 %, підземних споруд подвійного призначення (метрополітенів, паркінгів) – 0,49 %, найпростіших укриттів – 55,7 %.

Під час аналізу пошкоджень будівель і споруд різного призначення від застосування звичайних засобів ураження було встановлено, що у 2022 році частка прямих влучань становила 16,949 % (похибка складає 4,692 %). Разом із тим частка будівель із несуттєвими пошкодженнями становила 45,763 % (похибка складає 11,983 %), а частка будівель із суттєвими пошкодженнями – 22,599 % (похибка – 7,115 %) [8]. Отже, найбільша частка прямих влучань призводила до незначних пошкоджень будівель і споруд.

Середні показники щодо типів соціальних втрат (частка жертв) залежно від ступеня пошкодження будівель становили:

- у будівлях із пошкодженнями огородження та фасадних систем – 36,9 %;
- будівлях із незначними пошкодженнями – 49,2 %;
- будівлях із суттєвими ураженнями – 9,5 %;
- будівлях із повним обваленням – 4,4 %.

Отже, зазначені аналітичні дані показують, що найбільших соціальних втрат спостерігають у разі незначних пошкоджень будівель (до 86 %).

Проведений авторами у спільному дослідженні [8] аналіз, у тому числі зарубіжного досвіду, щодо проєктування захисних споруд цивільного захисту та інших споруд, призначених для укриття населення від небезпечних чинників застосування звичайних засобів ураження, показав, що, окрім надлишкового тиску повітряної ударної хвилі та коефіцієнта захисту (зниження іонізуючого випромінювання), під час визначення конструктивних параметрів таких споруд значну увагу потрібно приділяти можливості прямого влучання засобу ураження або його осколків у будівельні конструкції.

У своїй роботі вищевказані автори констатують факт широкого застосування в Ізраїлі в житловому секторі кімнат безпеки, відомих як захищений / укріплений простір. Основним завданням цих кімнат безпеки є забезпечення швидкого переміщення цивільного населення в захищені місця в будь-який час доби. За нормативними документами Ізраїлю, кожна нова будівля повинна мати безпечну кімнату (мамад), побудовану із залізобетону з важким герметичним вікном і сталевими дверима, схожими на склепіння, які можуть захистити тих, хто перебуває всередині, від вибуху ракет і уламків або хімічної атаки.

Також важливу інформацію про створення захищених просторів у житлових і громадських будівлях Ізраїлю (мамаків і мамадів) містить робота Анастасії Сердечної та Анастасії Думич [11].

Зокрема, відповідними технічними нормами Ізраїлю встановлено вимоги щодо товщини стін (мінімальна товщина внутрішніх стін становить 150 мм, зовнішніх — 250 мм), схеми їх армування, а також співвідношення з іншими конструкціями та обпирання на фундаменти. Безперервність і достатня товщина стін по периметру є обов’язковою умовою надійності та стійкості захисного простору.

Для проєктування захисних кімнат у Державі Ізраїль використовують залізобетон підвищеної міцності відповідно до стандартів. Основною вимогою є забезпечення високої міцності, щільності, тріщиностійкості конструкцій, здатних протидіяти вибуховій хвилі та ударним навантаженням. Мінімальний клас бетону для захисних кімнат (мамадів) встановлено на рівні С30/37, що відповідає класу С 25/30 згідно з українськими нормами. Для громадських або міжповерхових укриттів допускають застосування бетону С35/45 (С30/35).

В Україні зазначені вимоги ізраїльських стандартів було враховано під час розроблення проєктів ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» [3] і ДСТУ 9329:2025 «Первинні (мобільні) укриття. Основні параметри та методи випробування» [4], насамперед для встановлення вимог щодо захисту зазначених споруд від пробиття уламками і вторинного сколювання внутрішнього шару бетону.

Доступно інформацію про особливості таких споруд, призначених для захисту населення від дії звичайних засобів ураження (мамаків і мамадів), викладено в інформаційній статті Юлії Бабич [1].

Зокрема, авторка інформує: щоб уберегти цивільних, у 1993 році влада Ізраїлю зобов'язала забудовників проєктувати укріплені кімнати в усіх

житлових і громадських будівлях – мамади і мамаки. Переміститися в них можна за кілька секунд. Мамак – укріплена кімната в громадських будівлях, яка передбачена на кожному поверсі. Мамад – укріплена кімната у квартирі. Коли немає обстрілів, мамад перетворюється на звичайне приміщення – домашній офіс, спальню чи дитячу кімнату. Планують і будують укріплені приміщення одне над одним. Це допомагає зекономити на будівництві та дає змогу краще укріпити стіни та фасад будинку. Проте захищають такі приміщення не від усього. Наприклад, у разі прямого влучення ракети в будинок домашні укриття (як і населення, яке тут переховується) можуть постраждати. Утім, мамади і мамаки ефективні для захисту від ударної хвилі та уламків ракет.

Отже, створення захищених просторів у складі житлових і громадських будівель в Україні є актуальним питанням, що спирається на багаторічний досвід із цього питання інших країн, насамперед Ізраїлю.

За результатами аналізу останніх публікацій і робіт науковців потрібно зробити висновок, що наявні дослідження та нормативні документи створюють основу для подальшого аналізу захисних властивостей відповідних об’єктів. Водночас недостатньо дослідженими залишаються питання узгодження правового статусу захищених просторів із системою об’єктів фонду захисних споруд цивільного захисту, визначення сфери їх застосування, а також встановлення вимог щодо їх проєктування з урахуванням особливостей сучасних загроз.

Мета та методи досліджень. Метою дослідження є визначення основних проблем, які можуть виникнути під час реалізації нових положень законодавства у сфері створення об’єктів для укриття населення, а також обґрунтування напрямів їх нормативного врегулювання з урахуванням чинних вимог законодавства у сфері цивільного захисту, містобудування та будівництва.

Для досягнення поставленої мети автори визначили такі завдання:

1) проаналізувати основні зміни законодавства у сфері цивільного захисту і містобудівної діяльності, пов’язані зі створенням об’єктів для укриття населення;

2) визначити потенційні правові колізії між положеннями Кодексу цивільного захисту України та Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності», зумовлені відповідними змінами;

3) проаналізувати нормативний статус захищених просторів і визначити їхнє місце в системі об’єктів, призначених для захисту населення;

4) визначити основні функціональні та конструктивні вимоги, які доцільно враховувати під час подальшого нормативного врегулювання проєктування захищених просторів;

5) сформувати пропозиції з удосконалення нормативного регулювання створення та розміщення об’єктів для укриття населення.

Для досягнення поставленої мети в дослідженні використано методи аналізу нормативно-правових актів, порівняння та систематизації їхніх положень, а також експертного оцінювання.

Аналіз нормативно-правових актів застосовано для визначення змісту і взаємозв’язку положень законодавства у сфері цивільного захисту і містобудівної діяльності. Метод порівняння використано для зіставлення правового статусу різних категорій об’єктів, призначених для укриття населення, а також визначення відмінностей між захисними спорудами цивільного захисту, спорудами подвійного призначення, найпростішими укриттями та захищеними просторами. Експертну оцінку застосовано під час формування пропозицій щодо напрямів подальшого нормативного врегулювання.

Виклад основного матеріалу. Забезпечення належного укриття населення є одним із найбільш ефективних заходів

цивільного захисту, з одного боку, але також і заходом, що потребує найбільше ресурсів для реалізації, з іншого боку, як часових, так і грошових.

Згідно з вимогами чинного законодавства України, укриттю в об'єктах відповідного фонду підлягають усі категорії населення як за місцем роботи (навчання), так і місцем проживання.

Для України забезпечення укриття населення є одним із головних напрямів цивільного захисту в умовах збройного конфлікту. В умовах постійних ракетних ударів, атак безпілотників, артилерійських обстрілів і загроз для цивільної інфраструктури це питання щоденної безпеки людей. Тому головне завдання держави і громад на сьогодні – забезпечити для кожної людини під час повітряної тривоги не формальне, а реальне місце для укриття, доступне, зрозуміле, придатне для використання і розташоване поруч із місцем проживання, роботи або навчання.

Фактично на досягнення цієї мети і направлено зміни, запроваджені Законом України № 4778-IX у частині передбачення захисних споруд цивільного захисту публічного доступу, розроблення схеми захисних споруд як окремого документа містобудівної документації, уточнення вимог щодо передбачення захисних споруд цивільного захисту і/або споруд подвійного призначення у проєктній документації, а також запровадження поняття «захищений простір».

Відповідно до статистичних даних ДСНС України (інформацію взято, узагальнено та систематизовано з різних джерел, розміщених на офіційному вебсайті ДСНС України), станом на початок 2026 року фонд захисних споруд цивільного захисту становив близько 68 800 об'єктів, із яких понад 53 500 визначені як готові для використання за призначенням, а 7 600 об'єктів розташовані на тимчасово окупованих територіях. Водночас наявний фонд захисних споруд може забезпечити засобами колективного захисту близько 55 % населення України, що все ще є недостатнім показником в умовах війни. Саме тому основним завдання держави на сьогодні є постійна робота над збільшенням кількості об'єктів фонду захисних споруд, приведенням наявних об'єктів у стан готовності для використання та розширенням доступу населення до безпечних місць укриття.

Передусім потрібно зупинитися на самій структурі фонду захисних споруд цивільного захисту і його основних категоріях, які визначені на сьогодні чинними нормативно-правовими актами і нормативними документами.

Перша категорія – це захисні споруди цивільного захисту: сховища та протирадіаційні укриття. Загалом таких об'єктів близько 24 800.

Сховище визначають відповідно до статті 32 Кодексу цивільного захисту України як герметичну споруду, у якій створені умови для перебування людей і їх захисту протягом певного часу (не менше 48 годин) через виключення або зменшення прогнозованого впливу небезпечних чинників, що можуть виникнути внаслідок надзвичайної ситуації, застосування зброї масового ураження та звичайних засобів ураження під час воєнних (бойових) дій і/або терористичних актів. Сховища мають вищий рівень інженерного захисту, зокрема герметичні властивості.

Протирадіаційні укриття мають інші характеристики, але також виконують важливу функцію захисту населення від небезпечних чинників. Визначення протирадіаційного укриття також містить стаття 32 Кодексу цивільного захисту України, визначаючи його як негерметичну споруду, у якій створені умови для перебування людей і їх захисту протягом певного часу (не менше 48 годин) через зменшення прогнозованого впливу небезпечних чинників, які можуть виникнути внаслідок надзвичайної ситуації, та іонізуючого опромінення в разі радіаційної аварії і радіоактивного

забруднення місцевості та непрямої дії звичайних засобів ураження під час воєнних (бойових) дій і/або терористичних актів.

Слід зазначити, що сховища та протирадіаційні укриття створюють лише будівництвом, тобто через нове будівництво або реконструкцію, що підтверджено також положеннями останнього абзацу частини другої статті 32 Кодексу цивільного захисту України. Це не просто пристосування існуючого приміщення, а створення об'єкта з відповідними інженерними та захисними властивостями згідно з вимогами будівельних норми.

Проте на сьогодні зазначені споруди (сховища та протирадіаційні укриття) за умов повного приведення їх у готовність для використання за призначенням зможуть укрити не більше 10 % усього населення України. Нарощування фонду захисних споруд цивільного захисту за рахунок будівництва сховищ і протирадіаційних укриттів є не швидким і, як уже зазначено вище, потребує певного ресурсу часу і коштів для реалізації.

До другої категорії фонду захисних споруд цивільного захисту належать споруди подвійного призначення. Відповідно до статті 32 Кодексу цивільного захисту спорудами подвійного призначення визначено будівлі, споруди чи їхні окремі частини, призначені для використання за основним функціональним призначенням із метою забезпечення суспільних або господарських потреб, а також мають відповідні захисні властивості та спроєктовані, побудовані або пристосовані для того, щоб забезпечити умови для тимчасового перебування людей у разі виникнення небезпеки їхньому життю і здоров'ю під час надзвичайної ситуації, воєнних (бойових) дій і терористичних актів. Станом на сьогодні, за статистичними даними ДСНС, їхня кількість є невеликою, проте такі види об'єктів фонду захисних споруд цивільного захисту є дійсно перспективним напрямом, оскільки у звичайний час (мирний період) вони можуть бути використані за основним призначенням, наприклад як підземний паркінг, спортивний зал, споруда транспорту (метрополітену, швидкісного трамваю), складське приміщення або інший інфраструктурний об'єкт, а у воєнний час повноцінно слугувати об'єктами для укриття населення. Для сучасних міст це один із найбільш логічних шляхів розвитку. Відповідно до визначення, споруди подвійного призначення повинні мати захисні властивості сховища або протирадіаційного укриття. Створення споруд подвійного призначення відбувається також виключно через будівництво. Тобто йдеться не про формальне визначення будь-якого підземного приміщення як споруди подвійного призначення, а саме про об'єкт, який створений або реконструйований із дотриманням відповідних нормативних вимог щодо захисту населення.

Третю, і найбільшу на сьогодні, категорію складають найпростіші укриття, їхня кількість на сьогодні становить понад 43 тисячі. До найпростіших укриттів законодавець відносить цокольне або підвальне приміщення, іншу споруду підземного простору, у якій створені умови для тимчасового перебування людей (не менше 48 годин) у разі виникнення небезпеки їхньому життю і здоров'ю з метою зменшення непрямої дії звичайних засобів ураження під час воєнних (бойових) дій і/або терористичних актів. Отже, до вказаної категорії можуть потрапляти підвали, цокольні приміщення, підземні переходи та інші приміщення підземного простору, які можуть зменшити ризик ураження людей під час обстрілів. Такі укриття не завжди мають рівень захисту, як класичні захисні споруди, але, відповідно до наведеного визначення зі статті 32 Кодексу цивільного захисту України, такий захист і не потрібен. Головна перевага найпростіших укриттів – це близькість до населення і можливість швидкого використання. При цьому найпростіші укриття створюють не

будівництвом у класичному розумінні, а через облаштування відповідних приміщень або споруд, їх обстеження та ухвалення відповідними суб'єктами ведення обліку рішення про взяття такого об'єкта на облік як найпростішого укриття. Тобто основним є не лише наявність підвалу або іншого приміщення, а його фактична придатність для укриття людей і належне відображення в обліку фонду захисних споруд цивільного захисту.

Нарощування фонду захисних споруд цивільного захисту через облаштування найпростіших укриттів дозволено саме під час особливого періоду, тобто коли важливими є строки збільшення кількості об'єктів і забезпечення якомога більшої кількості населення укриттям.

Необхідно звернути увагу, що метрополітени як споруди подвійного призначення порівняно з вищезгаданими варіантами найпростішого укриття, хоча і мають кращі показники захисних властивостей і загальну місткість, що суттєво перевищує їх фактичне наповнення під час повітряних тривог, але їхнє розміщення на місцевості не дає змогу використовувати їх на повну потужність. Окрім того, споруди метрополітену є лише в декількох містах України.

Беручи до уваги вищезазначене та відсутність достатньої кількості захисних споруд цивільного захисту і споруд подвійного призначення, на сьогодні основна маса населення під час повітряних атак вимушена укриватися саме в найпростіших укриттях або використовувати «принцип двох стін», не виходячи зі свого помешкання.

Разом із тим найпростіші укриття, незважаючи на досить широке їх розповсюдження, мають один значний недолік – відсутність вимог щодо їхніх захисних властивостей, через що населення, яке в них укривається, постійно стикається з реальними небезпеками для свого життя і здоров'я. Крім того, щоб потрапити до цих споруд, потрібен час, а в деяких випадках необхідно подолати відкриту місцевість. В умовах загрози балістики кожна хвилина часу матиме значення.

Перший крок для вирішення описаної проблематики здійснено Законом України № 4778-IX [9] через запровадження нового виду об'єктів, призначених для укриття населення – захищених просторів. Слід зазначити, що, хоча такі захищені простори не замінять повноцінних захисних споруд цивільного захисту, їх наявність у квартирі (офісі) сьогодні є найбільш ефективним шляхом розв'язання проблеми і дійсно більш надійним засобом захисту, ніж «принцип двох стін».

Передбачають, що такі об'єкти будуть мати певні захисні властивості, перелік яких, проте, на сьогодні ще не визначено. Водночас Законом України № 4778-IX [9] передбачено, що захисні властивості таких просторів, як і захисних споруд цивільного захисту і споруд подвійного призначення, мають бути визначені в будівельних нормах на проєктування будівель і споруд, у яких їх планують розміщувати, і погоджені з МВС, ДСНС, Міністерством оборони України і Генеральним штабом Збройних Сил України.

З огляду на наведене вище, із подальшим унормуванням вимог щодо захищених просторів доцільно визначити, що вони мають забезпечувати тимчасовий захист населення під час правового режиму воєнного стану через зменшення впливу таких прогнозованих небезпечних чинників:

- дії повітряної ударної хвилі в разі застосування звичайних засобів ураження;
- побічної дії звичайних засобів ураження;
- проникнення уламками засобів звичайного ураження;
- дії високих температур і продуктів горіння в разі пожежі.

Ґрунтуючись на вказаному, під час створення відповідних будівельних норм доцільно врахувати (встановити) такі основні вимоги:

1) визначення нормативного (мінімального) строку забезпечення гарантованого використання захищених просторів для укриття: за аналогією з первинними (мобільними) укриттями доцільно визначити на рівні не більше 4 год поспіль;

2) захищений простір повинен мати основне функціональне призначення, не пов'язане з режимом укриття. Разом із тим потрібно враховувати, що основне призначення не має становити ризик для життя і здоров'я осіб, які використовують цей простір у режимі укриття: для цього доцільним є нормативне встановлення визначених обґрунтованих заборон та обмежень, наприклад заборони прокладання через або в захищений простір інженерних комунікацій (газо-, тепло-, водопостачання та каналізації), за винятком електричних мереж. Оптимальним для мінімізації ризиків загроз для життя і здоров'я людей можна приймати таке функціональне призначення як будь-яке житлове або офісне приміщення (гардеробні, спальні, кабінети, господарчі приміщення тощо). Натомість захищені простори не можна передбачати як їдальні, приміщення для приготування їжі, санітарно-гігієнічні приміщення (туалети, ванни, душові тощо);

3) обов'язковість встановлення вимог щодо матеріалів, із яких планують виготовляти (будувати) такі захищені простори та/або їхні окремі конструкції. Головною вимогою має бути забезпечення нормативної міцності та негорючості, за основу можна взяти відповідні вимоги ДСТУ 9329:2025 [4] щодо матеріалів, із яких виготовляють первинні (мобільні) укриття;

4) конструктивна схема захищених просторів має забезпечити їхню стійкість:

- до дії надмірного тиску повітряної ударної хвилі величиною не менше 500 кПа;
- пробиття уламками звичайних засобів ураження та вторинного сколювання на внутрішній поверхні (для бетону і залізобетону): використання за аналогією відповідних вимог ДБН В.2.2-5:2023 [3] і ДСТУ 9329:2025 [4];

5) заборона влаштування в захищених просторах віконних отворів, передбачення для захисту дверних отворів вибухозахищених дверей, встановлення в системі вентиляції противибухових клапанів;

6) забезпечення загальної стійкості до перекидання і/або руйнування захищених просторів від горизонтальної дії повітряної ударної хвилі та/або кінетичної енергії маси засобу ураження. Зазначене має бути реалізовано насамперед встановленням вимог щодо розміщення захищених просторів у монолітному ядрі жорсткості (у таких ядрах жорсткості зазвичай розміщені ліфтові шахти). Ґрунтуючись на вказаному, під час дії звичайних засобів ураження такі конструкції залишаються майже неушкодженими (приклад зруйнованого в м. Маріуполі будинку, від якого залишилася тільки ліфтова шахта, показано на рисунку).

Також для захищених просторів потрібно вирішити питання про доцільність їх забезпечення системами фільтровентиляції або достатності системи чистої вентиляції. У разі передбачення системи чистої вентиляції (можливо з частковою ізоляцією цього приміщення на певний час від зовнішнього середовища) потребуватиме вирішення питання про шляхи захисту людей, які перебувають у таких просторах, від небезпечних продуктів горіння.

Одним із варіантів розв'язання такої проблеми є передбачення у приміщеннях захищених просторів запасів засобів індивідуального захисту (протигазів), забезпеченими відповідними (гопколітовими) фільтрами.

Також, за бажанням замовника, захищені простори можуть бути забезпечені системами вентиляції з використанням у таких системах ручних вентиляторів. Вказане допоможе більш ефективно захистити людей від небезпечних продуктів горіння.



Рис. 1. Ліфтова шахта в повністю зруйнованому багатоповерховому будинку в м. Маріуполі *(джерело https://24tv.ua/vid-budinku-zalishilasya-tilki-shahta-lifta-strashne-foto-iz_n2417636)*

За дотримання таких умов захищені простори зможуть стати ефективним доповненням до об'єктів фонду захисних споруд цивільного захисту, що дасть змогу гарантувати безпеку людей і їх укриття в максимально короткі строки.

Проте, з огляду на чинні нормативно-правові акти і нормативні документи, на сьогодні створення захищених просторів у складі житлових і громадських будівель є не обов'язковим, а рекомендованим рішенням, а отже, його відсутність не буде впливати на можливість реалізації проєкту і будівництва об'єкта і введення його в експлуатації. З іншого боку, під час будівництва, наприклад, житлового будинку з класом наслідків (відповідальності) не нижче СС2 обов'язковим рішенням буде проєктування та будівництво захисної споруди цивільного захисту (зазвичай протирадіаційного укриття) або споруди подвійного призначення з відповідними захисними властивостями з можливістю додаткового передбачення для мешканців цього будинку захищених просторів, зокрема у складі квартири. Доцільно провести більш детальне дослідження для визначення необхідності запровадження обов'язковості норм щодо влаштування захищених просторів із будівництвом об'єктів, на яких постійно або тимчасово можуть перебувати люди.

Інше важливе питання, сформульоване під час проведення цього дослідження, стосується схеми розміщення захисних споруд цивільного захисту і споруд подвійного призначення (схема захисних споруд). Слід зазначити, що можливість створення схеми захисних споруд окремим документом на підставі існуючої містобудівної документації, для її оновлення або розроблення наново, а також з

урахуванням існуючої містобудівної ситуації має позитивно вплинути на планування заходів цивільного захисту в територіальних громадах, розвитку фонду захисних споруд цивільного захисту. Такі схеми розміщення захисних споруд дадуть змогу забезпечити більш системний і комплексний підхід щодо планування необхідного укриття різних категорій людей під час їх перебування вдома, на роботі, навчанні, під час пересування транспортом тощо.

Щодо визначення вичерпного переліку будівель і споруд, під час нового будівництва або реконструкції яких обов'язково мають бути передбачені захисні споруди цивільного захисту або споруди подвійного призначення, то вказане положення вже на сьогодні викликало значний інтерес, широке обговорення та різне трактування його норм як серед проєктантів, так і експертів у галузі будівництва, що зумовлено тим, що зміни, внесені Законом України № 4778-IX до Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності», частково вступають у конфлікт з нормами Кодексу цивільного захисту України.

Так, Кодекс цивільного захисту України, як профільний закон у сфері цивільного захисту, не містить обмежень стосовно переліку та класу наслідків (відповідальності) об'єктів, у складі яких (або для яких) мають бути передбачені захисні споруди цивільного захисту і споруди подвійного призначення. Також цим нормативно-правовим актом встановлено обов'язок суб'єктів господарювання, інших юридичних осіб і фізичних осіб-підприємців забезпечити засобами колективного захисту, до яких, зокрема, належать захисні споруди цивільного захисту і споруди подвійного призначення, усіх своїх працівників і відвідувачів – для об'єктів і місць із масовим перебуванням людей.

Натомість Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» з урахуванням внесених до нього змін під час будівництва (нового будівництва та реконструкції) встановлює такий обов'язок тільки стосовно об'єктів, що належать суб'єктам господарювання, які віднесені або підлягають віднесенню до відповідної категорії цивільного захисту, а також об'єктів критичної інфраструктури, які відповідно до вимог законодавства віднесені до I – IV категорії критичності та на яких передбачено постійне та/або періодичне перебування персоналу працівників (працюючої зміни).

Для житлових будинків, гуртожитків і готелів зазначеним Законом у новій редакції визначено обов'язковість передбачення у їхньому складі захисних споруд цивільного захисту і споруд подвійного призначення тільки у випадках, якщо вищезазначені об'єкти будівництва за класом наслідків (відповідальності) будуть належати до об'єктів із середніми (СС2) і значними (СС3) наслідками, на яких постійно перебуватимуть понад 50 фізичних осіб або періодично перебуватимуть понад 100 фізичних осіб.

Якщо враховувати, що на сьогодні середня кількість членів однієї сім'ї в Україні становить близько трьох осіб, то тоді для проведення розрахунку класу наслідків (відповідальності) для житлового будинок, який містить, наприклад, 16 квартир, буде визначено, що такий будинок належить до об'єктів із незначними наслідками (СС1), у яких постійно перебуватимуть до 50 осіб, тобто, відповідно до положень Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності», передбачення захисних споруд цивільного захисту під час проєктування і будівництва такого об'єкта не буде обов'язковим.

З урахуванням проаналізованих норм виникає прогалина в чинному законодавстві щодо обов'язку забезпечення укриття через будівництво захисних споруд або споруд подвійного призначення для персоналу суб'єктів господарювання, не віднесених до категорії цивільного захисту або об'єктів критичної інфраструктури, із чисельністю

працівників до 100 осіб, а також мешканців житлових будинків або гуртожитків, розрахованих на проживання до 50 осіб. Стосовно цього відсутнє чітке визначення та розмежування повноважень між різними суб'єктами забезпечення цивільного захисту, зокрема немає чіткої норми щодо виконання вказаного обов'язку органами місцевого самоврядування під час створення ними захисних споруд цивільного захисту публічного доступу.

З іншого боку, Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» у новій редакції передбачає обов'язковість будівництва захисних споруд цивільного захисту або споруд подвійного призначення під час нового будівництва та реконструкції чітко визначеного переліку об'єктів навіть за умов відсутності потреби в таких спорудах. Наприклад, під час будівництва житлового комплексу в його складі окремим об'єктом у першій черзі будівництва було передбачено та побудовано захисну споруду цивільного захисту або споруду подвійного призначення загальною місткістю на повну чисельність мешканців і відвідувачів цього комплексу. При цьому, проєктуючи житлові будинки інших черг окремо, у подальшому, незважаючи на фактичну відсутність потреби, у складі проєкту на кожен із цих будинків формально має бути передбачено захисну споруду цивільного захисту або споруду подвійного призначення.

Неоднозначність трактування вимог Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» за умов їх неповної відповідності нормам Кодексу цивільного захисту України може призвести як до спроб забудовників в окремих випадках уникнути будівництва захисних споруд цивільного захисту або споруд подвійного призначення, так і надмірного навантаження з відповідними витратами, пов'язаними з необхідністю формального виконання вимог обов'язковості будівництва захисних споруд у складі об'єкта за умов відсутності обґрунтованої потреби, визначеної відповідно до Кодексу цивільного захисту України уповноваженими на це органами.

Слід зазначити, що Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» [10] встановлює правові та організаційні основи містобудівної діяльності і спрямований на забезпечення сталого розвитку територій з урахуванням державних, громадських і приватних інтересів. З огляду на наведене, встановлення вимог щодо організації укриття населення не належить до сфери його регулювання і має бути здійснюваний згідно з нормами Кодексу цивільного захисту України [5].

За таких умов правильність застосування норм законодавства щодо передбачення у складі об'єкта будівництва захисної споруди цивільного захисту або споруди подвійного призначення буде залежати вже від компетенції та позиції експерта, що буде здійснювати експертизу за напрямом інженерно-технічних заходів цивільного захисту відповідної проєктної документації.

Для усунення можливих правових колізій вбачають за доцільне доповнити зазначені вище нормативно-правові акти узгодженими між собою нормами щодо чіткого переліку об'єктів будівництва та відповідних умов, за яких захисні споруди цивільного захисту або споруди подвійного призначення під час нового будівництва або реконструкції можна не передбачати.

Наприклад, відсутність потреби в будівництві класичних захисних споруд цивільного захисту може бути обґрунтована для об'єктів, на яких укриття населення під час воєнного стану передбачено в первинних (мобільних) укриттях, а саме:

- об'єктів транспорту: майданчиків для стоянки, відпочинку, зупинок громадського наземного транспорту, залізничних платформ тощо;
- об'єктів відпочинку та розваг: парків, скверів, пляжів, стадіонів тощо;
- об'єктів торгівлі: ринків, зокрема критих, торговельних павільйонів із легкозбірних конструкцій тощо.

Також зазначену норму можна було б розповсюдити на об'єкти суб'єктів господарювання з незначною чисельністю персоналу, наприклад до трьох осіб включно (невеличкі крамниці, СТО, майстерні тощо), а також об'єктів, наявність постійного персоналу на яких не передбачена, а їх експлуатація та/або обслуговування здійснює лінійний персонал.

На сьогодні такі норми відсутні, що викликає перешкоди не тільки під час нового будівництва, а і проведення капітального ремонту або реконструкцій вказаних об'єктів, зокрема і для їх відновлення в разі можливих пошкоджень унаслідок воєнних дій.

Щодо повноважень органів місцевого самоврядування створювати захисні споруди цивільного захисту публічного доступу, то слід зазначити, що вказана норма, якою доповнено Кодекс цивільного захисту України та Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності», сама по собі не сприятиме розвитку фонду захисних споруд цивільного захисту, оскільки на сьогодні має декларативний характер і не підкріплена чіткою відповідальністю за її невиконання.

Доцільно також звернути увагу, що, ураховуючи необхідність розміщення захисних споруд цивільного захисту публічного доступу на землях комунальної власності, у тому числі на тих, де не сформовано земельні ділянки, в окремих випадках, насамперед у великих містах, також можуть виникнути проблеми з реалізацією цієї норми через брак вільного місця для розміщення відповідних споруд.

Ще одним чинником, який може перешкоджати отриманню бажаних швидких результатів щодо поповнення відповідного фонду захисними спорудами цивільного захисту публічного доступу, є той факт, що створення фонду захисних споруд цивільного захисту передбачає залучення значних коштів і матеріальних ресурсів, що у свою чергу має бути відображено в нормах із бюджетування.

Висновки та рекомендації. Проведений аналіз показав, що розвиток системи об'єктів для укриття населення потребує взаємоузгодженого застосування норм законодавства у сфері цивільного захисту і містобудівної діяльності. Закон України № 4778-IX передбачає важливі зміни у сфері організації укриття населення, зокрема запровадження поняття «захищений простір», захисних споруд цивільного захисту публічного доступу та можливості розроблення схеми захисних споруд. Водночас основні положення Закону, розглянуті в цій статті, набрали чинності 8 вересня 2026 року, тому практична реалізація їх потребує попереднього нормативного та організаційного забезпечення.

На сьогодні в Україні відсутня взаємоузгоджена концепція забезпечення захисту населення через його укриття у призначених для цього об'єктах. Разом із тим така концепція потребує термінового розроблення та впровадження через встановлення чітких і взаємопов'язаних між собою вимог у різних актах законодавства.

Із метою уникнення правових колізій норми різних актів законодавства, насамперед Кодексу цивільного захисту України та Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності», мають бути взаємоузгоджені.

Створення захищених просторів має стати обов'язковою нормою під час проєктування будівель і споруд різного призначення, насамперед житлових і громадських будівель, а також об'єктів критичної інфраструктури, персонал яких для забезпечення їхнього нормального функціонування не може залишити робочого місця навіть під час реальної небезпеки для життя і здоров'я.

Слід передбачити чітко визначену відповідальність (адміністративну, кримінальну) за неналежне виконання повноважень у сфері цивільного захисту для посадових осіб суб'єктів владних повноважень і зафіксувати механізм

притягнення до неї винних осіб. На сьогодні чинними нормативно-правовими актами передбачено відповідальність виключно за неналежне утримання наявних об'єктів фонду захисних споруд цивільного захисту, водночас норми щодо встановлення відповідальності за порушення обов'язку забезпечити населення такими об'єктами відсутні.

Захисні споруди цивільного захисту і споруди подвійного призначення, крім незначних і чітко визначених випадків, мають бути передбачені у складі об'єктів будівництва різного призначення, у яких постійно або тимчасово перебувають люди.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення науково обґрунтованих критеріїв оцінювання захисних властивостей захищених просторів і визначення умов їх застосування у житлових, громадських будівлях та на інших об'єктах, де передбачено постійне або тимчасове перебування людей.

Список використаних джерел

1. Бабич, Ю. (2024). Ізраїльські укриття: що таке мамади та мамаки та від чого вони захищають. 24 канал. URL: https://realestate.24tv.ua/shho-take-mamadi-mamaki-izrayili-vid-chogo-voni-zahishhayut_n2181368 (дата звернення: 10.08.2026).
2. Бут, М. О., Ігнатьков, В. М., Чемакіна, О. В., & Сотніков, Д. А. (2024). Аналіз нормативної бази щодо проектування об'єктів цивільного захисту. Теорія та практика дизайну. *Архітектура та будівництво*, 2(32), 12–20. DOI: 10.32782/2415-8151.2024.32.2
3. *ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту*. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3875987194791331287?doc_type=2 (дата звернення: 10.08.2026).
4. *ДСТУ 9329:2025. Первинні (мобільні) укриття. Основні параметри та методи випробування*. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_9329_2025/5-1-0-1965 (дата звернення: 10.08.2026).
5. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text (дата звернення: 10.08.2026).
6. Махнюк, В. В., Махнюк, В. М., & Самойлова, І. І. (2023). Забезпечення вимог цивільного захисту населення України в умовах війни під час планування та забудови територій. *Механізми публічного управління,* 1. DOI: 10.32782/TNU-2663-6468/2023.1/12
7. Мугаверо, Р., Андронова, В., & Кустов, М. *Особливості цивільного захисту в умовах воєнного конфлікту* : колективна монографія. Харків: Рим: ДСНС України, НУЦЗУ, 2023. 238 с. URL: https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19443/3/136_2023_CEMEC_libro_A5.pdf (дата звернення: 10.08.2026).
8. Некора, В., Ніжник, В., Поздєєв, С., Луценко, Ю., & Михайлов, В. (2023). Особливості та перспективи ефективного функціонування захисних споруд цивільного захисту в умовах бойових дій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека,* 1 (15), 149–157. DOI: 10.33269/nvcz.2023.1(15).149-157
9. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо запобігання надзвичайним ситуаціям та ліквідації їх наслідків, формування фонду захисних споруд цивільного захисту, створення класів та центрів безпеки : Закон України від 10.02.2026 р. № 4778-IX URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4778-20#Text
10. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 р. № 3038-VI. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text (дата звернення: 10.08.2026).

11. Сердечна, А., & Думич, А. (2025). Досвід Держави Ізраїль у створенні внутрішньо-квартирних захисних споруд: аналіз та можливості імплементації в Україні. *BMC-2025 – International Scientific and Practical Conference «Build Master Class 2025»*. Київ.

12. Чемакіна, О. В., Авдєєва, Н. Ю., Бутик, М. В., & Гнатюк, Л. Р. (2023). Теоретичні засади протидії терористичним актам в міському середовищі. *Містобудування та територіальне планування,* 83, 355–365. DOI: 10.32347/2076-815x.2023.83-355-365

13. Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., & Strehlow, R. A. (1983). *Explosion Hazards and Evaluation*. Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company.

14. Kopiika, N., Di Bari, R., Argyroudis, S., Ninic, J., & Mitoulis, S.-A. (2025). Sustainability and resilience-driven prioritisation for restoring critical infrastructure after major disasters and conflict. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 139, 104592. DOI: 10.1016/j.trd.2025.104592

15. Lytvynenko, V. M. et al. (2024). Resilience of transport logistics in EU and Ukraine under conditions of military actions and technological hazards. *Journal of Transport and Logistics,* 14 (3), 112–125. DOI: 10.2478/jtl-2024-0018

16. Smith S. (2023). Conflict-resilience framework for critical infrastructure peacebuilding: Application to the transport network of Kyiv region, Ukraine / S. Smith et al. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 86, 103542. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2023.103542 URL: https://www.researchgate.net/publication/367118942_Conflict-resilience_framework_for_critical_infrastructure_peacebuilding

17. Volkov, I. et al. (2026). Energy Resilience and Sustainability Under War: Attacks on Critical Infrastructure and Systemic Spillover Risks. *Sustainability*, 18 (12), 6044. DOI: 10.3390/su18126044

18. Zhydkova, T. V., & Melnychuk, H. V. (2026). The Metro System as a Component of the Civil Protection Strategy: Functional Transformation and Usage Scenarios. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, 1, 38–47. DOI: 10.32782/apcmj.2026.1.5.

References

1. Babych, Yu. (2024). Israeli Shelters: What Are Mamad and Mamak and What Do They Protect Against? 24 Kanal. Available at: https://realestate.24tv.ua/shho-take-mamadi-mamaki-izrayili-vid-chogo-voni-zahishhayut_n2181368 (accessed: 10 August 2026). [in Ukrainian].

2. But, M. O., Ihnatkov, V. M., Chemakina, O. V., & Sotnikov, D. A. (2024). Analysis of the Regulatory Framework for the Design of Civil Protection Facilities. Theory and Practice of Design. Architecture and Construction, 2(32), 12–20. DOI: 10.32782/2415-8151.2024.32.2. [in Ukrainian].

3. DBN V.2.2-5:2023. *Protective Structures for Civil Protection*. Available at: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3875987194791331287?doc_type=2 (accessed: 10 August 2026).

4. DSTU 9329:2025. *Primary (Mobile) Shelters. Basic Parameters and Test Methods*. Available at: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_9329_2025/5-1-0-1965 (accessed: 10 August 2026).

5. *Code of Civil Protection of Ukraine*: Law of Ukraine No. 5403-VI of 2 October 2012. Database “Legislation of Ukraine” / Verkhovna Rada of Ukraine. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text (accessed: 10 August 2026).

6. Makhniuk, V. V., Makhniuk, V. M., & Samoilova, I. I. (2023). Ensuring Civil Protection Requirements for the Population of Ukraine under Wartime Conditions during Spatial Planning and Development of Territories. *Mechanisms of Public Administration,* 1. DOI: 10.32782/TNU-2663-6468/2023.1/12. [in Ukrainian].

7. Mugavero, R., Andronova, V., & Kustov, M. (2023). *Specific Features of Civil Protection under Conditions of Armed Conflict:* Collective Monograph. Kharkiv; Rome: State Emergency Service of Ukraine, National University of Civil Defence of Ukraine, 238. Available at: https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19443/3/136_2023_CEMEC_libro_A5.pdf (accessed: 10 August 2026). [in Ukrainian].

8. Nekora, V., Nizhnyk, V., Pozdieiev, S., Lutsenko, Yu., & Mykhailov, V. (2023). Osoblyvosti ta perspektyvy efektyvnoho funktsionuvannya zakhysnykh sporud tsyvil′noho zakhystu v umovakh boyovykh diy [Features and Prospects for the Effective Functioning of Protective Structures for Civil Protection under Combat Conditions]. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1 (15), 149–157. DOI: 10.33269/nvcz.2023.1(15).149-157. [in Ukrainian].

9. *On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Concerning the Prevention of Emergencies and Elimination of Their Consequences, Formation of the Fund of Protective Structures for Civil Protection, and Establishment of Safety Classes and Centers*: Law of Ukraine No. 4778-IX of 10 February 2026.

10. *On Regulation of Urban Development Activities*: Law of Ukraine No. 3038-VI of 17 February 2011. Database "Legislation of Ukraine" / Verkhovna Rada of Ukraine. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text (accessed: 10 August 2026).

11. Serdechna, A., & Dumych, A. (2025). Experience of the State of Israel in the Creation of Intra-Apartment Protective Structures: Analysis and Possibilities for Implementation in Ukraine. *BMC-2025 – International Scientific and Practical Conference "Build Master Class 2025"*. Kyiv. [in Ukrainian].

12. Chemakina, O. V., Avdieieva, N. Yu., Butyk, M. V., & Hnatiuk, L. R. (2023). Theoretical Foundations for Countering Terrorist Attacks in the Urban Environment. *Urban Planning and Spatial Planning*, 83, 355–365. DOI: 10.32347/2076-815x.2023.83-355-365. [in Ukrainian].

13. Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., & Strehlow, R. A. (1983). *Explosion Hazards and Evaluation*. Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company.

14. Kopiika, N., Di Bari, R., Argyroudis, S., Ninic, J., & Mitoulis, S.-A. (2025)/ Sustainability and resilience-driven prioritisation for restoring critical infrastructure after major disasters and conflict. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 139, 104592. DOI: 10.1016/j.trd.2025.104592

15. Lytvynenko, V. M. et al. (2024). Resilience of transport logistics in EU and Ukraine under conditions of military actions and technological hazards. *Journal of Transport and Logistics,* 14 (3), 112–125. DOI: 10.2478/jtl-2024-0018 [in English].

16. Smith S. (2023). Conflict-resilience framework for critical infrastructure peacebuilding: Application to the transport network of Kyiv region, Ukraine / S. Smith et al. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 86, 103542. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2023.103542 URL: https://www.researchgate.net/publication/367118942_Conflict-resilience_framework_ for_critical_infrastructure_peacebuilding

17. Volkov, I. et al. (2026). Energy Resilience and Sustainability Under War: Attacks on Critical Infrastructure and Systemic Spillover Risks. *Sustainability*, 18 (12), 6044. DOI: 10.3390/su18126044 [in English].

18. Zhydkova, T. V., & Melnychuk, H. V. (2026). The Metro System as a Component of the Civil Protection Strategy: Functional Transformation and Usage Scenarios. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, 1, 38–47. DOI: 10.32782/apcmj.2026.1.5. [in English].

Підгорецький Юрій Юрійович, доктор філософії (PhD) у галузі Цивільна безпека, доцент кафедри цивільної інженерії, Відокремлений структурний підрозділ «Інститут інноваційної освіти Київського національного університету архітектури і будівництва». E-mail: yura.ddpb@gmail.com. Тел.: +38(063)1689018. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0888-1442.

Трунцев Георгій Владиславович, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту, Національний університет цивільного захисту України. E-mail: georg-0590@ukr.net. Тел.: +38(067)1549075.
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7390-3246.

Yuriy Pidhoretskyi, PhD in Civil Security, Associate Professor at the Department of Civil Engineering, Institute of Innovative Education of the Kyiv National University of Construction and Architecture.
E-mail: yura.ddpb@gmail.com. Tel.: +38(063)1689018. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0888-1442.
Heorhiy Truntsev, Institute of Civil Protection Research of the National University of Civil Protection of Ukraine.
E-mail: georg-0590@ukr.net. Tel.: +38(067)1549075. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7390-3246.

Дата надходження статті: 23.07.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 07.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 697.34

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF DISTRICT HEATING NETWORKS AFTER BOILER HOUSE MODERNIZATION UNDER A REDUCED TEMPERATURE REGIME

PhD (Tech.) O. Gvozdeckyi, PhD (Tech.) S. Pavlovskyi, PhD (Tech.) L. Tiutiunyk, Senior Lecturer O. Panchuk, Master's student K. Avakian

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ ПІСЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ КОТЕЛЬНІ ПРИ ЗНИЖЕНОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ ГРАФІКУ

Кандидати техн. наук О. В. Гвоздецький, С. В. Павловський, Л. І. Тютюник, старш. викл. О. В. Панчук, магістранка К. О. Авакян

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371597

Abstract. *The article examines the modernization of a boiler house and the transition to a reduced-temperature operating schedule of the heating networks of a school located in the Kharkiv district. The economic efficiency of transitioning to a fourth-generation district heating system is considered through the change from a 95/70 °C temperature schedule to a 55/40 °C temperature schedule. A comparison of hydraulic and thermal losses in heating networks constructed from steel and non-metallic pipelines is carried out. Methods for reducing the heat carrier flow rate in heating networks are also considered.*

Keywords: *district heating system, heat carrier flow rate, thermal losses, hydraulic losses, energy efficiency, thermal modernization, heating networks.*

Анотація. *У статті розглянуто питання модернізації котельні та переходу теплових мереж закладу загальної середньої освіти, розташованого в Харківському районі, на*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Гвоздецький О. В., Павловський С. В., Тютюник Л. І.,
Панчук О. В., Авакян К. О., 2026.

знижений температурний графік теплопостачання. Особливу увагу приділено впровадженню принципів систем теплопостачання четвертого покоління, що передбачають підвищення енергоефективності, зменшення теплових втрат, оптимізацію гідравлічних і температурних режимів і підвищення надійності роботи системи теплопостачання.

Метою дослідження є визначення технічної та економічної доцільності модернізації системи теплопостачання освітнього закладу через зниження температури теплоносія та застосування сучасних енергоефективних технологій. Досліджено економічну доцільність переходу від традиційного температурного графіка 95/70 °С до низькотемпературного графіка 55/40 °С. Проаналізовано вплив зниження температури теплоносія на витрати паливно-енергетичних ресурсів, гідравлічні параметри мережі та експлуатаційні показники системи теплопостачання.

У роботі проведено порівняльний аналіз гідравлічних характеристик і теплових втрат теплових мереж, виконаних зі сталевих і неметалевих трубопроводів. Оцінено вплив матеріалу трубопроводів, їхніх діаметрів і теплоізоляційних характеристик на величину втрат тиску, теплові втрати, довговічність і надійність експлуатації мереж у низькотемпературних режимах роботи. Розглянуто можливість використання сучасних попередньо ізольованих трубопроводів як одного з напрямів підвищення енергоефективності системи.

Також визначено основні шляхи зниження витрат теплоносія в теплових мережах, зокрема за рахунок термомодернізації будівлі, оптимізації гідравлічних режимів, застосування сучасного насосного обладнання з частотним регулюванням, балансування системи теплопостачання та використання енергоефективних трубопроводів із покращеними теплоізоляційними характеристиками. Запропоновані технічні рішення спрямовані на скорочення експлуатаційних витрат, підвищення енергоефективності та забезпечення стабільної роботи системи теплопостачання.

Ключові слова: *система теплопостачання, витрати теплоносія, теплові втрати, гідравлічні втрати, енергоефективність, термомодернізація, теплові мережі.*

Introduction. The heat supply system is one of the key elements of engineering infrastructure that ensures the delivery of thermal energy to residential, public, and industrial facilities. The efficiency of its operation depends on a combination of technical and operational factors, among which the hydraulic regime plays a decisive role, as it directly ensures the reliability, stability, and economic efficiency of heating network operation.

The hydraulic regime is understood as a set of parameters characterizing the distribution of pressure and heat carrier flow rate within the system, which directly affect the level of energy losses and the quality of heat supply provided to consumers. Disruptions in hydraulic balance lead to a reduction in the efficiency of thermal energy transportation, an increase in thermal and hydraulic losses, higher electricity consumption by pumping equipment, as well as an uneven temperature distribution throughout the network. As a result, this causes an increase in operating costs and a decrease in the overall energy efficiency of the heat supply system [1].

Analysis of recent research and publications. Among the current directions for improving the efficiency of heating networks, the implementation of reduced heat carrier supply temperature regimes occupies an important place. Traditional heat supply systems operating under high-temperature schedules are associated with significant thermal losses during heat carrier transportation and limit the possibilities for integrating alternative energy sources. In contrast, the use of low-temperature operating regimes, particularly with supply temperatures below 65 °C or around 50 °C, makes it possible to significantly reduce heat losses in the networks,

decrease operating costs, and improve the overall energy efficiency of heat supply systems [2].

Low-temperature heat supply systems are characterized by several additional advantages. First, reducing the temperature difference between the heat carrier and the surrounding environment contributes to lower thermal losses in pipelines [3]. Furthermore, such systems create favorable conditions for the integration of renewable and secondary energy sources, including geothermal installations, solar collectors, and industrial waste heat recovery technologies [4]. The operation of heat pumps under low-temperature conditions is also more efficient, as their performance is optimized under reduced heat carrier temperatures [5]. Additionally, this may contribute to lower operating costs for pumping equipment and other network components due to less stringent requirements for pressure and temperature parameters [6].

In the strategic context of decarbonizing the heating and cooling sector of the European Union by 2050, the development of fifth-generation district heating and cooling systems has been identified as an important direction. Such networks operate under low-temperature conditions, forming so-called “cold” thermal systems characterized by the extensive use of renewable energy sources and providing opportunities for bidirectional heat and cooling exchange within urban energy infrastructure [7].

At the same time, reducing the heat carrier temperature is accompanied by an increase in its flow rate, which, in turn, leads to higher hydraulic losses, the need for selecting pumping equipment of appropriate sizes, adjustments to pipeline diameters, and rebalancing of the heat supply system.

For Ukraine, the issue of improving the efficiency of heat supply systems is particularly relevant, as it is associated with strategic objectives of reducing energy consumption, decreasing dependence on conventional fuel and energy resources, and adapting heating networks to the principles of sustainable development. In this context, national regulatory and legal acts define criteria for assessing the efficiency of thermal energy transportation, including the level of heat losses in networks, specific water consumption, and electricity consumption, all of which directly depend on the hydraulic operating regime of the heat supply system [8].

Calculations of heat losses in heating networks, as well as methods for their determination, are presented and discussed in detail in studies [9, 10, 11]. Certain aspects of transitioning the heating networks of the city of Kharkiv from traditional temperature schedules of 150–70 °C and 135–70 °C to reduced schedules of 124–61 °C and 118–59 °C are comprehensively examined in study [12].

Goal and task setting. The primary objective of this study is to determine the level of reduction in fuel and energy resource consumption resulting from boiler house modernization and the transition of heating networks to operation under a reduced temperature schedule. Particular attention is paid to assessing the impact of low-temperature heat supply regimes on system energy efficiency, reducing heat losses in the networks, decreasing heat carrier consumption, and improving the operational efficiency of boiler and pumping equipment.

The study also considers various pipeline options for heating networks, including pre-insulated steel pipes and non-metallic pipelines with factory-manufactured thermal insulation. An analysis of their technical and operational characteristics was carried out, particularly hydraulic parameters, thermal losses, durability, operational reliability, and the economic feasibility of their application under low-temperature heat supply conditions.

In addition, the study examines the possibilities of reducing heat carrier flow rate as one of the principal approaches to minimizing hydraulic losses in heating networks. The impact of optimizing heat carrier flow rate on reducing pressure losses, lowering electricity consumption by pumping equipment, and improving the overall energy

efficiency of the heat supply system is also investigated.

The main part of the study. For the purposes of this study, a general secondary school located in the Kharkiv district was selected, with an existing heating system thermal load of 0,22 Gcal/h. Centralized domestic hot water supply is absent at the facility. The heat source is a local gas-fired boiler house located on the school premises, where two gas-fired NIISTU-5 boilers are installed (one operating unit and one standby unit), each with a thermal capacity of 300 kW and an actual efficiency of 75 %. The existing temperature schedule for qualitative regulation of the heat supply system is 95/70 °C. The heat supply system is a two-pipe system, with water used as the heat carrier.

The heating network from the boiler house to the school building is constructed of steel pipelines with a diameter of 133×4.0 mm, insulated with mineral wool slabs, and has a total length of 59.6 m. The heating networks are installed underground using a trenchless (channel-free) laying method.

Within the framework of this study, boiler house reconstruction is proposed, including the replacement of the existing NIISTU-5 boilers with modern condensing boilers, Vitocrossal 300 type CI3, manufactured by Viessmann [13], with an efficiency of 97,7 %. In addition, the replacement of the existing network pumps Wilo TOP-S 40/7 (two units: one operating and one standby) with modern energy-efficient Wilo Stratos MAXO 50/0,5-9 variable-speed pumps manufactured by Wilo [14] is planned.

A reduction of the temperature schedule to 55/40 °C is also proposed, which corresponds to the objectives of sustainable development, improvement of energy efficiency in heat supply systems, and transition toward fourth-generation district heating systems.

The study considers a comparison between the existing configuration of the heat source and heating networks and two new alternatives, taking into account boiler house modernization and heating network reconstruction: the first alternative involves the use of factory-manufactured pre-insulated steel pipelines with a diameter of 114/200×4.0 mm [15], while the second alternative involves replacing steel pipes with non-metallic pre-insulated pipelines with factory-manufactured thermal insulation, having a diameter of 110/182×10 mm [16]. A comparative analysis of the technical, thermal engineering, and hydraulic characteristics of these heating network alternatives is carried out.

In total, three system alternatives are considered:

Alternative 1 – the existing heat supply source and heating networks, operating under a temperature schedule of 95/70 °C;

Alternative 2 – a modernized boiler house operating under a temperature schedule of 55/40 °C, combined with reconstruction of the heating network using factory-manufactured pre-insulated steel pipelines with a diameter of 114/200×4.0 mm;

Alternative 3 – a modernized boiler house operating under a temperature schedule of 55/40 °C, combined with reconstruction of the heating network using factory-manufactured non-metallic pre-insulated CALPEX PUR-KING UNO pipelines with a diameter of 110/182×10 mm.

The specified alternatives will be compared in terms of thermal and hydraulic losses, gas consumption, and an analysis of operating costs during the heating period expressed in monetary terms will also be carried out.

Comparison of Heat Losses During the Heating Period

The specific heat losses are determined using the following equation, W/m:

$$q = \frac{T_{avg} - T_{gr}}{r_{tot}}, \qquad (1)$$

where T_{gr} – average ground temperature during the heating period, °C;

T_{avg} – average heat carrier temperature during the heating period, °C;

r_{tot} – total thermal resistance, m·°C/W.

The total thermal resistance of the insulation layer and other additional thermal resistances along the heat flow path is determined as:

$$r_{tot} = \frac{lnB}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_k} + \frac{1}{a_e \cdot \pi \cdot (D_{out}+1)}, \qquad (2)$$

where λ_k – thermal conductivity of the thermal insulation layer, W/(m·°C), assumed as 0,027 for steel pipes with polyurethane foam (PUF) insulation [15], 0,0199 for PEX-a pipes with polyurethane foam (PUF) insulation [16], and 0,04 for mineral wool slabs [17];

a_e – heat transfer coefficient from the outer surface of the thermal insulation, W/(m²·°C).

The ratio of the external diameter of the pipeline, including the thickness of the thermal insulation, to the external diameter of the pipe is defined as:

$$B = \frac{2 \cdot \delta_к}{D_{out}} + 1, \qquad (3)$$

where $\delta_к$ – thickness of the thermal insulation layer, m;

$D_{з_{тр}}$ – external diameter of the pipe, m.

The calculations of heat losses for Alternatives 1, 2, and 3 are summarized in Tables 1 and 2.

A comparative diagram of heat losses during the heating period is presented in Fig. 1.

Table 1

Determination of Specific Heat Losses for Three Pipeline Alternatives in Heating Networks

Pipeline	D_{out}, m	$\delta_к$, м	T_{avg}, °C	λ_k, W/(m·°C)	lnB	r_{tot}, m·°C/W	q, W/m
Alternative 1							
T1	0,133	0,04	57,1	0,04	0,47	2,015	28,3
T2	0,133	0,04	49,9	0,04	0,47	2,015	22,3
Alternative 2							
T1	0,114	0,043	39,5	0,027	0,56	3,46	10,0
T2	0,114	0,043	32,2	0,027	0,56	3,46	7,9
Alternative 3							
T1	0,110	0,036	39,5	0,0199	0,5	4,173	8,3
T2	0,110	0,036	32,2	0,0199	0,5	4,173	6,5

Table 2

Determination of Heat Losses in the Heating Network Section from the Boiler House to the General Secondary School During the Heating Period (4 296 hours in accordance with [18])

Alternative	Length, m	Heat Losses, W	
		Hourly	During the Heating Period
1	59,6	3 619,8	15 550 654,1
2	59,6	1 276,1	5 482 000,2
3	59,6	1 057,6	4 543 321,3

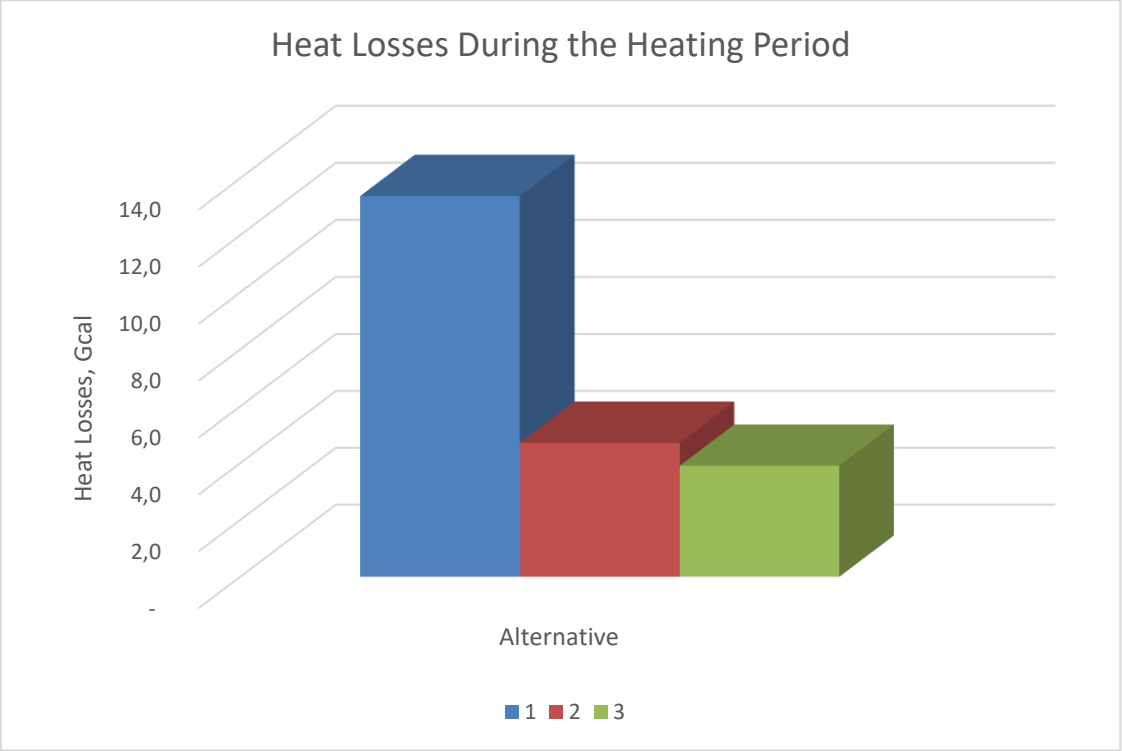


Fig. 1. Comparative Diagram of Heat Losses During the Heating Period

Comparison of Hydraulic Losses

According to data presented in [19], the heat carrier flow rate required for the heating systems of the general secondary school is determined as follows:

$$G_o = \frac{Q_o}{c \cdot \rho \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (4)$$

where G_o – heat carrier flow rate for heating system demands, L/s;

Q_o – maximum thermal load of the heating system, kW;

c – specific heat capacity, J/(kg·°C);

T_1 – heat carrier temperature in the supply pipeline, °C;

T_2 – heat carrier temperature in the return pipeline, °C;

ρ – density of the heat carrier, t/m³.

The heat carrier velocity, m/s, is determined using the following equation:

$$w = \frac{4 \cdot G_o \cdot 10^3}{3{,}14 \cdot D_{in}^2}. \quad (5)$$

Hydraulic pressure losses in heating networks are determined by considering both linear and local losses using the Darcy–Weisbach equation:

$$R = \lambda \cdot \frac{L}{D_в} \cdot \frac{\rho' \cdot w^2}{2} + \Sigma\xi \frac{\rho' \cdot w^2}{2}, \quad (6)$$

where R – pressure losses, Pa/m;

λ – hydraulic resistance coefficient;

L – length of the section, m;

D_{in} – internal diameter of the pipeline, m;

ρ' – density of the heat carrier, kg/m³;

w – heat carrier velocity, m/s;

$\Sigma\xi$ – sum of local resistance coefficients.

The calculation of hydraulic losses for Alternatives 1, 2, and 3 is summarized in Table 3.

A comparative diagram of head losses is presented in Fig. 2.

Table 3

Hydraulic Loss Calculations for Alternatives 1, 2, and 3

Alternative	Q_o, kW	T1, °C	T2, °C	G_o, L/s	L, m	D_{in}, мм	w, m/s	R, Pa/m	ΔP, Pa	ΣΔH, mH_2O
1	255,9	95	70	2,54	59,6	125	0,21	7,3	564	0,12
2	255,9	55	40	4,18	59,6	106	0,47	30,9	2 386	0,5
3	255,9	55	40	4,18	59,6	90	0,66	57,6	3 879	0,81

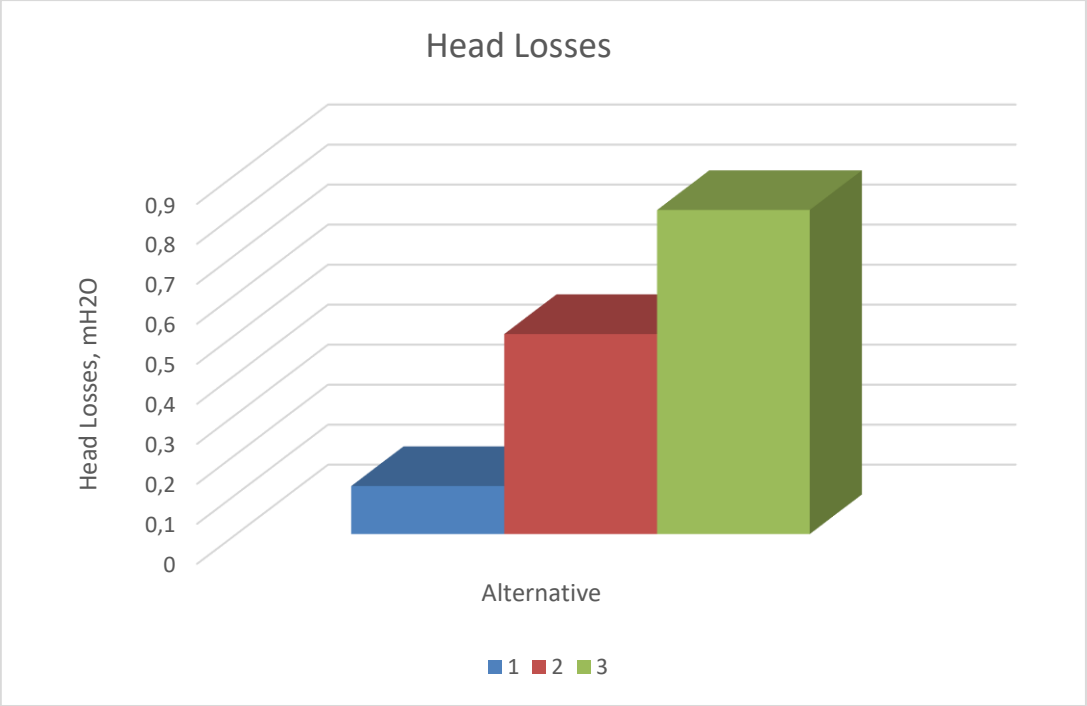


Fig. 2. Comparative Diagram of Hydraulic Losses

Comparison of Gas Consumption

The hourly gas consumption of the boiler house is determined using the following equation, m³:

$$B = \frac{Q_o \cdot 10^6}{Q_{LHV} \cdot \eta}. \quad (7)$$

The gas consumption during the heating period is determined using the following equation, m³:

$$B_p = \frac{Q_o \cdot 10^6}{Q_{LHV} \cdot \eta} \cdot \frac{(t_i - t_{avg})}{(t_i - t_o)} \cdot T, \quad (8)$$

where Q_{LHV} – lower heating value of fuel, assumed as 8,000 kcal/m³;

η – boiler efficiency;

t_i – indoor air temperature, assumed as 20 °C;

t_{out} – average outdoor air temperature, assumed as −1 °C [18];

t_o – design outdoor air temperature for heating, assumed as −23 °C [18];

T – duration of the heating period, 179 days [18].

The calculation of boiler house gas consumption is presented in Table 4. The calculation of gas consumption required to compensate for heat losses in the heating network for Alternatives 1, 2, and 3 is presented in Table 5.

Comparative diagrams of boiler house gas consumption, gas consumption required to compensate for heat losses in the heating network, and total gas consumption for Alternatives 1, 2, and 3 are presented in Fig. 3-5, respectively.

Table 4

Gas Consumption of the Boiler House Before and After Modernization

Alternative	Gas Consumption, m³	
	Maximum Hourly	During the Heating Period
1	36,7	76 928,37
2	28,15	59 054,53
3	28,15	59 054,53

Table 5

Gas consumption for compensating heat losses in the heating network

Alternative	Gas Consumption, m³	
	Maximum Hourly	Maximum Hourly
1	0,8	1 671,4
2	0,3	589,2
3	0,2	488,3

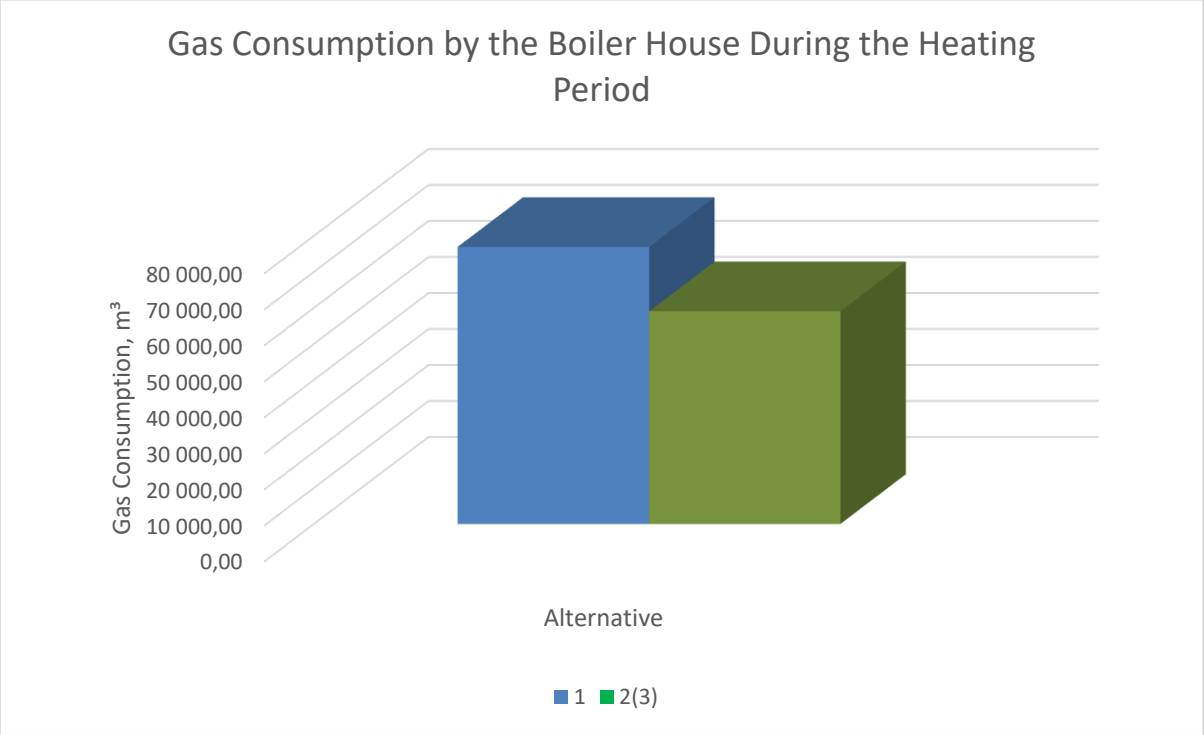


Fig. 3. Comparative Diagram of Boiler House Gas Consumption Before and After Modernization During the Heating Period

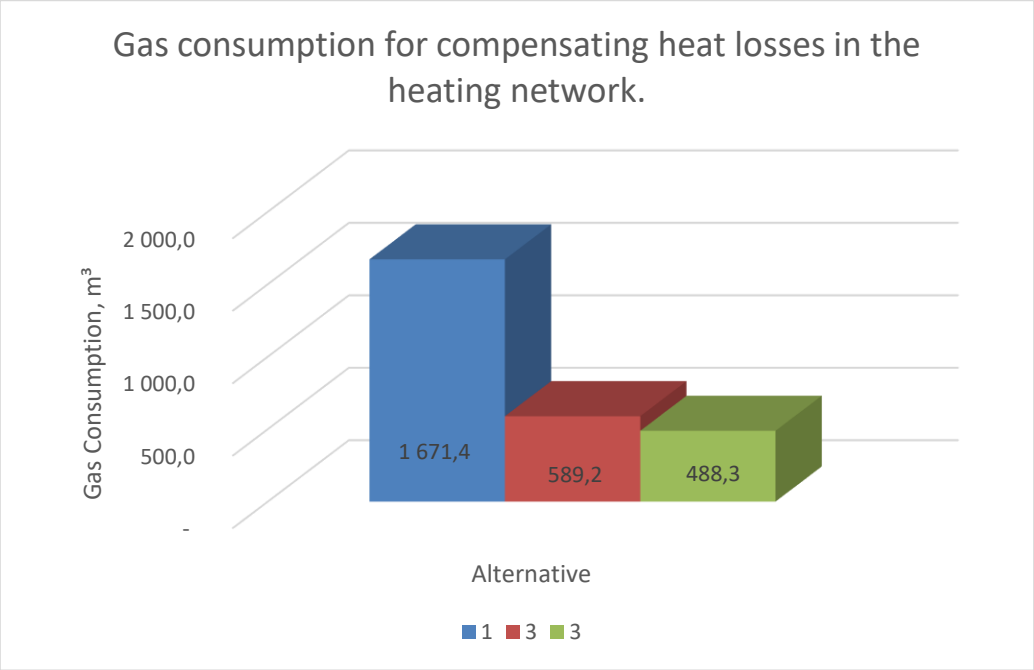


Fig. 4. Comparative diagram of gas consumption for compensating heat losses in the heating network during the heating period

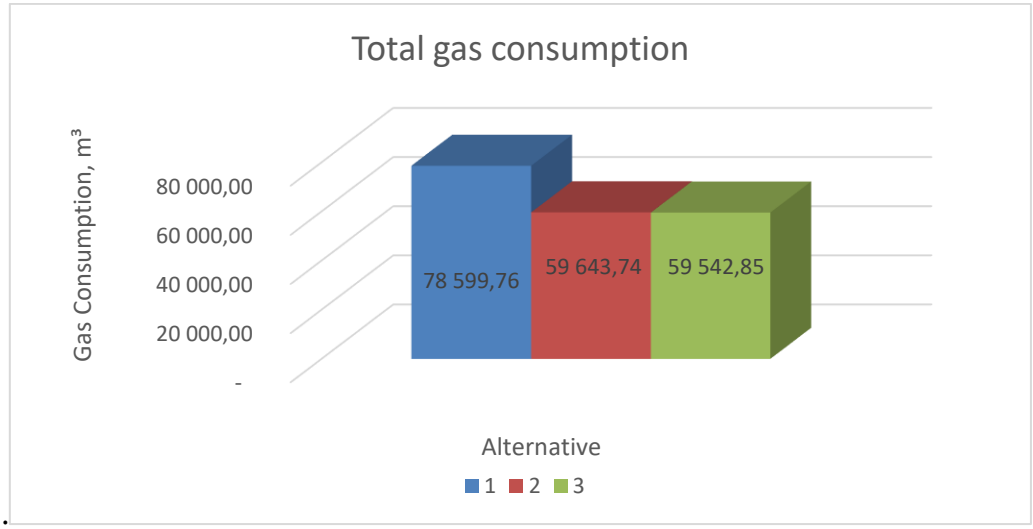


Fig. 5. Comparative diagram of total gas consumption during the heating period

Analysis of operating costs during the heating period in monetary terms

The main operating costs include the cost of natural gas and electricity. The cost of natural gas consists of the gas price and gas distribution service charges. For the calculations, the natural gas price was assumed to be UAH 25,84 per 1 m³ according to the data provided in [20, 21].

The cost of electricity consists of the market electricity price, transmission tariff, and distribution tariff. For the calculations, the electricity price was assumed to be UAH 8,13 per 1 kWh according to the data provided in [22].

The amount of natural gas consumed during the heating period for the three options was determined previously and is as follows:

- Alternative 1 — 78 599,76 m³;
- Alternative 2 — 59 643,74 m³;
- Alternative 3 — 59 542,85 m³.

Electricity is consumed during the operation of the network pumps. The electricity consumption for pump operation is further determined for the three options. The network pumps are intended to overcome hydraulic losses, which include losses in the internal building heating system, hydraulic losses in the heating network, and losses in the boiler house. The sum of the internal building losses and the pressure losses in the boiler house is 5 m H_2O.

The pressure losses in the heating network are:

- Alternative 1 — 0,12 m H_2O;
- Alternative 2 — 0,5 m H_2O;
- Alternative 3 — 0,81 m H_2O.

In Alternative 1, a Wilo TOP-S 40/7 pump is installed. The electric motor power at the operating point, with a heat carrier flow rate of 9,14 m³/h and the required head of 5.12 m H_2O, is 0,34 kW.

In Alternative 2 and 3, an energy-efficient Wilo Stratos MAXO 50/0,5-9 pump with a frequency converter is installed. In Options 2 and 3, the heat carrier flow rate is 15,05 m³/h, while the total pressure losses are:

- Alternative 2 — 5,5 м вод. ст.;
- Alternative 3 — 5,81 м вод. ст.

The electric motor power at the operating point is 0,33 kW for Alternative 2 and 0,35 kW for Alternative 3. A comparative diagram of power consumption during the heating period is presented in Fig. 6.

The performance curve and technical characteristics of the Wilo TOP-S 40/7 pump for Alternative 1 are shown in Fig. 7. The performance curves and technical characteristics of the Wilo Stratos MAXO 50/0,5-9 pumps for Alternative 2 and 3 are shown in Figs. 8 and 9, respectively.

Fig. 10 presents a comparative diagram of operating costs in monetary terms during the heating period for the three options, taking into account the cost and distribution of natural gas, as well as the cost, transmission, and distribution of electrical energy.

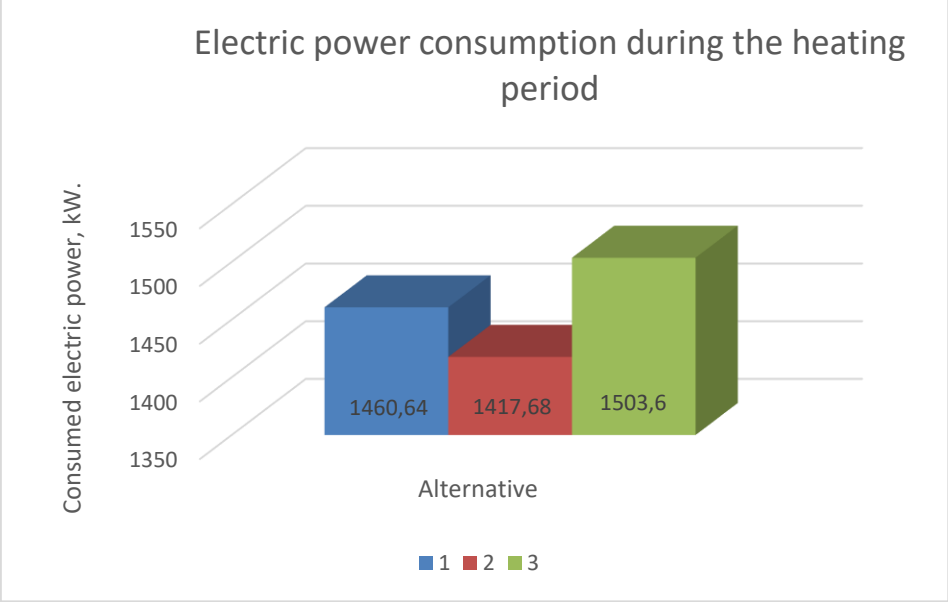
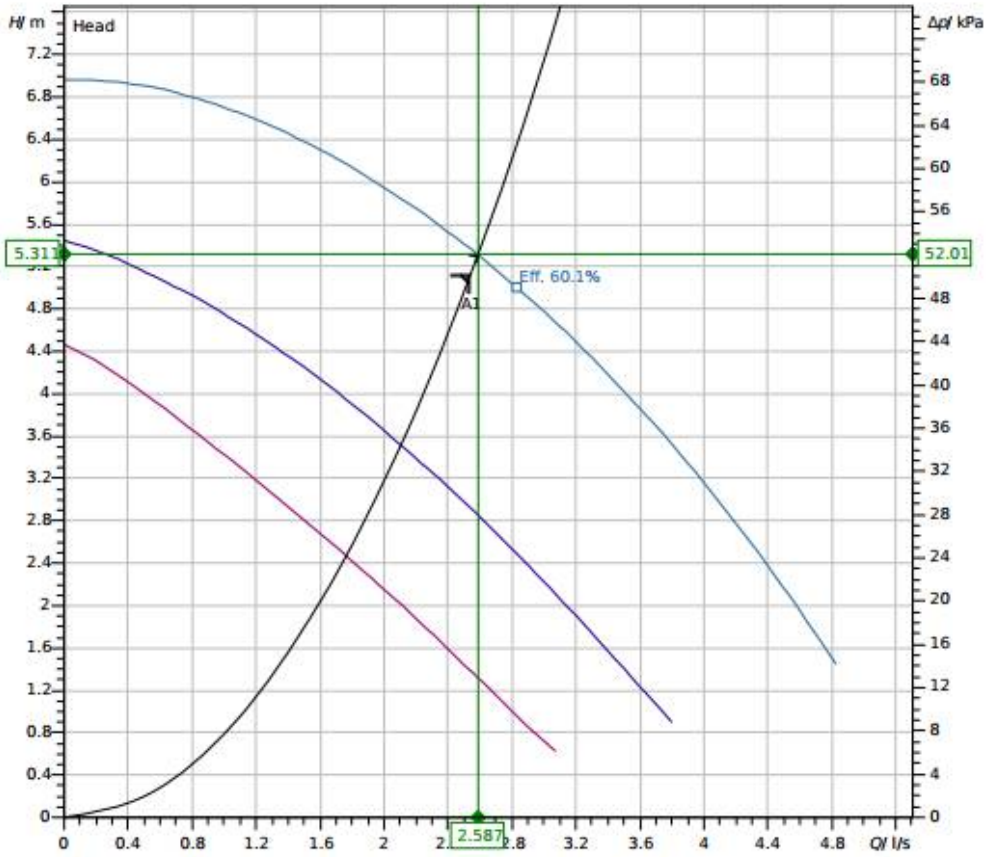


Fig. 6. Comparative diagram of electric power consumption during the heating period

TOP-S 40/7 (3~400/230 V, PN 6/10)

wilo

Pump curves



Fluid media	Water 100 %
Fluid temperature	20.00 °C
Requested flow	2.54 l/s
Delivery head (pressure unit)	5.12 m (50.14 kPa)
Delivered volume flow	2.59 l/s
Delivery head (pressure unit) at the duty point	5.31 m (52.01 kPa)
speed at duty point	2,600 1/min
Total electrical power consumption at the duty point	0.34 kW
Total shaft power at the duty point	0.23 kW
Hydraulic efficiency at duty point	59.77 %
Overall efficiency at the duty point	39.41 %

Fig. 7. Operating point and technical characteristics of the Wilo TOP-S 40/7 pump, Alternative 1 [14]

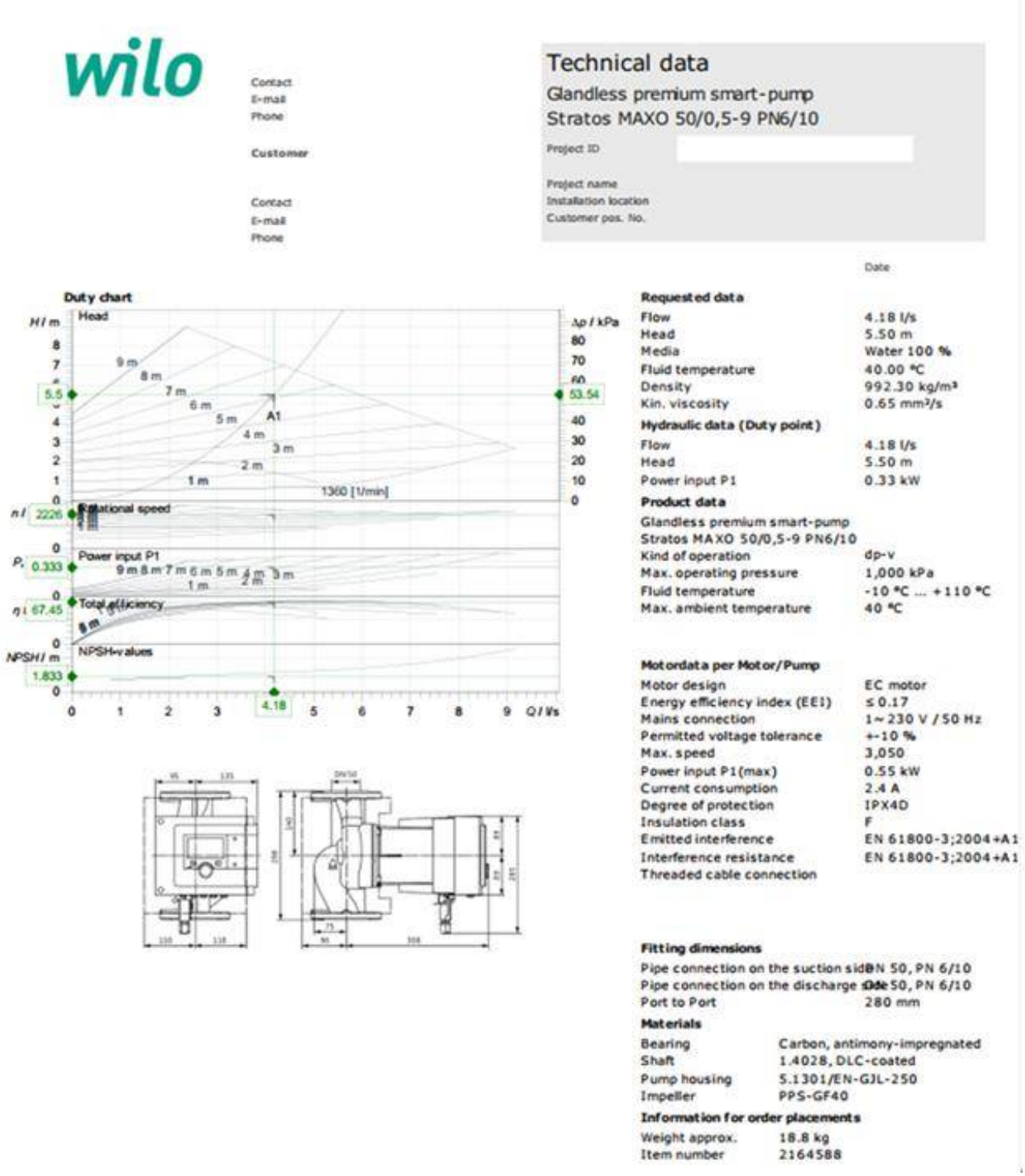


Fig. 8. Operating point and technical characteristics of the Wilo Stratos MAXO 50/0,5-9 pump, Alternative 2 [14]

As shown in Fig. 10, the existing school heat supply system is the least economically efficient option, while the most efficient is Alternative 3, which involves modernization of the boiler house and replacement of the old heating network with a new factory-manufactured pre-insulated non-metallic pipeline system.

During the heating period, the cost savings achieved in Alternative 3 compared to Alternative 1 amount to UAH 492 081,4 or 24,1 %.

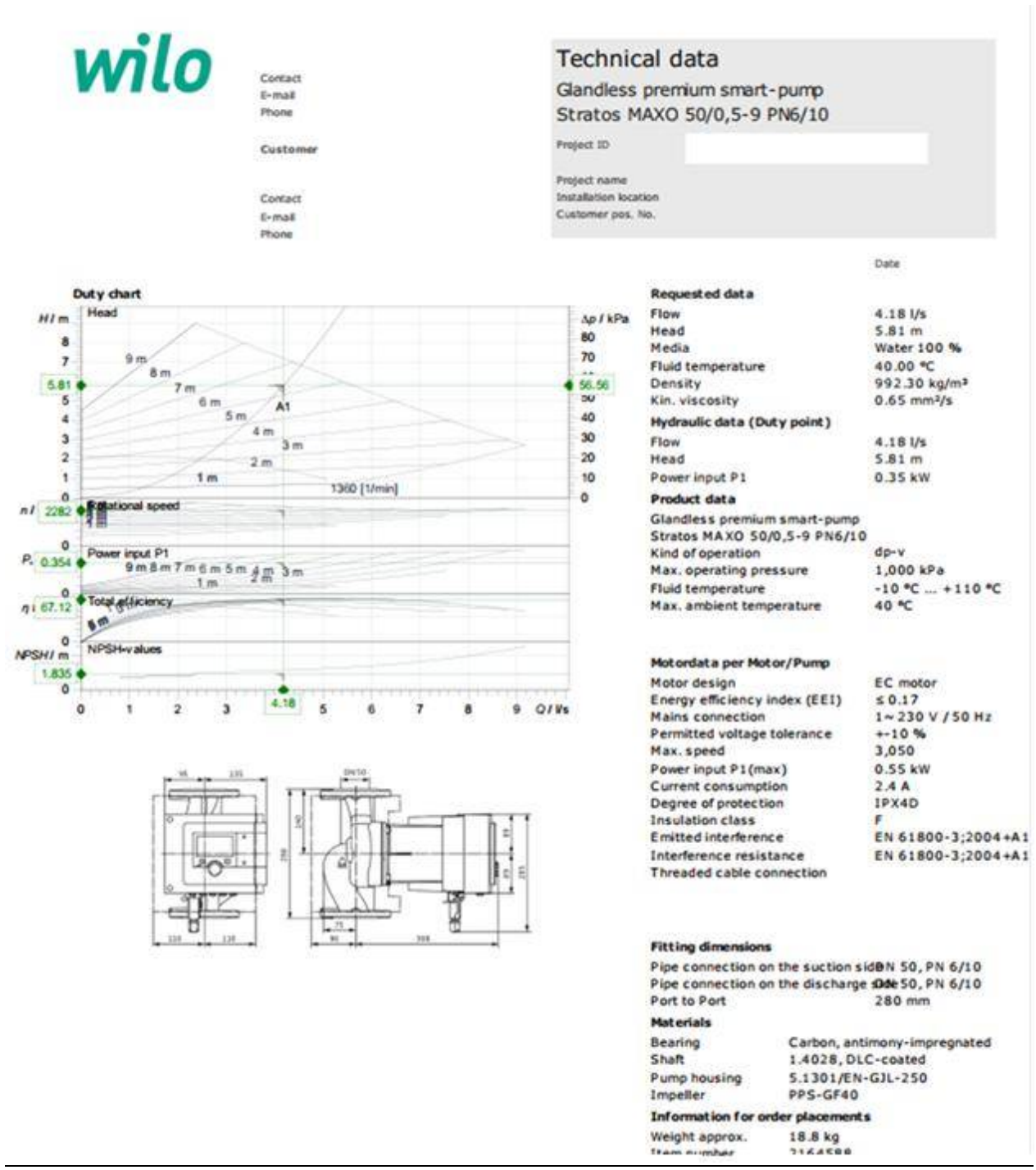


Fig. 9. Operating point and technical characteristics of the Wilo Stratos MAXO 50/0,5-9 pump, Alternative 3 [14]

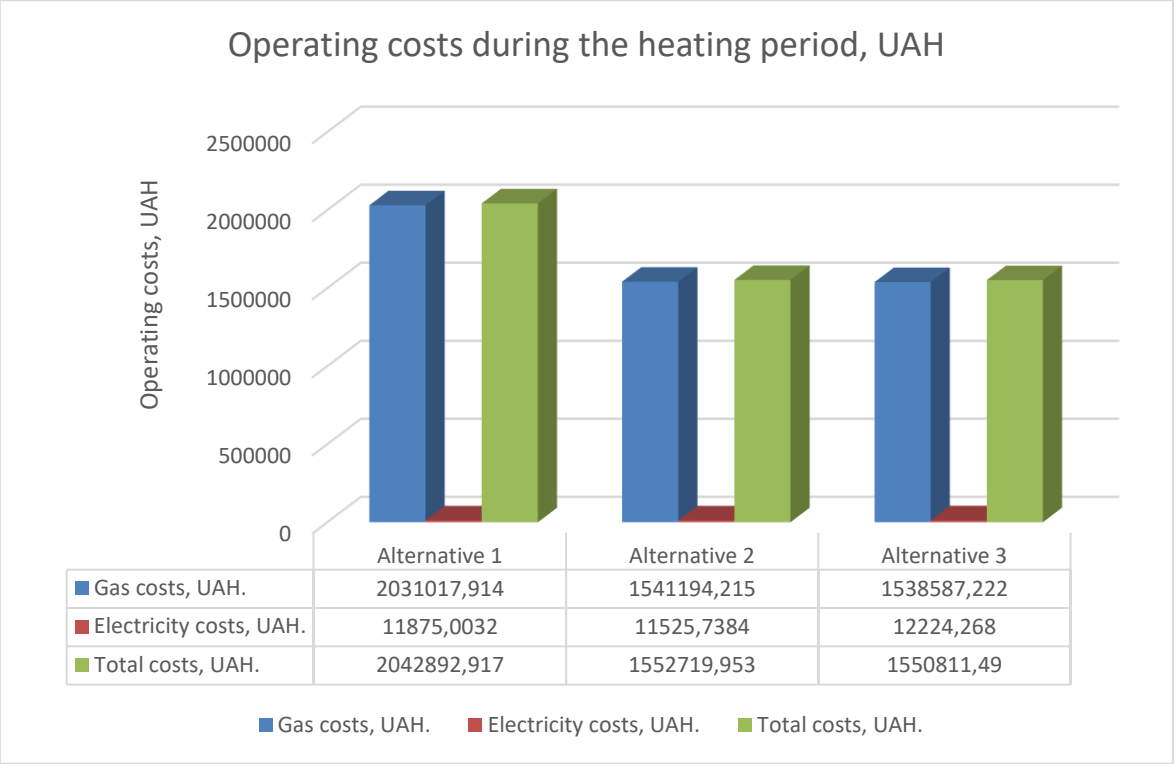


Fig. 10. Comparative diagram of operating costs in monetary terms during the heating period

Conclusions. A comparison of the options with temperature schedules of 95/70 °C and 55/40 °C makes it possible to conclude that the heat losses through the pipelines decreased by 64,75 % when comparing Options 1 and 2, and by 70,8 % when comparing Alternative 1 and 3.

However, it should be taken into account that Alternative 1 represents the existing heating network with oversized pipeline diameters and deteriorated thermal insulation (mineral wool slabs). Alternative 2 and 3 involve replacing the existing pipelines with new pre-insulated pipelines: steel pipelines in Alternative 2 and non-metallic pipelines in Alternative 3.

When comparing heat losses between Alternative 2 and 3, Alternative 3 is 17 % more efficient.

When the temperature difference is reduced, the heat carrier flow rate must be increased to ensure the design heat load. In comparing Alternative 1 with Alternative 2 and 3, the heat carrier flow rate increased by a factor of 1,646. However, due to the modernization of the boiler house equipment (replacement of the existing network pumps with energy-efficient pumps equipped with frequency converters), the increase in electric power consumption between Alternative 1 and 3 was insignificant, while in Alternative 2 it actually decreased.

In comparison with Alternative 1, electric power consumption during the heating period in Alternative 3 increased by only 2,9 %.

From a hydraulic point of view, Alternative 2 is the most efficient. However, it should be considered that Alternative 2 uses steel pipelines which, compared to non-metallic pipelines, are subject to internal corrosion and deposition buildup over time. This results in an increase in the roughness coefficient of the inner pipe wall surface and, consequently, an increase in hydraulic losses. Therefore, after a certain period of operation, the hydraulic losses in Alternative 2 will become higher than those in Alternative 3.

The replacement of old boilers with low efficiency by new condensing boilers made it possible to achieve energy savings of 23,2 %.

Alternative 3 is the most optimal solution, providing total savings of 24,1 % during the heating period compared to the existing system.

To enable a reduction in hydraulic losses in heating networks by decreasing the heat carrier flow rate, it is necessary to reduce the consumer heat load. This can be achieved through the thermal modernization of the building, which is capable of improving energy efficiency by up to 45 % and, consequently, reducing the heat load.

It should also be noted that a promising direction for the development of district heating systems in Ukraine is the implementation of fourth- and fifth-generation technologies, which operate on the basis of low-temperature heating regimes and require comprehensive optimization of the thermotechnical and hydraulic characteristics of the system.

References

1. Danfoss. (n.d.). *Modern district heating enables transition to smart energy system in Ukraine*. Retrieved May 25, 2026. https://www.danfoss.com/uk-ua/about-danfoss/articles/dhs/modern-district-heating-enables-transition-to-smart-energy-system-in-ukraine/ [in Ukrainian].

2. DHRL – Real Efficiency Accelerator. (n.d.). *Energy savings*. Retrieved May 25, 2026, from https://dhrl.rea.org.ua/en/energy-savings.html

3. CORDIS – EU Research Results. (n.d.). *TEN-00035-94*. Retrieved May 25, 2026, from https://cordis.europa.eu/project/id/TEN-00035-94

4. Aiguasol. (n.d.). *Low temperature district heating and cooling networks: Key to energy efficiency in technological progress*. Retrieved May 25, 2026, from https://aiguasol.coop/low-temperature-district-heating-and-cooling-networks-key-to-energy-efficiency-in-technological-progress/

5. Design Tech Solutions Ltd. (n.d.). *Designing for low temperature networks*. Retrieved May 25, 2026, from https://www.design-tech-solutions.co.uk/designing-for-low-temperature-networks

6. HogforsGST. (n.d.). *Lower temperatures required for 4GDH: How do we get there?* Retrieved May 25, 2026, from https://hogforsgst.com/en/blog/lower-temperatures-required-for-4gdh-how-do-we-get-there/

7. Build Up. (n.d.). *5th generation district heating and cooling: New tool to help you initiate your projects*. Retrieved May 25, 2026, from https://build-up.ec.europa.eu/en/news-and-events/news/5th-generation-district-heating-and-cooling-new-tool-help-you-initiate-your

8. Verkhovna Rada of Ukraine. (2020). *Law of Ukraine No. 1144-IX on the principles of state regulatory policy in the sphere of economic activity*. Retrieved May 25, 2026, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z1144-20#Text [in Ukrainian].

9. Aleksakhin, O. O., Yena, S. V., & Hordiienko, O. P. (2017). Calculation of heat losses in supply pipelines of branched district heating networks. *Integrated Technologies and Energy Conservation*, (3), 51–56. https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/86de994b-f4eb-4c45-b44f-1e16aced1f0d/content [in Ukrainian].

10. Aleksakhin, O. O. (2014). Calculation of heat losses in district heating networks of residential areas. *Municipal Utilities of Cities*, (114), 82–84. [in Ukrainian].

11. Hanzha, A. M., Marchenko, N. A., & Pidkopai, V. M. (2013). Justification of reconstruction options for a residential district heating system using mathematical modelling of heat losses during heat carrier transportation. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, (13), 51–56. [in Ukrainian].

12. Gvozdeckyi, O., Milanko, O., Tkachenko, R., Yuzbashyan, A., & Romanenko, S. (2025). Operation of heat networks under conditions of reduced heating temperature schedule. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (211), 60–74. https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327173 [in English].

13. Viessmann. (n.d.). *Boiler equipment*. Retrieved May 25, 2026, from https://www.viessmann.ua/

14. Wilo. (n.d.). *Pump equipment*. Retrieved May 25, 2026, from https://wilo.com/ua/uk/

15. Energoresurs Invest. (n.d.). *Products for district heating and domestic hot water supply systems*. Retrieved May 25, 2026, from https://energoresurs.com/ [in Ukrainian].

16. Brugg Pipes. (n.d.). *Official website*. Retrieved May 25, 2026, from https://www.bruggpipes.com/

17. All-Ukrainian Construction Portal. (n.d.). *Products and services*. Retrieved May 25, 2026, from https://mybud.com.ua/tovary-poslugy/0/0/25 [in Ukrainian].

18. State Enterprise Research Institute of Building Constructions. (2010). *DSTU-N B V.1.1-27:2010. Protection against hazardous geological processes, harmful operational impacts and fire. Building climatology*. [in Ukrainian].

19. Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. (2009). *DBN V.2.5-39:2008. Engineering equipment of buildings and structures. External networks and facilities. Heat networks*. [in Ukrainian].

20. Naftogaz of Ukraine. (n.d.). *Gas supply company*. Retrieved May 25, 2026, from https://gas.ua/ [in Ukrainian].

21. Kharkivgaz. (n.d.). *Official website*. Retrieved May 25, 2026, from https://khgas.naftogaz.com/ [in Ukrainian].

22. National Energy and Utilities Regulatory Commission of Ukraine. (n.d.). *Official website*. Retrieved May 25, 2026, from https://www.nerc.gov.ua/ [in Ukrainian].

23. Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2021). *DBN V.2.6-31:2021. Thermal insulation and energy efficiency of buildings*. [in Ukrainian].

24. Technical Committee for Standardization TC 302 «Energy Efficiency of Buildings and Structures». (2022). *DSTU 9191:2022. Thermal insulation of buildings. Method for selecting thermal insulation materials for building insulation*. [in Ukrainian].

25. Verkhovna Rada of Ukraine. (2021). *Law of Ukraine on energy efficiency*. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, (2), Article 8. [in Ukrainian].

26. Verkhovna Rada of Ukraine. (2017). *Law of Ukraine on the energy performance of buildings*. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, (33), Article 359. [in Ukrainian].

27. State Enterprise «Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality». (2020). *DSTU 8943:2019. Electric welded steel pipes. Specifications*. [in Ukrainian].

28. State Enterprise «TsentrSEPROteplomerezha». (2007). *DSTU B V.2.5-31:2007. Pre-insulated polyurethane foam pipes for hot water supply and district heating networks. Pipes, fittings and valves. Specifications*. [in Ukrainian].

Список використаних джерел

1. Danfoss. (n.d.). *Сучасне теплопостачання дає змогу перейти до інтелектуальної енергетичної системи в Україні*. https://www.danfoss.com/uk-ua/about-danfoss/articles/dhs/modern-district-heating-enables-transition-to-smart-energy-system-in-ukraine/ (дата звернення: 25.05.2026).

2. DHRL – Real Efficiency Accelerator. (n.d.). *Energy savings*. Retrieved May 25, 2026, from https://dhrl.rea.org.ua/en/energy-savings.html

3. CORDIS – EU Research Results. (n.d.). *TEN-00035-94*. Retrieved May 25, 2026, from https://cordis.europa.eu/project/id/TEN-00035-94

4. Aiguasol. (n.d.). *Low temperature district heating and cooling networks: Key to energy efficiency in technological progress*. Retrieved May 25, 2026, from https://aiguasol.coop/low-temperature-district-heating-and-cooling-networks-key-to-energy-efficiency-in-technological-progress/

5. Design Tech Solutions Ltd. (n.d.). *Designing for low temperature networks*. Retrieved May 25, 2026, from https://www.design-tech-solutions.co.uk/designing-for-low-temperature-networks

6. HogforsGST. (n.d.). *Lower temperatures required for 4GDH: How do we get there?* Retrieved May 25, 2026, from https://hogforsgst.com/en/blog/lower-temperatures-required-for-4gdh-how-do-we-get-there/

7. Build Up. (n.d.). *5th generation district heating and cooling: New tool to help you initiate your projects*. Retrieved May 25, 2026, from https://build-up.ec.europa.eu/en/news-and-events/news/5th-generation-district-heating-and-cooling-new-tool-help-you-initiate-your

8. Верховна Рада України. (2020). *Про засади здійснення державної регуляторної політики у сфері господарської діяльності: Закон України № 1144-IX від 01.10.2020 р.* https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z1144-20#Text (дата звернення: 25.05.2026).

9. Алексахін, О. О., Єна, С. В., & Гордієнко, О. П. (2017). Розрахунок теплових втрат подавальними трубопроводами розгалужених теплових мереж. *Інтегровані технології та енергозбереження, 3*, 51–56. https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/86de994b-f4eb-4c45-b44f-1e16aced1f0d/content

10. Алексахін, О. О. (2014). Обчислення втрат теплоти у мікрорайонних теплових мережах. *Комунальне господарство міст, 114*, 82–84.

11. Ганжа, А. М., Марченко, Н. А., & Підкопай, В. М. (2013). Обґрунтування варіантів реконструкції системи теплопостачання житлового масиву з використанням математичного моделювання теплових втрат при транспортуванні теплоносія. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, 13* (987), 51–56.

12. Gvozdeckyi, O., Milanko, O., Tkachenko, R., Yuzbashyan, A., & Romanenko, S. (2025). Operation of heat networks under conditions of reduced heating temperature schedule. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп., 211*, 60–74. https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327173

13. Viessmann. (n.d.). *Котельне обладнання*. Retrieved May 25, 2026, from https://www.viessmann.ua/

14. Wilo. (n.d.). *Насосне обладнання*. https://wilo.com/ua/uk/ (дата звернення: 25.05.2026).

15. Енергоресурс Інвест. (n.d.). *Вироби для теплопостачання та гарячого водопостачання*. (дата звернення: 25.05.2026). https://energoresurs.com/

16. Brugg Pipes. (n.d.). *Official website*. Retrieved May 25, 2026, from https://www.bruggpipes.com/

17. Всеукраїнський будівельний портал. (n.d.). *Товари та послуги*. https://mybud.com.ua/tovary-poslugy/0/0/25 (дата звернення: 25.05.2026).

18. ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». (2010). *ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія*. Київ.

19. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. (2009). *ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі*. Київ.

20. Нафтогаз України. (n.d.). *Газопостачальна компанія*. Retrieved May 25, 2026, from https://gas.ua/

21. АТ «Харківгаз». (n.d.). *Офіційний сайт*. https://khgas.naftogaz.com/ (дата звернення: 25.05.2026).

22. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. (n.d.). *Офіційний сайт*. https://www.nerc.gov.ua/ (дата звернення: 25.05.2026).

23. Міністерство розвитку громад та територій України. (2021). *ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель*. Київ.

24. Технічний комітет стандартизації ТК 302 «Енергоефективність будівель і споруд». (2022). *ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель*. Київ.

25. Верховна Рада України. (2021). *Про енергетичну ефективність: Закон України від 21 жовтня 2021 р. Відомості Верховної Ради України, 2*, ст. 8.

26. Верховна Рада України. (2017). *Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22 червня 2017 р. Відомості Верховної Ради України, 33*, ст. 359.

27. ДП «УкрНДНЦ». (2020). *ДСТУ 8943:2019. Труби сталеві електрозварні. Технічні умови*. Київ.

28. ДП «ЦентрСЕПРОтепломережа». (2007). *ДСТУ Б В.2.5-31:2007. Труби попередньо теплоізольовані спіненим поліуретаном для мереж гарячого водопостачання та теплових мереж. Труби, фасонні вироби та арматура. Технічні умови*. Київ.

Гвоздецький Олександр Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-0851-8851. E-mail: npp-tghv@ukr.net.
Павловський Сергій Валерійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-9891-2133. E-mail: Serhii.Pavlovskyi@kname.edu.ua.
Тютюник Лариса Іванівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри енергетичне машинобудування імені Г. Ф. Проскури, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».
ORCID iD: https://orcid.org/ 0000-0002-3128-497X. E-mail: lara.tyutyunik@gmail.com
Панчук Олексій Вікторович, старший викладач кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-0852-1543. Тел.: +38(066)415-69-59. E-mail: panchuk.o@kart.edu.ua.
Авакян Карина Олександрівна, магістранка з цивільної інженерії, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0003-9108-8422
E-mail: Karyna.Avakian@kname.edu.ua.
Gvozdeckyi Oleksandr, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-0851-8851. Tel.: +38(050)88-624-88. E-mail:npp-tghv@ukr.net.
Pavlovskyi Serhii, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-9891-2133. E-mail: Serhii.Pavlovskyi@kname.edu.ua.
Larysa Tiutiunyk, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Power Machinery Engineering named after G. F. Proskura, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: https://orcid.org/ 0000-0002-3128-497X. E-mail: lara.tyutyunik@gmail.com.
Panchuk Oleksii, Senior Lecturer of the of Department Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-0852-1543. Tel.: +38(066)415-69-59. E-mail: panchuk.o@kart.edu.ua.
Avakian Karyna, Master's student in Civil Engineering O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0003-9108-8422.E-mail: Karyna.Avakian@kname.edu.ua

Дата надходження статті: 03.07.2026 р. Дата прийняття статті до друку: 14.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 624.012.45:620.193

БІОГЕННА СІРЧАНОКИСЛОТНА КОРОЗІЯ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ МЕРЕЖ: АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

Аспіранти М. С. Гудименко, Юй Вей, д-р техн. наук О. С. Борзяк

BIOGENIC SULFURIC ACID CORROSION OF CONCRETE STRUCTURES IN SEWER NETWORKS: A COMPREHENSIVE DIAGNOSTIC ALGORITHM FOR TECHNICAL CONDITION ASSESSMENT

**Postgraduate student M. Hudymenko, postgraduate student Yu Wei,
Dr. Sc. (Tech.) O. Borziak**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.373391

Анотація. *Розглянуто проблему біогенної сірчанокислотної корозії бетонних конструкцій каналізаційних мереж, яка є однією з основних причин передчасного руйнування колекторів, камер та інших споруд систем водовідведення. Проаналізовано механізм розвитку корозійного процесу та визначено найбільш інформативні діагностичні показники для оцінювання ступеня деградації бетону. На основі аналізу літературних джерел і практичного досвіду розроблено алгоритм комплексної діагностики технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж. Алгоритм передбачає послідовне виконання візуального обстеження, неруйнівного контролю, відбору проб, фізико-хімічних і фізико-механічних досліджень із подальшим інтегральним оцінюванням отриманих результатів. Для перевірки працездатності запропонованого підходу виконано його апробацію на експлуатованій залізобетонній споруді каналізаційної мережі з ознаками біогенної корозії. Встановлено, що для досліджуваної конструкції найбільш інформативними показниками стали результати визначення pH і мікроструктурного аналізу. Показано, що застосування повного комплексу діагностичних процедур дає змогу адаптувати алгоритм для споруд із різним ступенем деградації та формувати обґрунтовані рекомендації щодо їхньої подальшої експлуатації, ремонту або заміни.*

Ключові слова: *біогенна корозія, сірчанокислотна корозія, каналізаційні мережі, бетон, діагностика, технічний стан, pH.*

Abstract. *Biogenic sulfuric acid corrosion is one of the major causes of premature deterioration of concrete and reinforced concrete structures in sewer networks. The paper analyzes the mechanisms of biogenic sulfuric acid corrosion and identifies the most informative diagnostic indicators for assessing the degradation degree of concrete structures exposed to this type of attack. Particular attention is paid to visual damage characteristics, surface strength indicators, moisture content, pH measurements, and microstructural and elemental analyses. It is shown that no single parameter can provide a reliable assessment of the technical condition of a structure affected by biogenic corrosion. Therefore, a comprehensive approach combining several complementary diagnostic methods is required.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Гудименко М. С., Юй Вей, Борзяк О. С., 2026.

Based on an analysis of the corrosion mechanisms and a review of current diagnostic approaches, a comprehensive algorithm for technical condition assessment of concrete structures in sewer networks is proposed. The algorithm integrates field inspections, non-destructive testing methods, sampling procedures, laboratory physicochemical investigations, and physical-mechanical evaluations. A key feature of the algorithm is its flexibility, allowing the selection of the most informative diagnostic parameters depending on the specific condition of the investigated structure.

The applicability of the proposed algorithm was verified through a case study involving an operating reinforced concrete sewer structure exhibiting typical signs of biogenic sulfuric acid corrosion. The obtained results demonstrated that pH measurements and microstructural investigations provided the most representative information for the examined structure. Low pH values in the surface layer indicated a complete loss of the protective alkaline properties of the cement matrix, while differences between surface and internal pH values made it possible to estimate the depth of corrosion propagation. Scanning electron microscopy combined with energy-dispersive spectroscopy confirmed the presence of corrosion products and substantial degradation of the cementitious matrix.

The study demonstrates that the proposed diagnostic algorithm can be effectively applied to concrete sewer structures at different stages of deterioration. The results may be used to support maintenance planning, rehabilitation strategies, and decision-making concerning continued operation, repair, strengthening, or replacement of damaged structures.

Keywords: *biogenic corrosion, sulfuric acid corrosion, sewer networks, concrete, diagnostics, technical condition, pH.*

Вступ. Підземні каналізаційні мережі належать до інженерних об’єктів, технічний стан яких роками залишається без спостереження, а перші ознаки руйнування виявляють здебільшого вже, коли пошкодження набули непоправного характеру. Бетонні та залізобетонні колектори, оглядові та перепадні камери, вузли з’єднання потоків працюють у середовищі, яке поєднує одразу кілька агресивних чинників: безпосередній контакт зі стічними водами, постійну високу вологість, обмежений повітрообмін і, що найважливіше, насичений сірководнем простір каналізації. Саме така сукупність чинників створює передумови для розвитку руйнування, який у літературі називають мікробіологічно ініційованою, або біогенною, корозією бетону.

Особливість цього явища полягає в тому, що руйнування відбувається не через прямий хімічний контакт із речовиною зі стоків, а внаслідок життєдіяльності бактерій. Сірководень, що виділяється зі стоків за анаеробних умов, окиснюють сіркоокиснювальні мікроорганізми до сірчаної кислоти безпосередньо на стінах споруди. Речовина повільно розчиняє цементний камінь, перетворюючи матеріал стін на пухку масу, що складається переважно з гіпсу і вторинних продуктів. Конструкція, що розрахована на сторічну експлуатацію, може втратити несучу здатність уже через два-три десятиліття, а за умови інтенсивного навантаження це відбудеться швидше.

Втрата товщини стінок колектору призводить до просідання дорожнього покриття над трасою мережі, аварійних проривів і неконтрольованого витоку стічних вод у ґрунт. Вузли магістральних колекторів при цьому особливо вразливі в місцях, де сходяться потоки з різних ділянок, посилюється турбулентність. Зростає виділення сірководню, який призводить до руйнувань і виходу з ладу значної частини системи водовідведення. Вартість заміни таких споруд є високою, а виконання робіт ускладнено глибиною закладання та неможливістю тривалого припинення транспортування стоків.

Розв'язання проблеми посилено тим, що існуючі методи захисту не завжди дають очікуваний результат. Захисні покриття, полімерні оболонки здатні подовжити термін служби лише за умови їх застосування на ранній стадії, коли корозійний фронт ще не досяг арматури. На пізніх етапах, коли цементний камінь уже зруйновано до значної глибини, нанесення покриттів на ослаблену основу не відновлює несучої здатності, а лише маскує стан конструкції. Це означає, що основним завданням стає не стільки сам захист, скільки своєчасна і достовірна діагностика, яка здатна визначити глибину ураження споруди до того, як руйнування стане катастрофічним.

Попри тривалу історію вивчення біогенної корозії, у практиці бракує усталеної методики, яка б поєднувала польове оцінювання міцності з лабораторним аналізом хімічного та мінерального складу зруйнованого шару. Здебільшого технічний стан камер і колекторів оцінюють візуально або за окремими показниками, що не дає змогу однозначно встановити причину і глибину деградації. Саме тому актуальним є розроблення методичного підходу, який поєднує польові та лабораторні методи досліджень для обґрунтованого оцінювання технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біогенне руйнування бетонних каналізаційних споруд відоме давно, але за останнє десятиліття його дослідження значно поглиблені завдяки сучасним фізико-хімічним методам аналізу. Зокрема, сучасні методи дали змогу детальніше вивчити біорізноманіття корозійних угруповань. Дослідження Х. Лі зі співавторами [1] допомогло розширити класичне уявлення про роль сіркоокиснювальних бактерій і пояснило, чому інтенсивність руйнування різко зростає лише після проходження певного порога лужності. Процес руйнування залежить від розвитку та поступової зміни колонії ацидофільних мікроорганізмів у корозійному середовищі колектора, супроводжених переходом домінування до гіперацидофільних видів роду Acidithiobacillus, здатних існувати за вкрай низьких значень pH.

У роботах [1-3], присвячених механізмам і явищам біологічної корозії бетону в каналізаційних спорудах, процес руйнування описано як послідовність кількох фаз. За даними М. Ву зі співавторами [2], спочатку відбувається абіотична карбонізація, яка знижує початковий водневий показник поверхні приблизно з 13 до 9. Потім поверхню заселяють нейтрофільні сіркоокиснювальні мікроорганізми, що знижують реакцію середовища до 4–5. Після цього домінування переходить до ацидофільних видів, відповідальних за найінтенсивнішу фазу деградації. Така модель важлива тим, що пояснює тривалий «латентний» період відносної стійкості свіжого бетону і подальший лавиноподібний характер руйнування.

В огляді С. Праманіка зі співавторами [3] систематизовано механізми та чинники впливу, зокрема розглянуто концентрацію сірководню в надводному просторі, температуру, вологість, склад цементу і водоцементне відношення. Автори зазначають, що, попри тривалу історію вивчення, предмет залишається дискусійним. Кількісне прогнозування швидкості руйнування досі не має надійної основи. У роботі також приділено увагу різниці між лабораторними та польовими даними, зазначено, що прискорені тести часто завищують швидкість деградації, тоді як у реальних колекторах процес іде нерівномірно та безпосередньо залежить від наявних умов. Цю розбіжність підтверджує лабораторний метод дослідження біодеградації бетону, у якому показано, що результати прискорених випробувань у розчинах сірчаної кислоти лише умовно відтворюють натурну картину та не завжди

корелюють з результатами, що спостерігають у реальних спорудах.

Окрему лінію досліджень становлять роботи, присвячені кількісному оцінюванню швидкості руйнування та ролі складу бетону. Дослідження фазових перетворень різних в'яжучих в умовах прискореного сірчанокислотного впливу із застосуванням комплексу методів мікроструктурного аналізу (СЕМ, рентгенофазовий аналіз) показало, що ступінь деградації визначений насамперед вмістом кальцієвих гідратних фаз. Характерними індикаторами біокорозії є гіпс і етрингіт, утворення яких супроводжено збільшенням об'єму, що призводить до внутрішніх напружень. У матеріалах із високим вмістом портландиту і гідросилікатів кальцію спостерігають більшу інтенсивність утворення гіпсу і втрати маси, тоді як геополімерні композити мають суттєво вищу стійкість [4].

Польове обстеження каналізаційного колектора [5] показало, що над рівнем води pH порового розчину знижується до критично низьких значень, а в зоні змінного зволоження швидкість руйнування в кілька разів вища, ніж у склепінні. У глибших шарах разом із гіпсом і етрингітом виявлено карбонат кальцію, що вказує на супутню карбонізацію. Показово, що навіть за відсутності видимих ознак руйнування фізико-хімічні методи аналізу фіксують мінералогічні перетворення в цементному камені. Зокрема, виявлено утворення гіпсу, етрингіту і елементарної сірки. Ці зміни відбуваються вже на ранніх стадіях впливу сірководню навіть за його низьких концентрацій [6]. Це означає, що видимий стан поверхні може суттєво відставати від фактичного ступеня внутрішньої деградації, а отже, надійна діагностика неможлива без інструментального аналізу складу матеріалу.

Сучасні дослідження методів пом'якшення біокорозії містять суперечливі результати. Традиційні підходи ґрунтовані на застосуванні бактерицидів і поверхневих покриттів, але мають обмежену довговічність і певні екологічні ризики. Для пригнічення мікробної активності в бетонну суміш вводять нітрит кальцію, який за низького pH перетворюється на азотисту кислоту з антимікробною дією. Це забезпечує в польових умовах реального колектора зменшення втрати матеріалу приблизно на третину порівняно з контрольними зразками [7]. Ще один метод захисту – мінеральні захисні покриття. Дослідження покриття на основі гідроксиду магнію в умовах прискореного кислотного впливу показали його здатність нейтралізувати кислоту, що уповільнює руйнування основи [8]. Більшість таких рішень орієнтована на захист нових конструкцій або на ранні стадії ураження. Досліджень, присвячених відновленню споруд, що зазнали впливу біокорозії, у літературі значно менше.

Як показують дослідження, мікробіологічна корозія є складним і просторово неоднорідним процесом. Найчастіше методика діагностики технічного стану споруд, що зазнають впливу такого виду корозії, є неузгодженою та не завжди ефективною. Достовірний висновок про стан конструкції можна зробити лише на основі комплексу показників. До них належать візуальний огляд, вимірювання поверхневого pH, оцінювання втрати маси та міцності, а також аналіз глибини нейтралізації [9]. Жоден окремо взятий параметр не є самодостатнім, і саме комплексний підхід дає змогу відрізнити поверхневе ураження від глибокої структурної деградації. Отже, розроблення алгоритму комплексної діагностики технічного стану експлуатованих споруд є актуальною темою.

Мета та завдання дослідження

Мета дослідження – розроблення алгоритму комплексної діагностики технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж, уражених біогенною сірчанокислотною корозією, на основі поєднання польових неруйнівних і лабораторних фізико-хімічних методів досліджень.

Завдання дослідження – аналіз особливостей розвитку біогенної сірчанокислотної корозії бетонних конструкцій каналізаційних мереж; визначення діагностичних показників, найбільш інформативних для оцінювання ступеня деградації бетону в умовах біогенної корозії; розроблення алгоритму комплексного обстеження, який поєднує неруйнівні та лабораторні методи досліджень; апробація запропонованого алгоритму на прикладі експлуатованої каналізаційної споруди з ознаками біогенного корозійного ураження; розроблення рекомендацій щодо практичного застосування алгоритму під час обстеження каналізаційних споруд.

Основна частина дослідження. Основною причиною корозійного руйнування каналізаційних споруд є біокорозія, в основі якої лежить окиснення сполук сірки до сірчаної кислоти тіоновими (сірковими) бактеріями [11, 12]. Механізм цього процесу можна простежити покроково [3]. Непошкоджений бетон має сильно лужне середовище (pH > 12), несприятливе для розвитку корозієтвірних бактерій. Проте внаслідок карбонізації лужність поступово знижується до pH < 9, і за таких умов поверхню послідовно заселяють бактерії видів Thiobacillus novellus, Thiobacillus neapolitanus і Thiobacillus thioparus, життєдіяльність яких знижує реакцію середовища до pH < 5.

Сірковмісні сполуки в системі представлені насамперед леткими формами - сірководнем H_2S та органічними полісульфідами. Вони утворюються в анаеробних зонах сульфатвідновлювальними бактеріями родів Desulfotomaculum і Desulfovibrio із сульфатів, наявних у стоках. Виділяючись в атмосферу колектора, ці сполуки осідають на вологих бетонних поверхнях вище рівня води, де аеробні тіобактерії біохімічно окиснюють їх до сірчаної кислоти:

$$H_2S + 2O_2 \rightarrow H_2SO_4 ,$$

а також через проміжну стадію елементарної сірки за узагальненою реакцією

$$2S + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4 .$$

Утворена біогенна сірчана кислота реагує з компонентами цементного каменю, спричиняючи його руйнування з утворенням гіпсу і етрингіту, наприклад

$$CaCO_3 + H_2SO_4 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + CO_2 \uparrow .$$

Кінцевим механізмом руйнування є кислотна та сольова корозія сульфатного типу, а характерними її продуктами - гіпс і етрингіт, утворення яких супроводжує значне збільшення об'єму та виникнення внутрішніх напружень у структурі матеріалу. Узагальнену послідовність перетворень, що зумовлюють руйнування, наведено на рис. 1.

Отже, біогенна сірчанокислотна корозія є багатостадійним процесом, що супроводжує зміна кислотності поверхні бетону, накопичення продуктів корозії, деструкція цементного каменю та поступове зниження міцності матеріалу. Вказані зміни можуть бути використані як діагностичні ознаки для оцінювання технічного стану каналізаційних споруд.

Аналіз механізму біогенної сірчанокислотної корозії показує, що процес деградації бетону супроводжує комплекс взаємопов'язаних фізичних, хімічних і структурних змін. Тому достовірне оцінювання технічного стану конструкцій не може бути ґрунтуване на одному показнику, а потребує комплексного використання декількох діагностичних параметрів [2, 3, 9].

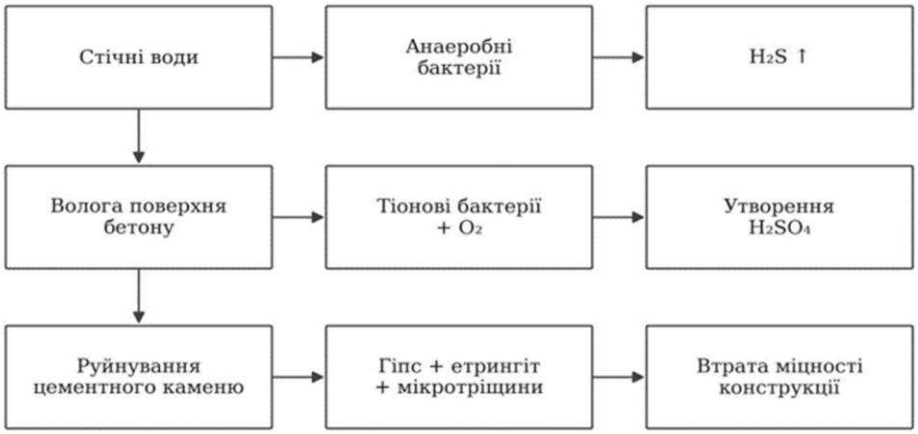


Рис. 1. Послідовність стадій біогенної сірчанокислотної корозії бетону каналізаційної споруди

На початковому етапі обстеження обов'язковою є візуальне оцінювання стану поверхні конструкції. Ознаками біогенної корозії є наявність пухких відкладень білого або сіруватого кольору, розм'якшення поверхневого шару бетону, локальні вибоїни, оголення арматури та наявність продуктів корозії металу. Візуальне обстеження допомагає встановити найбільш уражені ділянки та визначити місця відбору проб для подальших досліджень.

Одним із найбільш інформативних показників корозії є водневий показник pH. Для непошкодженого бетону характерні значення pH 12,5-13, тоді як розвиток сіркоокиснювальних бактерій супроводжує поступове зниження лужності [1, 2, 11, 12]. В умовах інтенсивної біокорозії поверхневі шари можуть мати значення pH менше 4, що свідчить про повну втрату захисних властивостей цементного каменю і активний перебіг корозійних процесів. Висока вологість створює сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів і перенесення агресивних речовин у поровому просторі бетону. Крім того, надмірна вологість часто супроводжує втрату щільності цементного каменю та підвищення його пористості внаслідок корозійної деградації [3, 9].

Для оцінювання залишкової несучої здатності конструкції доцільно використовувати показники міцності бетону, отримані неруйнівними методами контролю. При цьому результати неруйнівних випробувань потрібно розглядати спільно з даними фізико-хімічних досліджень, оскільки локальні поверхневі пошкодження можуть впливати на точність вимірювань [9]. Окрему групу інформативних показників становлять фізико-механічні характеристики бетону. На відміну від поверхневих неруйнівних випробувань, дослідження кернів дає змогу оцінити стан матеріалу за товщиною конструкції та встановити вплив корозійних процесів на його залишкову несучу здатність. До найбільш показових параметрів належать міцність на стиск, густина і характер руйнування зразків під навантаженням. Зниження густини та міцності свідчить про втрату структурної цілісності цементного каменю, зростання пористості та накопичення продуктів корозії. У поєднанні з результатами фізико-хімічного аналізу ці показники дають змогу оцінити не лише наявність корозійного процесу, але і ступінь його впливу на експлуатаційну придатність конструкції.

Відомо [13, 14], що характерними продуктами корозії сульфатного типу є гіпс і етрингіт. Саме наявність цих фаз і відсутність продуктів гідратації цементу є надійним діагностичним маркером біогенного походження руйнування. Тому найбільш достовірну інформацію про ступінь деградації матеріалу дають

мікроструктурні та мінералогічні дослідження. Встановлення співвідношення між вихідними компонентами цементного каменю та продуктами корозії допомагає кількісно оцінити ступінь пошкодження бетону. Додаткове використання енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії дасть змогу оцінити зміну елементного складу і накопичення сірки як одного з основних індикаторів сірчанокислотної корозії.

Отже, для оцінювання ступеня деградації бетону внаслідок біогенної сірчанокислотної корозії доцільно використовувати сукупність показників, до яких належать характер візуальних пошкоджень, поверхнева міцність бетону, вологість матеріалу, величина pH, а також мікроструктурні та мінералогічні характеристики. Комплексне використання зазначених параметрів забезпечує об'єктивне оцінювання технічного стану конструкції та може бути покладене в основу алгоритму її діагностики.

На підставі аналізу механізму розвитку біогенної сірчанокислотної корозії та узагальнення сучасних підходів щодо оцінювання технічного стану бетонних конструкцій розроблено алгоритм комплексного обстеження бетонних і залізобетонних конструкцій каналізаційних мереж, що поєднує польові неруйнівні та лабораторні методи досліджень. Алгоритм враховує як прояви корозійних процесів на поверхні конструкції, так і зміни хімічного складу, мікроструктури та фізико-механічних властивостей матеріалу. Алгоритм наведено на рис. 2.

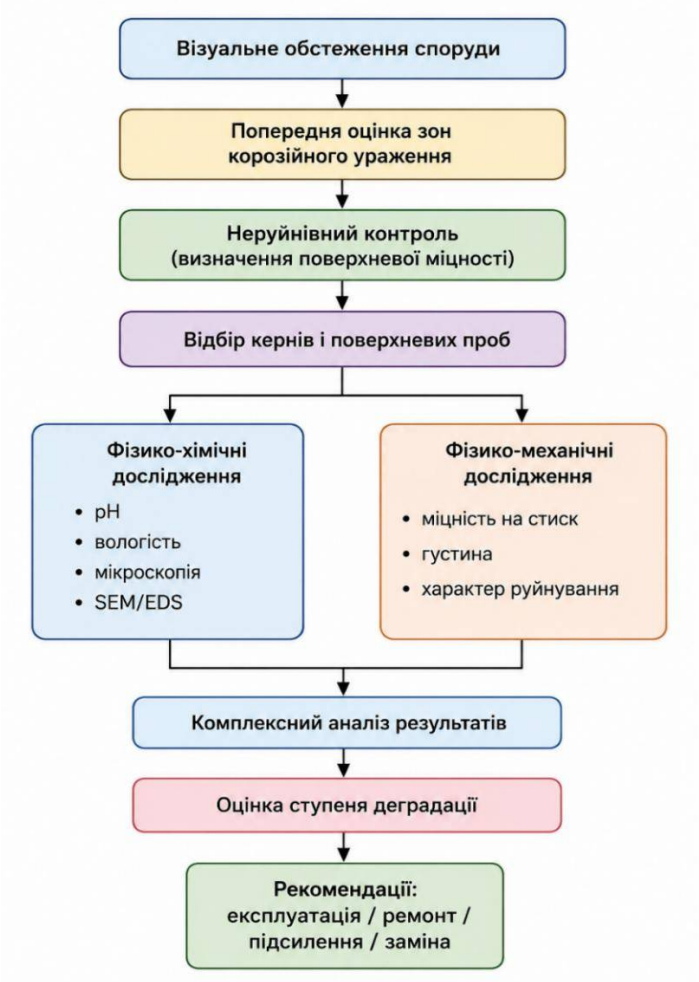


Рис. 2. Алгоритм комплексної діагностики технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж, уражених біогенною сірчанокислотною корозією

Запропонований алгоритм передбачає послідовне виконання візуального обстеження, неруйнівного контролю та відбору зразків матеріалу. Подальше оцінювання відбувається за двома напрямами: визначення фізико-хімічних показників, що характеризують ступінь корозійної деградації цементного каменю, і фізико-механічних характеристик, які відображають залишкову несучу здатність матеріалу. Отримані результати інтегрують для встановлення ступеня деградації конструкції та обґрунтування рекомендацій щодо її подальшої експлуатації, ремонту або заміни.

Для апробації запропонованого алгоритму було вибрано експлуатовану залізобетонну споруду системи водовідведення, яка тривалий час перебувала в умовах впливу газового середовища каналізаційної мережі та мала характерні ознаки біогенної сірчанокислотної корозії (рис. 3). Під час візуального обстеження встановлено наявність значних відкладень на поверхні бетону, локальних руйнувань захисного шару, ділянок розм'якшеного матеріалу та оголення арматури. Виявлені дефекти свідчили про необхідність проведення комплексного оцінювання технічного стану конструкції із застосуванням неруйнівних і лабораторних методів дослідження.

Відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 2, було виконано візуальне обстеження, неруйнівний контроль міцності бетону, відбір проб матеріалу та комплекс комплекс досліджень відповідно до алгоритму. Узагальнені результати виконаних досліджень наведено в таблиці.



Рис. 3. Характерні ознаки біогенної корозії бетонної конструкції під час апробації алгоритму

Таблиця

Результати комплексного обстеження конструкції з ознаками біогенної сірчанокислотної корозії

Показник	**Діапазон значень**
Міцність, за Шмідтом, МПа	12-16
Вологість, %	6-30
pH	2,3-5,5
Виявлені продукти корозії	гіпс, корозійні новоутворення
Стан структури	деградована

Особливий інтерес становлять результати визначення водневого показника бетону, оскільки саме зміна кислотності є одним з основних індикаторів розвитку біогенної сірчанокислотної корозії. Проби відбирали у п'яти характерних точках конструкції: у нижній (точки відбору № 1 і 2) і середній (точки відбору № 3 і 4) частинах вертикальних елементів, а також у зоні перекриття (точка відбору № 5). Для кожної точки визначали значення pH поверхневого деградованого шару та матеріалу внутрішньої частини керна. Така схема дала змогу оцінити як нерівномірність корозійного ураження за висотою конструкції, так і зміну кислотності за глибиною бетонного перерізу. Отримані результати наведено на рис. 4.

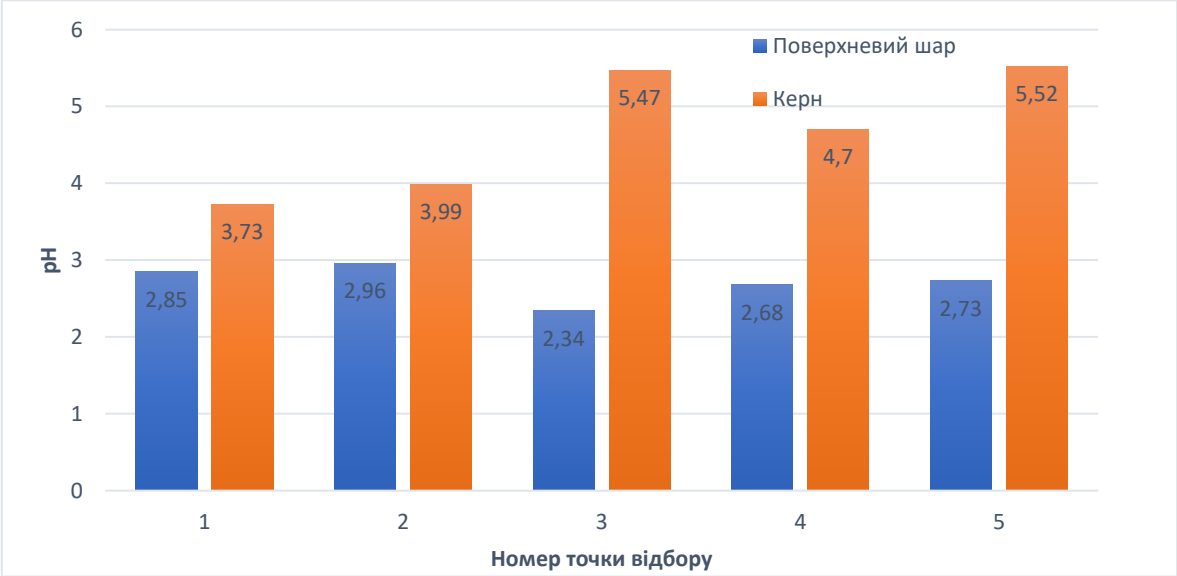
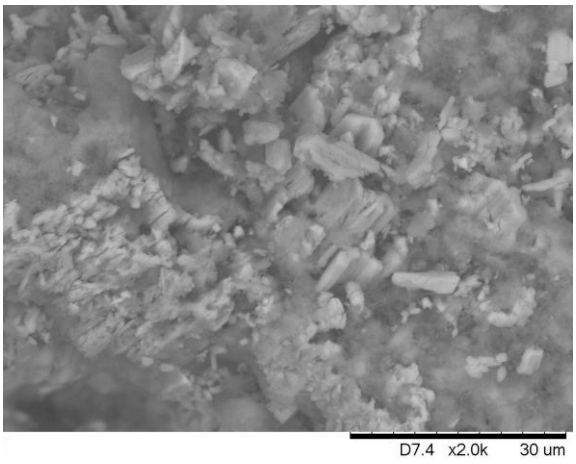


Рис. 4. Розподіл значень pH у поверхневому деградованому шарі та внутрішній частині бетонних кернів у досліджуваних точках відбору проб

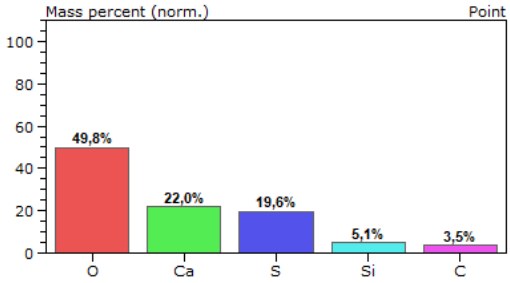
Як видно з рис. 4, поверхневий шар бетону має значно нижчі значення pH порівняно з внутрішньою частиною кернів. Це свідчить про розвиток інтенсивних кислотних процесів на поверхні конструкції та поступове проникнення фронту корозійної деградації вглиб бетонного перерізу.

Для підтвердження результатів фізико-хімічних досліджень та ідентифікації продуктів корозії було виконано мікроструктурний аналіз бетону методом сканувальної електронної мікроскопії з енергодисперсійним аналізом (SEM/EDS). Як приклад наведено результати дослідження проб, відібраних в одній із характерних точок обстеження (рис. 5). Аналіз виконували для поверхневого деградованого шару та матеріалу, відібраного з внутрішньої частини керна.

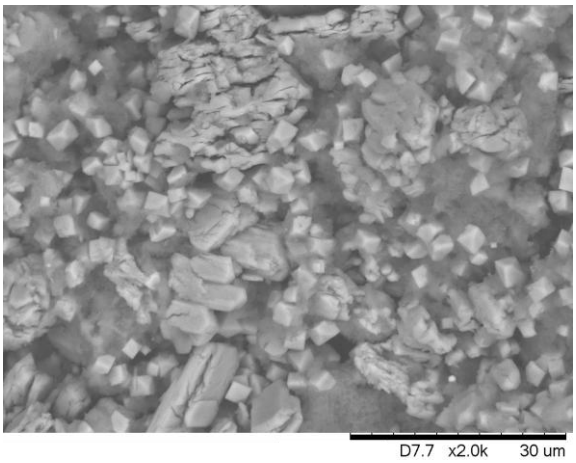
Аналіз мікроструктури показав суттєву деградацію цементного каменю та наявність кристалічних новоутворень, характерних для сірчанокислотної корозії. Результати EDS-аналізу підтвердили наявність сірки, кальцію, кисню та кремнію, що узгоджується з процесами утворення гіпсу та інших продуктів корозійного перетворення цементного каменю. Істотних відмінностей між поверхневим шаром і внутрішньою частиною дослідженого керна не виявлено, що свідчить про поширення корозійних процесів на значну глибину бетонного перерізу.



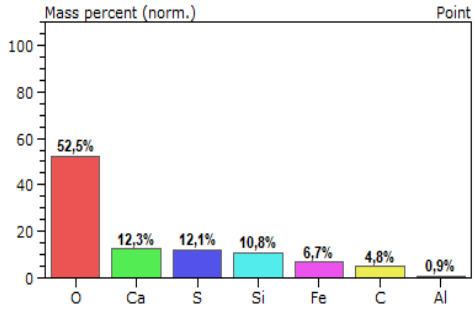
а



б



в



г

Рис. 5. Результати SEM/EDS-дослідження бетону в характерній точці обстеження: *а* – структура поверхневого шару; *б* – елементний склад поверхневого шару; *в* – структура внутрішньої частини керна; *г* – елементний склад внутрішньої частини керна

Мікроструктурні дослідження підтвердили висновки, отримані за результатами визначення pH і візуального обстеження. Отже, застосування SEM/EDS у складі запропонованого алгоритму дає змогу не лише встановити факт наявності корозійних процесів, а і підтвердити характер деградації матеріалу та продукти корозійних перетворень.

Висновки. На основі аналізу механізмів розвитку біогенної сірчанокислотної корозії визначено комплекс діагностичних показників, що характеризують ступінь деградації бетонних конструкцій каналізаційних мереж: візуальні ознаки пошкодження, показники міцності, вологість, водневий показник pH, а також мікроструктурні та елементні характеристики матеріалу.

Розроблено алгоритм комплексної діагностики технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж, який передбачає послідовне виконання польових і лабораторних досліджень і дає змогу отримувати комплексну оцінку стану матеріалу незалежно від стадії розвитку корозійного процесу.

Під час апробації алгоритму встановлено, що визначальними показниками для оцінювання ступеня деградації досліджуваної конструкції стали результати визначення pH і

мікроструктурного аналізу. Значення pH поверхневого шару бетону становили 2,3-3,0, що відповідає стадії глибокої кислотної деградації цементного каменю та свідчить про втрату його захисних властивостей. Водночас відмінність між значеннями pH поверхневого шару та внутрішньої частини кернів допомогла оцінити глибину поширення фронту кислотної деградації в бетонному перерізі.

Результати мікроструктурних досліджень підтвердили наявність корозійних перетворень цементного каменю та узгоджуються з даними визначення pH, що свідчить про доцільність спільного використання цих методів для діагностики конструкцій із розвиненою біогенною корозією.

Апробація алгоритму показала, що інформативність окремих методів дослідження може суттєво відрізнятися залежно від ступеня пошкодження конструкції. Тому під час оцінювання технічного стану доцільно використовувати повний комплекс діагностичних процедур, а остаточні висновки та рекомендації щодо подальшої експлуатації, ремонту або заміни конструкції формувати на підставі тих показників, які є найбільш репрезентативними для конкретного об'єкта обстеження.

Список використаних джерел

1. Li, X., Kappler, U., Jiang, G., & Bond, P. L. (2017). The ecology of acidophilic microorganisms in the corroding concrete sewer environment. *Frontiers in Microbiology*, 8, 683. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00683

2. Wu, M., Wang, T., Wu, K., & Kan, L. (2020). Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: a review of the mechanisms and phenomena. *Construction and Building Materials*, 239, 117813. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117813

3. Pramanik, S. K., Bhuiyan, M., Robert, D., Roychand, R., Gao, L., Cole, I., & Pramanik, B. K. (2024). Bio-corrosion in concrete sewer systems: mechanisms and mitigation strategies. *Science of the Total Environment*, 921, 171231. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171231

4. Grengg, C., Mittermayr, F., Ukrainczyk, N., Koraimann, G., Kienesberger, S., & Dietzel, M. (2018). Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: a review. *Water Research*, 134, 341–352. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.043

5. Huber, B., Hilbig, H., Drewes, J. E., & Müller, E. (2017). Evaluation of concrete corrosion after short- and long-term exposure to chemically and microbially generated sulfuric acid. *Cement and Concrete Research*, 94, 36–48. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.01.005

6. Buvignier, A., Patapy, C., Peyre Lavigne, M., Paul, E., & Bertron, A. (2024). Assessment of the durability of various cementitious materials subjected to low levels of H_2S in wastewater networks. *Materials and Structures*, 57 (4), 87. DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-024-02346-6

7. Li, X., Bond, P. L., O'Moore, L., Wilkie, S., Hanzic, L., Johnson, I., Mueller, K., Yuan, Z., & Jiang, G. (2020). Increased resistance of nitrite-admixed concrete to microbially induced corrosion in real sewers. *Environmental Science & Technology*, 54 (4), 2323–2333. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06680

8. Merachtsaki, D., Tsardaka, E.-C., Anastasiou, E., & Zouboulis, A. (2021). Evaluation of the protection ability of a magnesium hydroxide coating against the bio-corrosion of concrete sewer pipes, by using short and long duration accelerated acid spraying tests. *Materials*, 14 (17), 4897. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14174897

9. Kaushal, V., Najafi, M., Love, J., Nahar Sharar, D. (2022). Microbiologically induced corrosion of concrete in sanitary sewer pipes and manholes: field surveys and laboratory assessment.

Advances in Environmental and Engineering Research, 3 (2), 027. DOI: https://doi.org/10.21926/aeer.2202027

10. Wu, L., Hu, C., & Liu, W. V. (2018). The sustainability of concrete in sewer tunnel — a narrative review of acid corrosion in the city of Edmonton, Canada. *Sustainability,* 10, (2), 517. DOI: https://doi.org/10.3390/su10020517

11. Islander, R. L., Devinny, J. S., Mansfeld, F., Postyn, A., & Shih, H. (1991). Microbial Ecology of Crown Corrosion in Sewers. *Journal of Environmental Engineering*. *ASCE,* 117 (6), 751-770. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1991)117:6(751)

12. Mori, T., Nonaka, T., Tazaki, K., Koga, M., Hikosaka, Y., & Noda, S. (1992). Interactions of Nutrients, Moisture and pH on Microbial Corrosion of Concrete Sewer Pipes. *Water Research*, 26 (1), 29-37. doi: 10.1016/0043-1354(92)90107-F

13. Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2001). Mechanism of sulfate attack: A fresh look. Part 1: Summary of experimental results of ettringite and gypsum formation. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 39-44.

14. Tian, B., & Cohen, M. D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? *Cement and Concrete Research*. 2000, 30 (1), 13–23.

References

1. Li, X., Kappler, U., Jiang, G., & Bond, P. L. (2017). The ecology of acidophilic microorganisms in the corroding concrete sewer environment. *Frontiers in Microbiology,* 8, 683. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00683

2. Wu, M., Wang, T., Wu, K., & Kan, L. (2020). Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: a review of the mechanisms and phenomena. *Construction and Building Materials,* 239, 117813. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117813

3. Pramanik, S. K., Bhuiyan, M., Robert, D., Roychand, R., Gao, L., Cole, I., & Pramanik, B. K. (2024). Bio-corrosion in concrete sewer systems: mechanisms and mitigation strategies. *Science of the Total Environment,* 921, 171231. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171231

4. Grengg, C., Mittermayr, F., Ukrainczyk, N., Koraimann, G., Kienesberger, S., & Dietzel, M. (2018). Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: a review. *Water Research,* 134, 341–352. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.043

5. Huber, B., Hilbig, H., Drewes, J. E., & Müller, E. (2017). Evaluation of concrete corrosion after short- and long-term exposure to chemically and microbially generated sulfuric acid. *Cement and Concrete Research,* 94, 36–48. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.01.005

6. Buvignier, A., Patapy, C., Peyre Lavigne, M., Paul, E., & Bertron, A. (2024). Assessment of the durability of various cementitious materials subjected to low levels of H_2S in wastewater networks. *Materials and Structures,* 57 (4), 87. DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-024-02346-6

7. Li, X., Bond, P. L., O'Moore, L., Wilkie, S., Hanzic, L., Johnson, I., Mueller, K., Yuan, Z., & Jiang, G. (2020). Increased resistance of nitrite-admixed concrete to microbially induced corrosion in real sewers. *Environmental Science & Technology*, 54 (4), 2323–2333. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06680

8. Merachtsaki, D., Tsardaka, E.-C., Anastasiou, E., & Zouboulis, A. (2021). Evaluation of the protection ability of a magnesium hydroxide coating against the bio-corrosion of concrete sewer pipes, by using short and long duration accelerated acid spraying tests. *Materials*, 14 (17), 4897. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14174897

9. Kaushal, V., Najafi, M., Love, J., Nahar Sharar, D. (2022). Microbiologically induced corrosion of concrete in sanitary sewer pipes and manholes: field surveys and laboratory assessment.

Advances in Environmental and Engineering Research, 3 (2), 027. DOI: https://doi.org/10.21926/aeer.2202027

10. Wu, L., Hu, C., & Liu, W. V. (2018). The sustainability of concrete in sewer tunnel — a narrative review of acid corrosion in the city of Edmonton, Canada. *Sustainability*, 10, (2), 517. DOI: https://doi.org/10.3390/su10020517

11. Islander, R. L., Devinny, J. S., Mansfeld, F., Postyn, A., & Shih, H. (1991). Microbial Ecology of Crown Corrosion in Sewers. *Journal of Environmental Engineering*. *ASCE,* 117 (6), 751-770. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1991)117:6(751)

12. Mori, T., Nonaka, T., Tazaki, K., Koga, M., Hikosaka, Y., & Noda, S. (1992). Interactions of Nutrients, Moisture and pH on Microbial Corrosion of Concrete Sewer Pipes. *Water Research*, 26 (1), 29-37. doi: 10.1016/0043-1354(92)90107-F

13. Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2001). Mechanism of sulfate attack: A fresh look. Part 1: Summary of experimental results of ettringite and gypsum formation. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 39-44.

14. Tian, B., & Cohen, M. D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? *Cement and Concrete Research*. 2000, 30 (1), 13–23.

Гудименко Микола Сергійович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0008-4190-8150.
E-mail: Hudymenkooo@gmail.com.
Юй Вей, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0006-5783-5625. E-mail: 741034741@qq.com.
Борзяк Ольга Сергіївна, доктор технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, професор кафедри будівельної фізики та будівельних матеріалів Західнопоморського технологічного університету, Щецин. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: oborziak@zut.edu.pl.

Hudymenko Mykola, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0008-4190-8150. E-mail: Hudymenkooo@gmail.com.
Yu Wei, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0006-5783-5625. E-mail: 741034741@qq.com.
Borziak Olga, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport, Associate Professor, department of building physics and building materials West Pomeranian University of Technology, Szczecin. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: oborziak@zut.edu.pl.

Дата надходження статті: 28.07.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 25.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 624.01:623.454.2:351.86

РАЦІОНАЛЬНІ КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ У СИСТЕМІ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ВІД ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Кандидати технічних наук В. С. Буравченко, О. О. Овчинніков,
асп. М. О. Орленко

RATIONAL STRUCTURAL SOLUTIONS FOR GLAZED BUILDING ENVELOPE STRUCTURES WITHIN THE ENGINEERING PROTECTION SYSTEM OF CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS AGAINST EXPLOSIVE LOADS

PhD (Tech) V. S. Buravchenko, PhD (Tech) O. O. Ovchynnikov,
PhD Student M. O. Orlenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371910

Анотація. *У статті узагальнено результати натурних полігонних випробувань одинадцяти зразків віконних конструкцій за ДСТУ EN 13123-2 / ДСТУ EN 13124-2. Віконний блок з армованим ПВХ-профіль забезпечує клас EXR1; для EXR2 потрібен алюмінієвий профіль або ПВХ з алюмінієвою накладкою. На цій основі сформульовано раціональні конструктивні рішення обох класів, запропоновано алгоритм призначення класу за сценарієм загрози та планувальними обмеженнями і визначено місце світлопрозорих конструкцій у системі інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури.*

Ключові слова: *світлопрозорі огороджувальні конструкції, об'єкти критичної інфраструктури, інженерний захист, вибух, ударна хвиля, фактори ураження, будівельні конструкції, засоби повітряного нападу, раціональне конструктивне рішення, стійкість.*

Abstract. *Engineering protection of critical infrastructure objects traditionally focuses on perimeter measures — fortification structures, protective screens, underground placement of equipment. Windows, however, remain an element that can be neither screened nor removed, and it is the glazed envelope structures that fail first, with glass fragment scatter causing most injuries indoors. The paper proposes to treat this vulnerable element as a separate level of the engineering protection system — with its own resistance classes, field-proven structural solutions and a rule for their assignment. The basis is a full-scale arena test programme carried out in four series during 2022–2024: eleven window specimens of 1780×1460 mm, differing in glazing, profile, hardware and installation joint, were tested to DSTU EN 13123-2 / DSTU EN 13124-2 with a 3 kg TNT charge; part of the tests were instrumented with DYTRAN 2300V5 piezoelectric pressure sensors, and for the rest the parameters were calculated with the Kingery–Bulmash model. It turned out that a steel-reinforced PVC profile with burglar-resistant hardware reliably provides class EXR1 (NS), whereas at the EXR2 level PVC systems fail in the corner joint zone. Class EXR2 (NS) is achievable in two ways: with an aluminium profile (confirmed at pressures up to 576 kPa) or with a PVC profile fitted with an external aluminium cover. The established failure sequence — glazing, locking hardware, corner joints or mullion connection, anchor fastenings — showed that the class is provided by the system as a whole: the failure of a single joint cancels the class even with a resistant profile. Among*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Буравченко В. С., Овчинніков О. О., Орленко М. О., 2026.

glazing types, only P4A laminated glass behaved predictably. Based on the results, rational structural solutions for classes EXR1 and EXR2 were formulated, an algorithm for class assignment according to the threat scenario and the minimum achievable stand-off distance was built, and the place of glazed structures in the engineering protection system of critical infrastructure objects was defined. The operability of the EXR2 solutions has been confirmed by service on a real object under shock-wave loading.

***Keywords**: glazed building envelope structures, critical infrastructure objects, engineering protection, explosion, shock wave, damage factors, building structures, air attack means, rational structural solution, stability.*

Вступ. Систематичні удари засобів повітряного нападу по об'єктах енергетики та інших об'єктах критичної інфраструктури України зробили інженерний захист цих об'єктів окремим напрямом будівельної науки. Основну увагу дослідники закономірно приділяють контурним заходам – фортифікаційним спорудам, захисним екранам, підземному розташуванню обладнання. Але в кожній будівлі залишається елемент, який неможливо ані екранувати, ані прибрати: вікна. Світлопрозорі огороджувальні конструкції (СОК) руйнуються першими, і саме розліт уламків скла завдає більшості травм людям усередині приміщень.

Виникає практичне запитання, якими мають бути самі СОК на об'єкті критичної інфраструктури – якого класу вибухостійкості, із якого профілю, із яким склінням і вузлами кріплення. Нормативна база для відповіді існує: ДСТУ EN 13123-2 і ДСТУ EN 13124-2 [11, 12] визначають класи EXR і методику полігонних випробувань. Лише бракує перевірених практикою конструктивних рішень під кожен клас і зрозумілого правила, який клас вимагати від конкретного об'єкта. Саме цим питанням присвячена стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика захисту людей від уламків скління за вибухів системно висвітлена в роботі [1]; засади державної політики щодо захисту критичної інфраструктури узагальнено в роботі [2]. Найпослідовніше питання інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від засобів повітряного нападу розробляє наукова школа В. І. Коцюруби: запропоновано методику розрахунків та обґрунтування вимог щодо інженерного захисту таких об'єктів від баражуючих боєприпасів [3]; захист від прямих влучань ракет за допомогою підземного розташування споруд [4]; обґрунтовано раціональні параметри захисних конструкцій типу частково-проникних екранів [5]; узагальнено підходи щодо розрахунку будівельних конструкцій під вибуховим навантаженням — від спрощених моделей до розширеного динамічного аналізу з урахуванням факторів ураження [6].

Методичний апарат оцінювання стійкості конструкцій за ударно-хвильового навантаження розвинено у працях школи НТУ «ХПІ»: виконано моделювання дії ударно-хвильового навантаження на корпусні елементи транспортних засобів із виходом на раціональні конструктивні рішення [7], досліджено вплив ударної хвилі на втрату стійкості тонкостінних конструкцій методом скінченних елементів [8]. Попередні результати автора щодо натурних випробувань віконних блоків різного складу та аналізу структурних факторів, які впливають на відповідність класам EXR, викладено в роботах [9, 10].

Якщо зробити проміжний підсумок огляду, вимальовується розрив. Контурні заходи інженерного захисту [3–6] опрацьовані і розрахунково, і конструктивно; методики оцінювання стійкості [7, 8] відпрацьовані на військовій техніці. А ось СОК у цій системі досі присутні радше як «слабке місце, яке всі

знають», ніж як формалізований рівень захисту з власними класами, перевіреними рішеннями та правилом їх призначення. Заповненню цієї прогалини і присвячено роботу.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи — сформулювати раціональні конструктивні рішення світлопрозорих огороджувальних конструкцій для класів вибухостійкості EXR1–EXR2 і визначити їхнє місце в системі інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури. Для цього потрібно було пройти чотири кроки: провести полігонні випробування зразків різного складу за ДСТУ EN 13123-2 / ДСТУ EN 13124-2 [11, 12], простежити, у якій послідовності відмовляють елементи конструкцій, звести результати за класами і матеріалами профілів і, нарешті, перетворити ці спостереження на робоче правило призначення класу.

Методика та програма натурних випробувань. Дослідження виконано за методикою польових випробувань ДСТУ EN 13123-2 [11]; із процедурною частиною за ДСТУ EN 13124-2 [12]; класифікація узгоджена з міжнародними аналогами [13–15]. Заряд — 3 кг ТНТ, зібраний зі стандартних пресованих шашок, як і передбачено протоколом. Його центр виставляли на висоті 500 ± 5 мм над твердим майданчиком із відбивною залізобетонною поверхнею. Зразки при цьому стояли не у випробувальному стенді, а в наявних прорізах зовнішніх стін масивної залізобетонної будівлі – так відтворено реальні умови монтажу. За сценарієм це зовнішній вибух переносного вибухового пристрою: фронт тиску діє на лицьову поверхню конструкції.

Загалом за 2022–2024 роки відбулося чотири серії тестів — одинадцять зразків, із однаковими габаритами 1780×1460 мм (2,6 м²), що відрізнялися складом склопакетів, профілів, фурнітури та монтажних швів. Частину тестів супроводжували інструментальні вимірювання двома п'єзоелектричними датчиками тиску DYTRAN 2300V5: перший встановлювали врівень із жорсткою пластиною в зоні монтажного стику і реєстрували відбитий тиск для оцінювання локальних навантажень на вузли; другий — на окремій стійці паралельно фронту хвилі, він фіксував інцидентний тиск P_{so} у вільному полі (тут і далі позначення Pso). Для тестів без вимірювань параметри розраховували за моделлю Kingery–Bulmash [16]. Нормативні умови досліджених класів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Класи вибухостійкості, за ДСТУ EN 13123-2, і мінімальні параметри детонації, за ДСТУ EN 13124-2 (дод. А, табл. А.1 [12])

Клас	Заряд ТНТ, кг	Відстань, м	Pso, кПа	Iso, кПа·мс
EXR1	3	5	75	105
EXR2	3	3	230	165
EXR3	12	5,5	170	225
EXR4	12	4	360	300
EXR5	20	4	630	420

Маса заряду і відстань підриву задають клас за роботою [11], а піковий тиск Pso і позитивний імпульс Iso, наведені в табл. 1 дод. А [12], слугують мінімальними параметрами підтвердження повного детонування: виміряні значення мають перевищувати табличні. У всіх інструментованих тестах цю умову

виконано, тому зафіксовані навантаження відповідають повній детонації заряду.

Оцінювали за критеріями відповідності цільовому класу EXR із вимогою відсутності уламків у захищеному просторі (критерій NS) і рівнем небезпеки уламків PC1 (No Hazard) [13]. Після кожного тесту проводили фрактографічний і конструктивний аналіз із фотофіксацією до та після впливу. Результати кожного тесту оформлено протоколами випробувань уповноважених установ [17–19].

Результати випробувань та їх аналіз. Зведені умови та підсумки випробувань для зразків, за якими наявні верифіковані дані, наведено в табл. 2; розподіл результатів за класами і матеріалом профілю — у табл. 3.

Таблиця 2

Зведені результати натурних випробувань зразків СОК (заряд 3 кг ТНТ)

Номер	Код зразка (ID)	Відстань R, м	Метод	Pso, кПа	Iso, кПа·мс	Цільовий клас	Результат
1	S1-01_2022	5	C	86	118	EXR1 (NS)	пройшов
2	S1-02_2022	3	C	259	187	EXR2 (NS)	не пройшов
4	S2-02_2023	5	C	86	118	EXR1 (NS)	пройшов
5	S3-01_2023	3	M	576,3	264,5*	EXR2 (NS)	пройшов
6	S3-02_2023	3	M	415,5	232,6*	EXR2 (NS)	пройшов
7	S3-03_2023	3	M	564,6	273,3*	EXR2 (NS)	не пройшов
9	S4-02_2024	3	M	324,0	162,6*	EXR2 (NS)	не пройшов
10	S4-03_2024	3	M	302,9	45,7*	EXR2 (NS)	пройшов
11	S4-04_2024	5	C	86	118	EXR1 (NS)	пройшов

Примітки: M — інструментальні вимірювання DYTRAN 2300V5; C — розрахунок за Kingery–Bulmash [16]; * — імпульс за аналітичною формою Фрідлендера; протоколи випробувань [17–19]. Результати показано на рис. 1-6.

Таблиця 3

Розподіл результатів випробувань за класами та матеріалом профілю (номери зразків)

Підсумок	ПВХ 70–82 мм	ПВХ 82 мм + Al накладка	Al 77 мм	Разом
Зруйновані (без цільового класу)	3, 8	—	—	2
EXR1 — пройшли	1, 4	—	11	3
EXR2 — не пройшли	2, 7	—	9	3
EXR2 — пройшли	—	10	5, 6	3



Рис. 1. Віконна конструкція зразка № S2-02_2023:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [19]



Рис. 2. Віконна конструкція зразка № S3-01_2023:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [17]



Рис. 3. Віконна конструкція зразка № S3-02_2023:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [17]



Рис. 4. Віконна конструкція зразка № S4-02_2024:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [18]



Рис. 5. Віконна конструкція зразка № S4-03_2024:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [18]



Рис. 6. Віконна конструкція зразка № S4-04_2024:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [18]

Тепер переходимо до аналізу отриманих результатів. Межа можливостей ПВХ-систем окреслена чітко. Армований ПВХ-профіль із протизламною фурнітурою впевнено забезпечує рівень EXR1: обидва зразки (№ 1, 4) пройшли випробування без викиду уламків у захищений простір. На рівні EXR2 картина інша — зразки № 2 і 7 втратили цілісність, причому руйнування щоразу починалося в зоні кутових з'єднань, де відшаровувалося армування і розкривався профіль.

До класу EXR2 вдалося дійти двома шляхами. Перший очевидний — алюмінієвий профіль: зразки № 5 і 6 підтвердили клас за виміряних тисків 576 і 416 кПа, що більш ніж удвічі перевищують мінімальний рівень 230 кПа (табл. 1). Другий шлях цікавіший з економічного погляду. Зразок № 10 — це звичайна ПВХ-система, підсилена зовнішньою алюмінієвою накладкою, і вона теж пройшла випробування на клас EXR2. Не обійшлося без несподіванки: зразок № 9, двостулковий алюмінієвий з імпостом, клас не підтвердив — профіль вистояв, але зруйнувався вузол кріплення імпоста. Висновок простий: матеріал профілю — умова необхідна, але не достатня; вплив ударної хвилі сприймає вся система «профіль + вузли + кріплення».

Зі склінням орієнтири вийшли однозначні. Флоат-скло руйнувалося з розльотом уламків — це було очікуваним результатом. Менш очевидно, що так само поводилося і загартоване скло, утворюючи небезпечні дрібні фрагменти. Захисна плівка в нормативних умовах ситуацію не рятувала. Надійним щодо вимог лише ламіноване скло класу P4A — зруйноване, воно трималося на полімерній основі, поки зберігалася фіксація в рамі.

Що ж до конструкції в цілому, відмови щоразу йшли за одним сценарієм: спершу скління, потім запірна фурнітура і цапфи, далі кутові з'єднання або вузол імпоста,

останніми — анкери монтажного шва. Кожна наступна ланка цього ланцюга наочно підказує, де потрібно вдосконалювати конструктивні рішення.

Раціональні конструктивні рішення та їх місце в системі інженерного захисту. Із цього випливають практично два конструктивні рішення. Перше, для класу EXR1: ПВХ-профіль зі сталевим армуванням, ламіноване скло P4A, протизламна фурнітура із запірними планками, закріпленими у сталеве армування. Друге, для класу EXR2: алюмінієвий профіль або ПВХ з алюмінієвою накладкою, те саме скло P4A, підсилені кутові з'єднання і вузол імпоста, анкерування монтажного шва з розрахунку на відривні зусилля. За кожним рішенням стоять конкретні пройдені зразки з табл. 2, а рішення другого класу, встановлене на одному з об'єктів критичної інфраструктури, уже витримало реальне ударно-хвильове навантаження без втрати захисної функції [10].

Місце цих рішень у загальній системі захисту об'єкта показано на рис. 7. Логіка тут така. Фортифікаційні споруди, частково-проникні екрани, підземне розташування [3–6] знижують і ймовірність ураження, і параметри вибухового впливу, але не зводять до нуля. А віконний проріз неможливо повністю екранувати: він для того існує, щоб пропускати світло. Отже, СОК — це третій контур захисту, який зменшує загрозу там, де перші два фізично не працюють. І призначати його потрібно не за залишковим принципом, а під розрахунковий сценарій.



Рис. 7. Місце світлопрозорих огороджувальних конструкцій у системі інженерного захисту об'єкта критичної інфраструктури

Однак необхідно зробити застереження щодо рівня вимог. Заряд 3 кг у класах EXR — це стандартизована основа для співставлення конструкцій між собою, і не більше. Реальні загрози є значно різноманітнішими: бойове спорядження сучасних засобів повітряного нападу, зокрема баражуючих боєприпасів, може багатократно перевищувати нормативний заряд. Тож EXR2 для об'єктів критичної інфраструктури — не гарантія, а нижня межа. Для найвідповідальніших об'єктів вона працює лише в парі з контурними заходами, які збивають параметри вибухового впливу до рівня, посильного для скління.

Тепер розглянемо вибухові загрози воєнного часу в аспекті впливу ударної хвилі на власне світлопрозорі конструкції (табл. 4). Пряме влучання ракети чи ударного БпЛА у будівлю — випадок, у якому скління не врятувати нічим; тут може бути ефективним тільки поле контурних заходів: перехоплення, екранування, підземне розташування [4, 5]. Але масова статистика пошкоджень складається з іншого — із вибухів на різних відстанях. Влучання в сусідню споруду, підрив перехопленого засобу в повітрі, падіння збитих уламків із детонацією залишків заряду — усе це навантаження від десятків до сотень кілопаскалів, і саме тут буде вирішено головне: втримає конструкція уламки скла у прорізі (критерій NS) чи сама стане джерелом вторинного ураження людей.

Терористичні сценарії з переносними та автомобільними пристроями стоять окремо — під них свого часу і писали нормативну базу EXR.

Таблиця 4

Типові вибухові загрози воєнного часу та застосовні рівні захисту СОК

Сценарій	Характер впливу на СОК	Застосовний рівень захисту
Пряме влучання ракети або ударного БпЛА у будівлю	руйнування прорізу разом із конструкцією	контурні заходи (рівні I–II, рис. 7)
Вибух на відстані: влучання поруч, підрив перехопленого засобу	повітряна ударна хвиля; тиск від десятків до сотень кілопаскалів	класи EXR1–EXR2 (рівень III)
Падіння уламків збитих засобів повітряного нападу	локальний удар у поєднанні з ослабленою ударною хвилею	EXR1 і ламіноване скління P4A
Терористичні сценарії: переносні і автомобільні вибухові пристрої	ударна хвиля за нормативними сценаріями випробувань	класи EXR за алгоритмом (рис. 8)

Правило призначення цільового класу зведено в алгоритм на рис. 8. Точка входу — категорія об’єкта і сценарій загрози. Далі все вирішує очікувана масштабована відстань, яку визначають за формулою

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}, \qquad (1)$$

де R — відстань від центра заряду, м;

W — маса заряду в тротиловому еквіваленті, кг.

Розглянемо, скільки метрів до фасаду реально гарантує периметр: п'ять і більше — вистачить EXR1; лише три — потрібен EXR2 з відповідним конструктивним рішенням. Фінальний блок алгоритму — обов’язкове полігонне випробування за роботами [11, 12], і це не формальність: зразок № 9 наочно показав, що розрахункова стійкість окремих елементів ще не гарантує стійкості системи.

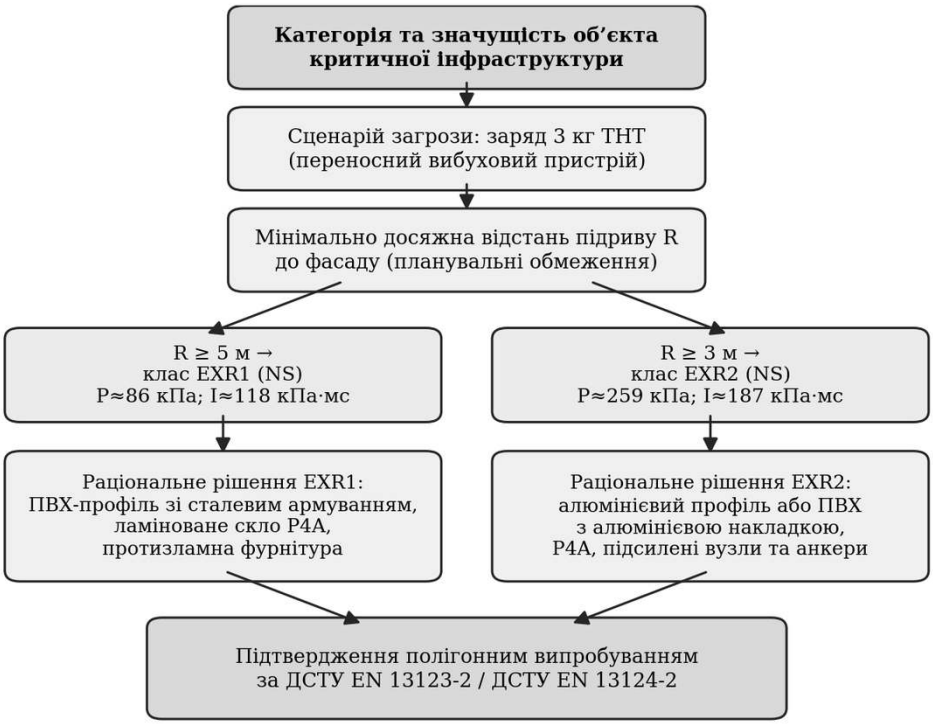


Рис. 8. Алгоритм вибору раціонального конструктивного рішення СОК за класом вибухостійкості

Висновки та перспективи подальших досліджень:

1. Програма з чотирьох серій натурних полігонних випробувань одинадцяти зразків віконних конструкцій за ДСТУ EN 13123-2 / ДСТУ EN 13124-2 на реальних прорізах масивної будівлі підтвердила придатність аренової методики для оцінювання вибухостійкості СОК і дала верифіковану базу для конструктивних узагальнень.

2. Армований ПВХ-профіль із протизламною фурнітурою забезпечує клас EXR1 (NS); на рівні EXR2 ПВХ-системи відмовляють у зоні кутових з'єднань. Класу EXR2 (NS) досягають алюмінієвим профілем або ПВХ-профілем з алюмінієвою накладкою за виміряних тисків до 576 кПа.

3. Відмови в усіх тестах ішли одним маршрутом: скління, запірна фурнітура, кутові з'єднання чи вузол імпоста, анкерні кріплення. Звідси головний конструктивний урок програми — клас вибухостійкості тримає система в цілому, і відмова одного вузла (зразок № 9, кріплення імпоста) знімає клас навіть за стійкого профілю. Серед типів скління передбачувано відпрацювало лише ламіноване P4A.

4. Для обох класів сформульовано раціональні конструктивні рішення, а правило призначення класу за сценарієм загрози та мінімально досяжною відстанню підриву зведено в алгоритм. СОК при цьому розглядають як окремий рівень системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури — той, що доповнює контурні заходи всюди, де екранування прорізів неможливе.

5. Працездатність рішень класу EXR2 підтверджено досвідом експлуатації на об'єкті критичної інфраструктури в умовах реального ударно-хвильового навантаження. Напрямом подальших досліджень є вдосконалення вузла кріплення імпоста двостулкових конструкцій і поширення підходу на фасадні системи.

Список використаних джерел

1. Information Bulletin: Blast Protection for Windows / UN Department of Safety and Security, Division of Specialized Operational Support, Physical Security Unit. New York, 2021. 39 p.

2. Бірюков, Д. С., & Кондратов, С. І. (2016). *Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури в Україні*: зб. матеріалів міжнар. експерт. нарад; за заг. ред. О. М. Суходолі. Київ: НІСД, 176.

3. Коцюруба, В. І., Білик, А. С., Веретно, А. О. та ін. (2022). Методика розрахунків та обґрунтування вимог до інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від БпЛА типу баражуючий боєприпас. *Опір матеріалів і теорія споруд,* 109, 164–183. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.164-183

4. Коцюруба, В. І. та ін. (2023). Захист об'єктів критичної інфраструктури України від прямих влучань ракет за допомогою підземного розташування. *Ядерна та радіаційна безпека*, 2 (98). DOI: 10.32918/nrs.2023.2(98).07

5. Коцюруба, В. І. та ін. (2025). Обґрунтування раціональних параметрів захисних конструкцій типу частково-проникних екранів під час інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 10. DOI: 10.37701/ts.10.2025.08

6. Коцюруба, В. І. та ін. (2026). Розрахунок конструкцій під вибуховим навантаженням: від спрощених моделей до розширеного динамічного аналізу. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 116, 243–250. DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.243-250

7. Грабовський, А. В. та ін. (2021). Моделювання дії ударно-хвильового навантаження на корпусні елементи транспортних засобів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР,* 1. DOI: 10.20998/2079-0775.2021.1.01

8. Ткачук, М. А., Васильєв, А. Ю., Грабовський, А. В. та ін. (2025). Вплив ударної хвилі на втрату стійкості бронекорпусів легкоброньованих машин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*, 1, 73–91. DOI: 10.20998/2079-0775.2025.1.08

9. Орленко, М. О., Буравченко, В. С., & Бісик, С. П. (2025). Досвід натурних випробувань віконних блоків різного конструктивного складу на ударно-хвильову стійкість. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 115, 383–395. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395

10. Орленко, М. О. (2026). Аналіз структурних факторів, що впливають на відповідність віконних блоків класам EXR1–EXR2 за результатами натурних випробувань на дію ударної хвилі. *The Scientific Heritage*, 185, 9–15. DOI: 10.5281/zenodo.20455933

11. ДСТУ EN 13123-2:2006 (EN 13123-2:2004, IDT). Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Класифікація та технічні вимоги. Ч. 2: Полігонне випробування. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 2 с.

12. ДСТУ EN 13124-2:2006 (EN 13124-2:2004, IDT). Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Метод випробування. Ч. 2: Полігонне випробування. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 11 с.

13. ISO 16933:2007. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification for arena air-blast loading. Geneva : International Organization for Standardization, 2007. 22 p.

14. ASTM F1642/F1642M-17. Standard Test Method for Glazing and Glazing Systems Subject to Airblast Loadings. West Conshohocken : ASTM International, 2017. 6 p. DOI: 10.1520/F1642_F1642M-17

15. GSA-TS01:2003. Standard Test Method for Glazing and Window Systems Subject to Dynamic Overpressure Loadings. Washington : US General Services Administration, 2003. 6 p.

16. Swisdak M. M. Simplified Kingery airblast calculations. Minutes of the 26th DoD Explosives Safety Seminar. Maryland, 1994. 17 p.

17. Протокол випробування № 345-В/2023 вікон вибухотривких від 27 вересня 2023 р. / Науково-випробувальний відділ науково-дослідного центру випробувань, експертизи та сертифікації персональних броньованих засобів Національного університету оборони України, 10 с.

18. Протокол випробування № 796-В/2024 вікон вибухотривких від 28 грудня 2024 р. / Науково-випробувальний відділ науково-дослідного центру випробувань, експертизи та сертифікації персональних броньованих засобів Національного університету оборони України, 9 с.

19. Протокол № 4317/2023 випробувань вікна, наданого ТОВ «Компанія Вікна-Стар», від 22 травня 2023 р. / Випробувальна лабораторія ТОВ «Науково-інженерний центр випробувань виробів та матеріалів захисту», 5 с.

References

1. UN Department of Safety and Security, Division of Specialized Operational Support, Physical Security Unit. Information bulletin: Blast protection for windows. New York, 2021. 39 p. [in English].

2. Biriukov, D. S., & Kondratov, S. I. (comps.); Sukhodolia, O. M. (ed.). (2016). Zelena knyha z pytan zakhystu krytychnoi infrastruktury v Ukraini [Green paper on critical infrastructure protection in Ukraine]. Kyiv : NISD, 176. [in Ukrainian].

3. Kotsiuruba, V. I., Bilyk, A. S., Veretnov, A. O., Haidarli, H. S., Borta, R. M., & Tertyshnyi, B. I. (2022). Metodyka rozrakhunkiv ta obgruntuvannia vymoh do inzhenernoho zakhystu obiektiv krytychnoi infrastruktury vid BpLA typu barazhuiuchyi boieprypas [Method of calculation and substantiation of requirements for the engineering protection of critical infrastructure objects against loitering-munition UAVs]. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 109, 164–183. 10.32347/2410-2547.2022.109.164-183. [in Ukrainian].

4. Kotsiuruba, V. I. et al. (2023). Zakhyst obiektiv krytychnoi infrastruktury Ukrainy vid priamykh vluchan raket za dopomohoiu pidzemnoho roztashuvannia [Protection of critical infrastructure objects of Ukraine against direct missile hits using underground structures]. *Nuclear and Radiation Safety*, 2 (98). 10.32918/nrs.2023.2(98).07. [in Ukrainian].

5. Kotsiuruba, V. I. et al. (2025). Obgruntuvannia ratsionalnykh parametriv zakhysnykh konstruktsii typu chastkovo-pronyknykh ekraniv pid chas inzhenernoho zakhystu obiektiv krytychnoi infrastruktury [Substantiation of rational parameters of partially permeable screen protective structures for the engineering protection of critical infrastructure objects]. *Collection of Scientific Papers of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, 10. 10.37701/ts.10.2025.08. [in Ukrainian].

6. Kotsiuruba, V. I. et al. (2026). Rozrakhunok konstruktsiy pid vybukhovym navantazhennyam: vid sproshchenykh modeley do rozshyrenoho dynamichnoho analizu [Structural design under blast loading: from simplified models to advanced dynamic analysis]. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 116, 243–250. 10.32347/2410-2547.2026.116.243-250. [in Ukrainian].

7. Hrabovskyi, A. V. et al. (2021). Modeliuvannia dii udarno-khvylovoho navantazhennia na korpusni elementy transportnykh zasobiv (Modelling of the shock-wave loading action on hull elements of vehicles). *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical Engineering and CAD*, 1. 10.20998/2079-0775.2021.1.01. (in Ukrainian)

8. Tkachuk, M. A., Vasyliev, A. Yu., Hrabovskyi, A. V. et al. (2025). Vplyv udarnoi khvyli na vtratu stiikosti bronekorpusiv lehkobronovanykh mashyn (Influence of a shock wave on the buckling of armored hulls of light armored vehicles). *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical Engineering and CAD*, 1, 73–91. 10.20998/2079-0775.2025.1.08. [in Ukrainian].

9. Orlenko, M. O., Buravchenko, V. S., & Bisyk, S. P. (2025). Dosvid naturnykh vyprobuvan vikonnykh blokiv riznoho konstruktyvnoho skladu na udarno-khvylovu stiikist (Experience of full-scale tests of window units of different compositions for shock-wave resistance). *Strength of Materials and Theory of Structures*, 115, 383–395. 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395. [in Ukrainian].

10. Orlenko, M. O. (2026). Analysis of structural factors affecting the compliance of window units with EXR1–EXR2 classes based on field blast test results. *The Scientific Heritage*, 185, 9–15. 10.5281/zenodo.20455933. [in English].

11. DSTU EN 13123-2:2006 (EN 13123-2:2004, IDT). Vikna, dveri ta zhaliuzi. Stiikist do vybukhu. Klasyfikatsiia ta tekhnichni vymohy. Chastyna 2: Polihonne vyprobuvannia (Windows, doors and shutters. Explosion resistance. Classification and requirements. Part 2: Range test). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 2 p. [in Ukrainian].

12. DSTU EN 13124-2:2006 (EN 13124-2:2004, IDT). Vikna, dveri ta zhaliuzi. Stiikist do vybukhu. Metod vyprobuvannia. Chastyna 2: Polihonne vyprobuvannia (Windows, doors and shutters. Explosion resistance. Test method. Part 2: Range test). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 11 p. [in Ukrainian].

13. ISO 16933:2007. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification for arena air-blast loading. Geneva: International Organization for Standardization, 2007. 22 p. [in English].

14. ASTM International. Standard test method for glazing and glazing systems subject to airblast loadings (ASTM F1642/F1642M-17). West Conshohocken, 2017. 6 p. 10.1520/F1642_F1642M-17. [in English].

15. U.S. General Services Administration. Standard test method for glazing and window systems subject to dynamic overpressure loadings (GSA-TS01:2003). Washington, 2003. 6 p. [in English].

16. Swisdak M. M. Simplified Kingery airblast calculations. Minutes of the 26th DoD Explosives Safety Seminar. Maryland, 1994. 17 p. [in English].

17. Protokol vyprobuvannia No. 345-V/2023 vikon vybukhotryvkykh vid 27 veresnia 2023 r. (Test report No. 345-V/2023 on blast-resistant windows dated 27 September 2023) / Scientific Testing Department of the Research Centre for Testing, Expertise and Certification of Personal Armoured Means, National Defence University of Ukraine. 10 p. [in Ukrainian].

18. Protokol vyprobuvannia No. 796-V/2024 vikon vybukhotryvkykh vid 28 hrudnia 2024 r. (Test report No. 796-V/2024 on blast-resistant windows dated 28 December 2024) / Scientific Testing Department of the Research Centre for Testing, Expertise and Certification of Personal Armoured Means, National Defence University of Ukraine. 9 p. [in Ukrainian].

19. Protokol No. 4317/2023 vyprobuvan vikna, nadanoho TOV «Kompaniia Vikna-Star», vid 22 travnia 2023 r. (Test report No. 4317/2023 on the window provided by Vikna-Star LLC dated 22 May 2023) / Testing Laboratory of the Scientific and Engineering Centre for Testing of Protection Products and Materials LLC. 5 p. [in Ukrainian].

Буравченко Всеволод Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри архітектурних конструкцій, Київський національний університет будівництва і архітектури (КНУБА), 03680, Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31. ORCID ID: orcid.org/0000-0003-0907-3014. E-mail: buravchenko.vs@knuba.edu.ua.
Овчинніков Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID ID: 0000-0002-1194-4387. E-mail ovchynnikov7784@gmail.com.

Орленко М. О., аспірант кафедри архітектурних конструкцій, Київський національний університет будівництва і архітектури, 03680, Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9890-4520. E-mail: orlenko_mo-2022@knuba.edu.ua.

Buravchenko Vsevolod, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Architectural Structures, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine. ORCID ID: orcid.org/0000-0003-0907-3014. E-mail: buravchenko.vs@knuba.edu.ua.
Ovchynnikov Oleksandr Oleksandrovych, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-1194-4387.
E-mail: ovchynnikov7784@gmail.com.
Orlenko M. O., Postgraduate Student at the Department of Architectural Structures, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9890-4520.
E-mail: orlenko_mo-2022@knuba.edu.ua.

Дата надходження статті: 06.08.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 18.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (J7)

УДК 621.762

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ СИНТЕЗОВАНОГО ДІОКСИДУ ЦИРКОНІЮ ПІД ЧАС ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ

Д-р техн. наук Е. С. Геворкян, канд. техн. наук В. П. Нерубацький

FEATURES OF NANOCOMPOSITE FORMATION BASED ON SYNTHESIZED ZIRCONIA DURING HOT PRESSING

Doctor of Engineering Science E. S. Hevorkian,
Candidate of Engineering Science V. P. Nerubatskyi

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371330

Анотація. *Комбінованим методом сумісного осадження та гідротермального розкладання синтезовано нанокристалічні порошки складу $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$. Як вихідні компоненти використовували нітрат цирконію, ацетат ітрію та аміак як осаджувач, а для стабілізації дисперсної системи – оксиетильований нонилфенол. Встановлено, що застосування комбінованого методу синтезу забезпечує формування однорідних за складом слабкоагломерованих нанокристалічних частинок діоксиду цирконію, стабілізованого ітрієм. Дослідження фазового складу синтезованих порошків методом рентгенофазового аналізу показало утворення однофазного твердого розчину $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ із тетрагональною кристалічною ґраткою. За результатами рентгеноспектрального аналізу встановлено відповідність елементного складу синтезованого матеріалу заданому стехіометричному співвідношенню компонентів. Методом просвічувальної електронної мікроскопії встановлено, що порошок складається зі сферичних частинок розміром 3–15 нм, при цьому розмір слабкозв'язаних агломератів не перевищує 500 нм. Дослідження щільності порошків методом гелієвої пікнометрії показало, що отримані порошки мають щільність понад 90 % теоретичної, що свідчить про наявність розвиненої пористої структури та адсорбованої вологи на поверхні наночастинок. Спікання синтезованих нанопорошків відбувалося за методом гарячого пресування з прямим пропусканням струму через графітову прес-форму. На підставі результатів дилатометричних досліджень визначено оптимальні параметри гарячого пресування: температура 1200 °С і витримка 5 хв. Методами атомно-силової та растрової електронної мікроскопії встановлено формування щільної наноструктурованої кераміки із середнім розміром структурних складових 50–200 нм. Отримані керамічні зразки мають високі фізико-механічні властивості: мікротвердість становить 1408 HV, межа міцності на стиск – 2586 МПа, а відносна щільність досягає 98 % теоретичної. Показано, що використання нанокристалічних порошків, синтезованих методом сумісного осадження з подальшим гідротермальним розкладанням, сприяє формуванню однорідної тонкодисперсної структури керамічного матеріалу за знижених температур гарячого пресування.*

Ключові слова: *гідротермальний синтез, стабілізований діоксид цирконію, нанопорошки, гаряче пресування, наноструктурована кераміка, мікроструктура, тетрагональна фаза, механічні властивості.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Геворкян Е. С., Нерубацький В. П., 2026.

Abstract. *Nanocrystalline powders of the composition $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ were synthesized by a combined method of co-precipitation and hydrothermal decomposition. Zirconium nitrate, yttrium acetate, and ammonia as a precipitating agent were used as initial components, while oxyethylated nonylphenol was used to stabilize the dispersed system. It was established that the application of the combined synthesis method ensures the formation of compositionally homogeneous weakly agglomerated nanocrystalline particles of stabilized zirconium dioxide. Investigation of the phase composition of the synthesized powders by X-ray diffraction analysis showed the formation of a single-phase solid solution of $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ with a tetragonal crystal lattice. According to the results of X-ray spectral analysis, the elemental composition of the synthesized material corresponds to the specified stoichiometric ratio of the components. Transmission electron microscopy established that the powder consists of spherical particles with sizes of 3–15 nm, while the size of weakly bonded agglomerates does not exceed 500 nm. Investigation of powder density by helium pycnometry showed that the obtained powders have a density exceeding 90 % of the theoretical value, indicating the presence of a developed porous structure and adsorbed moisture on the surface of nanoparticles. Sintering of the synthesized nanopowders was carried out by hot pressing with direct current passage through a graphite die. Based on the results of dilatometric studies, the optimal hot-pressing parameters were determined: temperature of 1200 °C and holding time of 5 min. Atomic force microscopy and scanning electron microscopy methods established the formation of dense nanostructured ceramics with an average size of structural constituents of 50–200 nm. The obtained ceramic specimens are characterized by high physical and mechanical properties: the microhardness is 1408 HV, the compressive strength is 2586 MPa, and the relative density reaches 98 % of the theoretical value. It was shown that the use of nanocrystalline powders synthesized by co-precipitation followed by hydrothermal decomposition promotes the formation of a homogeneous fine-dispersed structure of the ceramic material at reduced hot-pressing temperatures.*

Keywords: *hydrothermal synthesis, stabilized zirconium dioxide, nanopowders, hot pressing, nanostructured ceramics, microstructure, tetragonal phase, mechanical properties.*

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток машинобудування, енергетики, електроніки, біомедичних технологій і високотемпературної техніки потребує створення нових керамічних матеріалів із підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками. Одним із найбільш перспективних матеріалів для таких застосувань є стабілізований діоксид цирконію, який має високу міцність, тріщиностійкість, хімічну інертність, термостійкість і біосумісність. Особливий інтерес викликають наноструктуровані керамічні матеріали на основі ZrO_2, оскільки зменшення розміру структурних елементів до нанометрового рівня дає змогу суттєво підвищити комплекс механічних властивостей і стабільність експлуатаційних характеристик. Водночас отримання високощільної наноструктурованої цирконієвої кераміки пов'язане з низкою технологічних труднощів, зокрема забезпеченням високої дисперсності порошків, запобіганням утворенню міцних агломератів та інтенсивному росту зерен під час спікання. Тому актуальним напрямом досліджень є розроблення ефективних методів синтезу слабкоагломерованих нанокристалічних порошків і вдосконалення режимів їх консолідації. Використання комбінованого методу сумісного осадження та гідротермального розкладання в поєднанні з гарячим пресуванням із прямим пропусканням струму створює передумови для формування щільної однорідної наноструктури за знижених температур спікання. У зв'язку з цим дослідження особливостей формування нанокомпозитів на основі синтезованого діоксиду цирконію є актуальним науковим і практичним завданням.

Вступ. Унікальне поєднання властивостей стабілізованого діоксиду цирконію, зокрема високої механічної міцності, в'язкості руйнування, вогнетривкості, хімічної стійкості, низької теплопровідності та біоінертності, робить його одним із найбільш затребуваних функціональних матеріалів сучасності [1–6]. Керамічні матеріали на основі ZrO_2 широко використовують у металургії, машинобудуванні, енергетиці, авіакосмічній техніці, електроніці, медицині та стоматології [7, 8]. Особливе значення стабілізований діоксид цирконію має для виготовлення теплозахисних покриттів [9, 10], ріжучого інструменту [11, 12], твердотільних паливних елементів [13, 14], кисневих сенсорів [15, 16], біомедичних імплантів [17–20] і високонавантажених конструкційних елементів [21, 22].

Встановлено, що зі зменшенням розмірів частинок до нанометрового діапазону властивості твердих тіл стають розмірозалежними. Зменшення розмірів зерен сприяє підвищенню міцності, твердості, зносостійкості, стабільності структури матеріалу [23, 24]. Отримання наноструктурованої цирконієвої кераміки з однорідною тонкодисперсною структурою є одним із найбільш перспективних шляхів підвищення комплексу її фізико-механічних характеристик. Водночас ефективність формування таких матеріалів значною мірою визначена характеристиками вихідних порошків, насамперед їхнім фазовим складом, дисперсністю, морфологією частинок і ступенем агломерації [25, 26].

Для виробництва високощільної функціональної кераміки нового покоління, а також сенсорів, акумуляторних систем, каталізаторів, сорбентів і біосумісних матеріалів необхідне отримання нанокристалічних порошків із контрольованими структурними параметрами. Одним із основних завдань при цьому є забезпечення високої гомогенності вихідних сумішей і формування слабкоагломерованих наночастинок, здатних до ефективного ущільнення під час спікання.

Серед сучасних методів консолідації нанопорошків особливий інтерес становить гаряче пресування з прямим пропусканням струму, яке дає змогу інтенсифікувати процес спікання, знизити температуру ущільнення та мінімізувати ріст зерен [27–29]. Поєднання цього методу з використанням нанокристалічних порошків, отриманих комбінованими методами синтезу, створює передумови для формування щільної наноструктурованої кераміки з високими експлуатаційними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для отримання нанокристалічного діоксиду цирконію на сьогодні використовують широкий спектр фізико-хімічних методів синтезу, серед яких осадження з розчинів, золь-гель технологія, гідротермальний синтез, плазмохімічний синтез, співосадження, механохімічна обробка та методи термічного розкладання солей [30–37]. Застосування різних технологічних підходів забезпечує отримання порошків ZrO_2 із різною морфологією, фазовим складом, ступенем агломерації та розподілом частинок за розмірами. При цьому параметри синтезу, зокрема температура, тиск, тривалість процесу та хімічний склад середовища, істотно впливають на характеристики кінцевого продукту [38–41].

Одним із найбільш перспективних методів отримання нанокристалічного діоксиду цирконію є гідротермальний синтез, який забезпечує формування високодисперсних порошків із вузьким розподілом частинок за розмірами та відносно низьким ступенем агломерації [42, 43]. Перевагою цього методу є можливість синтезу нанокристалів із контрольованою морфологією і стабілізованим фазовим складом без необхідності високотемпературного випалу. Водночас реалізація гідротермального синтезу потребує використання високих температур,

значного тиску та спеціального технологічного обладнання [44, 45].

У науковій літературі відсутній єдиний підхід щодо механізмів формування нанокристалів діоксиду цирконію в гідротермальних умовах, а також щодо оптимальних параметрів синтезу. Крім того, значну увагу приділяють проблемі агломерації наночастинок, яка негативно впливає на процес ущільнення порошків і формування однорідної структури кераміки [46, 47]. Саме тому перспективним напрямом є застосування комбінованих методів синтезу, що поєднують переваги співосадження та гідротермальної обробки.

Метод сумісного осадження забезпечує високий рівень гомогенності вихідних компонентів на молекулярному рівні, а подальше гідротермальне розкладання сприяє формуванню слабкоагломерованих нанокристалічних частинок ZrO_2 [48–51]. Використання таких порошків у поєднанні з сучасними методами консолідації, зокрема гарячим пресуванням із прямим пропусканням струму, відкриває можливість отримання щільної наноструктурованої кераміки з покращеними механічними властивостями та зниженими температурами спікання [52, 53]. Проте питання взаємозв'язку між умовами синтезу порошків, структурою матеріалу та характеристиками гарячепресованої кераміки потребують подальших досліджень.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження особливостей формування наноструктурованої кераміки на основі стабілізованого діоксиду цирконію, синтезованого комбінованим методом сумісного осадження та гідротермального розкладання, що дасть змогу встановити закономірності впливу характеристик нанопорошків і режимів гарячого пресування на структуру та фізико-механічні властивості отриманих композитів. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– синтезувати нанокристалічний порошок складу $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ і дослідити його фазовий склад, морфологію і дисперсність;

– визначити оптимальні параметри гарячого пресування на підставі дилатометричних досліджень і дослідити особливості формування структури кераміки;

– встановити фізико-механічні характеристики гарячепресованої кераміки та оцінити ефективність застосованого методу синтезу і консолідації.

Основна частина дослідження. Як вихідні матеріали для отримання нанорозмірного порошку $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ використовували нітрат цирконію $ZrO(NO_3)_2{\times}H_2O$, ацетат ітрію $Y(CH_3COO)_3{\times}H_2O$ та аміак NH_4OH як осаджувач. Як поверхнево-активну речовину використовували оксиетильований нонилфенол. Синтез порошків здійснювали комбінованим методом сумісного осадження з подальшим гідротермальним розкладанням отриманих гідроксидів.

Фазовий склад синтезованого порошку після прокалювання визначали методом рентгенофазового аналізу на дифрактометрі Rigaku Ultima IV із використанням CuKα-випромінювання та Ni-фільтра. Для визначення елементного складу матеріалу використовували рентгеноспектральний аналіз із застосуванням растрового іонно-електронного мікроскопа Quanta 200 3D. Форму та розміри частинок порошку визначали методом просвічувальної електронної мікроскопії з використанням мікроскопа JEM-2100.

Щільність синтезованих порошків і кераміки визначали методом гелієвої пікнометрії на приладі AccuPyc II 1340. Характер і температурні інтервали спікання досліджували за допомогою високотемпературного дилатометра Netzsch L75HX1550. Нагрівали в діапазоні температур 20–1550 °C зі швидкістю 20 °C/хв із витримкою 120 хв за максимальної температури.

Гаряче пресування проводили із застосуванням установки гарячого пресування з прямим пропусканням високострумового електричного струму через графітову прес-форму [54, 55]. Досліджували структуру гарячепресованої кераміки методами атомно-силової мікроскопії на мікроскопі Ntegra Aura і растрової електронної мікроскопії на мікроскопі Nova NanoSEM. Мікротвердість визначали методом Віккерса за допомогою автоматичного мікротвердоміра AFFRI DM8 за навантаження 1 кг і тривалості навантаження 15 с. Одновісні випробування на стиск проводили за кімнатної температури на випробувальній машині Instron 300LX.

За результатами рентгенофазового аналізу встановлено, що синтезований порошок є однофазним твердим розчином $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ із тетрагональною кристалічною ґраткою та просторовою групою P42/nmc (рис. 1). Параметри елементарної комірки становлять: $a = b = 3{,}6020$ Å; $c = 5{,}1790$ Å; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$. Отримані результати свідчать про формування стабілізованої тетрагональної фази діоксиду цирконію.

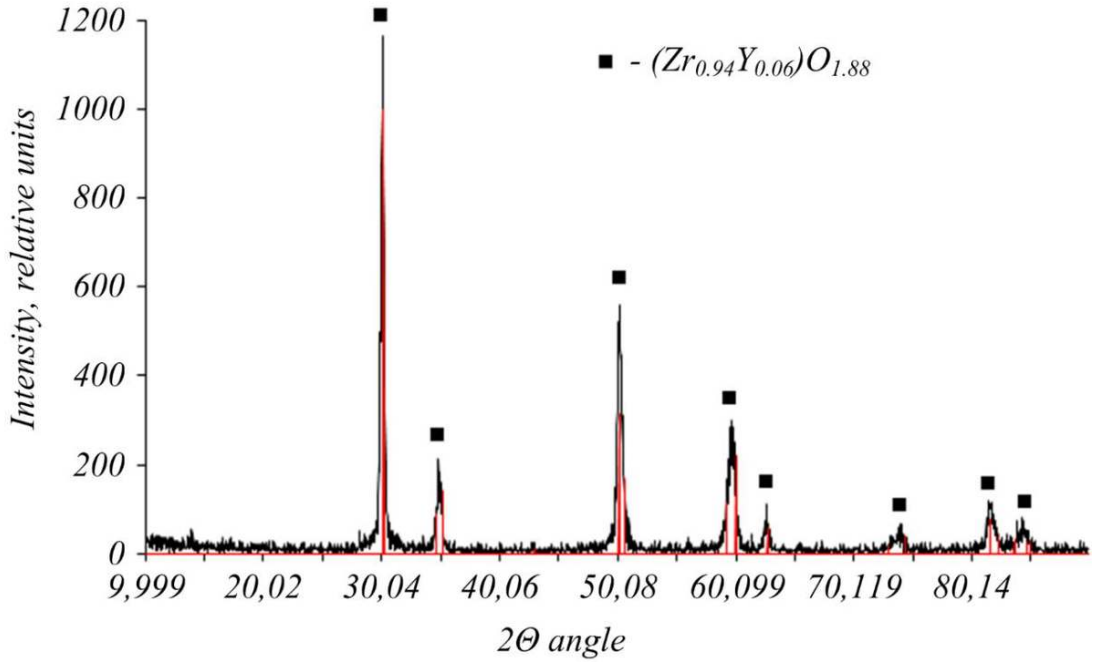


Рис. 1. Рентгенограма синтезованого порошку $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ після гідротермального розкладання спільноосаджених гідроксидів ітрію та цирконію

За даними рентгеноспектрального аналізу встановлено відповідність елементного складу синтезованого матеріалу заданому стехіометричному складу $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ (рис. 2), що підтверджує ефективність використаного методу синтезу та високу однорідність розподілу компонентів.

Дослідження порошку методом просвічувальної електронної мікроскопії показало, що синтезований матеріал складається переважно зі сферичних наночастинок розміром 3–15 нм (рис. 3). Водночас розмір слабкозв'язаних агломератів не перевищує 500 нм. Формування слабкоагломерованої структури є важливим фактором для забезпечення ефективного ущільнення порошків у процесі гарячого пресування [56, 57].

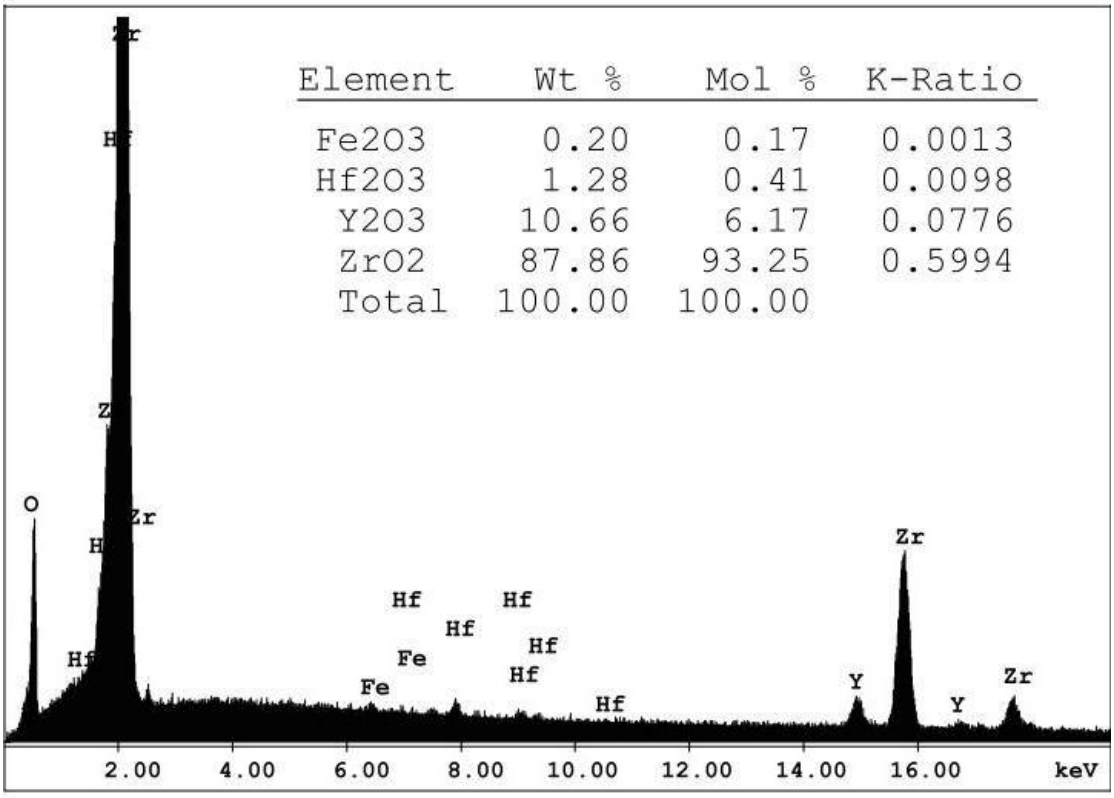
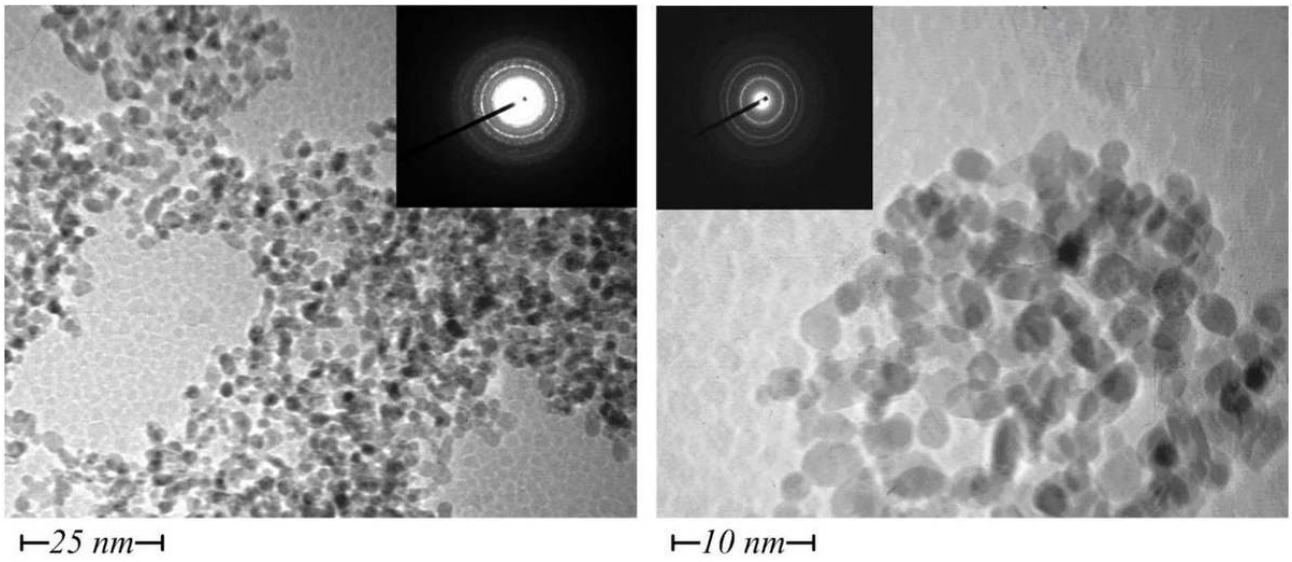


Рис. 2. EDAX аналіз порошку $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ після гідротермального розкладання спільноосаджених гідроксидів ітрію та цирконію



а *б*

Рис. 3. ПЕМ зображення синтезованих наночастинок порошку $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$: *а* – 350 °С, 250 bar; *б* – 215 °С, 100 bar

Дослідження щільності синтезованих порошків методом гелієвої пікнометрії показало, що їхня щільність перевищує 90 % теоретичної щільності діоксиду цирконію. Отримані результати свідчать про наявність розвиненої пористої структури та адсорбованої вологи на поверхні наночастинок. Пористість таких порошків формується як за рахунок проміжків між первинними наночастинками, так і внаслідок наявності замкнених пор у складі агломератів.

Характер спікання синтезованого нанорозмірного порошку $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ наведено на рис. 4.

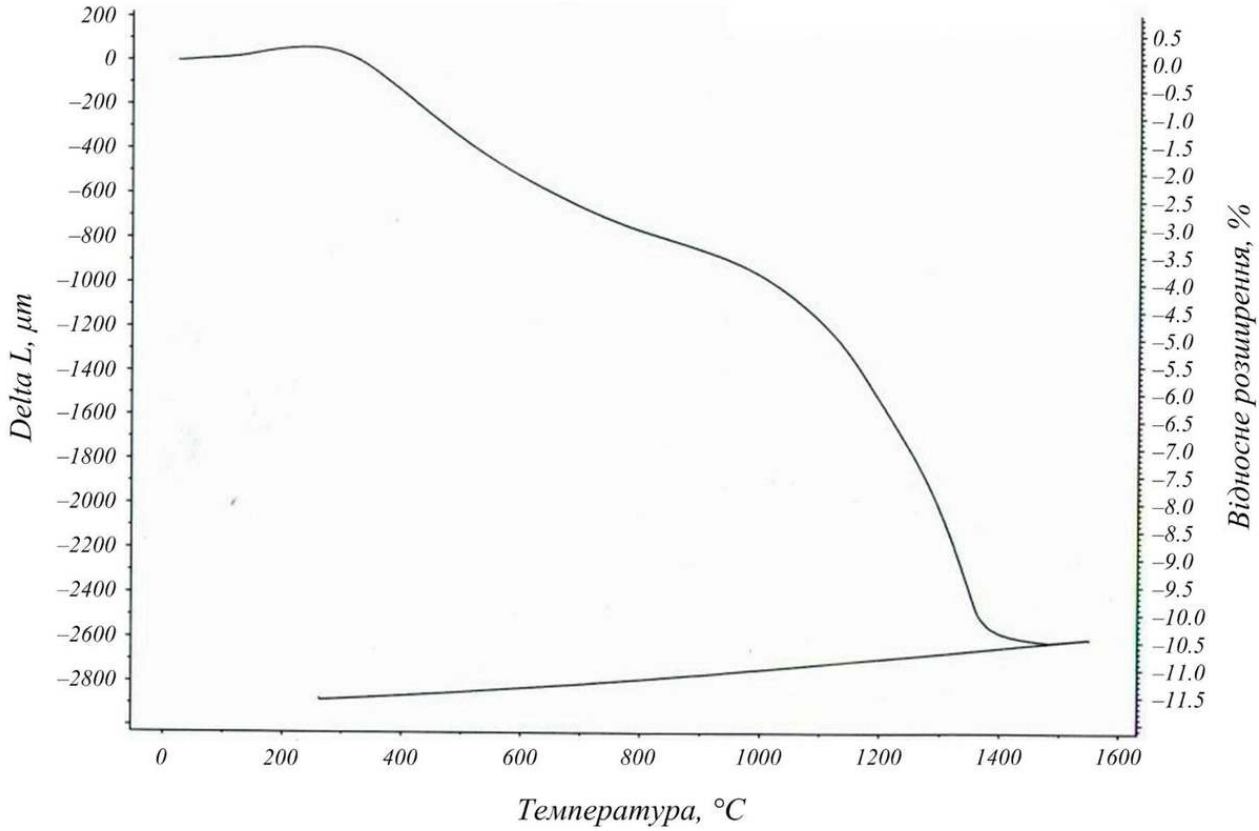
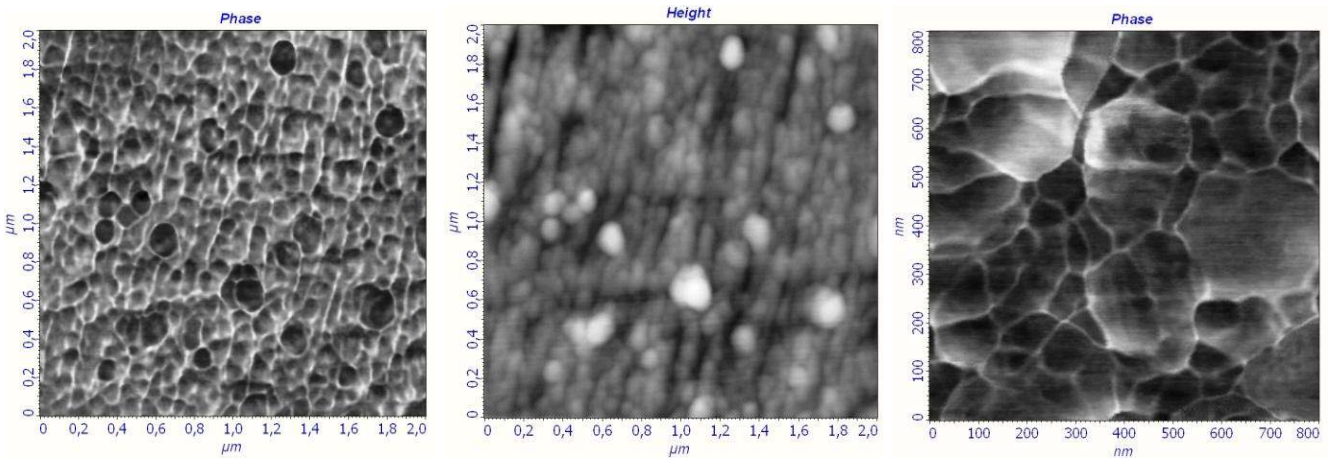


Рис. 4. Зміна геометричних розмірів компакту з нанопорошку $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ від температури

Аналіз результатів дилатометричних досліджень показав, що максимальна усадку зразків спостерігають до температури 1500 °С. При цьому усадка в інтервалі температур 1400–1500 °С становить лише близько 2 %, що свідчить про завершення основних процесів ущільнення. На підставі отриманих результатів як оптимальні параметри гарячого пресування було вибрано температуру 1200 °С, що становить приблизно 80 % температури повної усадки, і витримку 5 хв.

На рис. 5 наведено результати дослідження структури гарячепресованої кераміки $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$, отримані методом атомно-силової мікроскопії. Встановлено формування щільної наноструктурованої кераміки з однорідним розподілом структурних складових. Середній розмір структурних елементів становить 50–200 нм.



а *б* *в*

Рис. 5. АСМ зображення гарячепресованої кераміки $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ за температури 1200 °С:
а – скан 2×2 мкм (режим фазового контрасту); *б* – скан 2×2 мкм (2D режим);
в – скан 800×800 нм (режим фазового контрасту)

Результати растрової електронної мікроскопії (рис. 6) підтверджують формування щільної дрібнозернистої структури без виражених дефектів і значної міжзеренної пористості.

Результати дослідження фізико-механічних характеристик гарячепресованої кераміки наведено в таблиці. Встановлено, що отримані зразки мають високу щільність, яка досягає 98 % теоретичної, мікротвердість 1408 HV і межу міцності на стиск 2586 МПа. Отримані результати свідчать про ефективність використання нанокристалічних порошків, синтезованих методом сумісного осадження та гідротермального розкладання, для формування високощільної наноструктурованої цирконієвої кераміки.

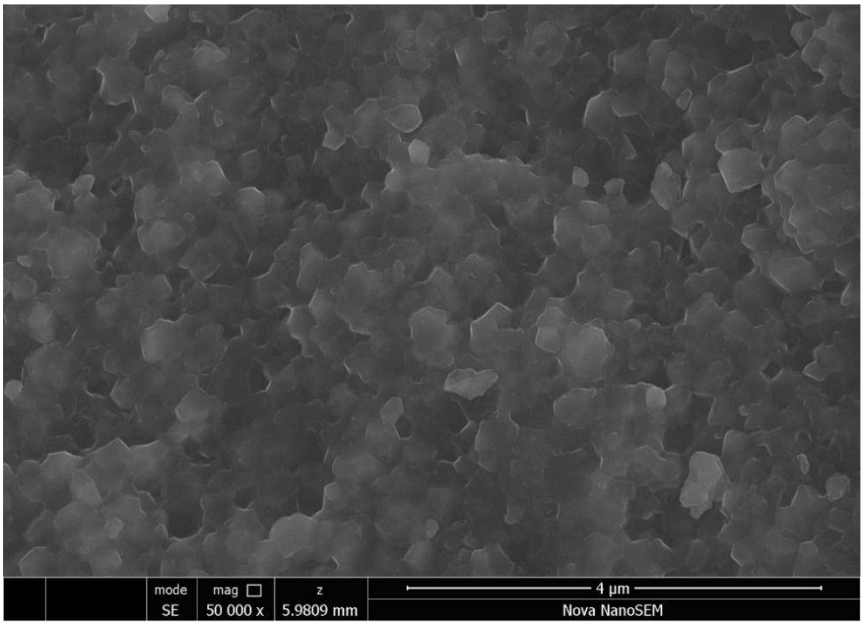


Рис. 6. РЕМ зображення гарячепресованої кераміки $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$ за температури 1200 °С

Таблиця

Результати дослідження пікнометричної щільності та механічних характеристик гарячепресованої кераміки $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$

Мікротвердість, HV	Міцність на стиск, МПа	Щільність пікнометрична, г/см^3	Щільність відносно теоретичної, %
1408	2586	6,08	98

Отже, використання комбінованого методу синтезу забезпечує високий ступінь гомогенності вихідних компонентів і формування слабкоагломерованих нанокристалічних частинок ZrO_2. Це сприяє отриманню однорідної тонкодисперсної структури композитного матеріалу в разі гарячого пресування з прямим пропусканням струму та забезпечує формування високощільної кераміки вже за температури 1200 °С.

Висновки. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– комбінованим методом сумісного осадження та гідротермального розкладання синтезовано нанокристалічний порошок складу $(Zr_{0.94}Y_{0.06})O_{1.88}$, який має однофазну тетрагональну структуру, сферичну форму частинок із розміром 3–15 нм;

– за результатами дилатометричних досліджень встановлено оптимальні параметри гарячого пресування нанопорошків: температура 1200 °С і витримка 5 хв, що забезпечують формування щільної наноструктурованої кераміки із середнім розміром структурних елементів 50–200 нм;

– встановлено, що гарячепресована кераміка має високі фізико-механічні властивості: відносна щільність становить 98 % теоретичної, мікротвердість – 1408 HV, а межа міцності на стиск – 2586 МПа, що підтверджує ефективність застосованого методу синтезу та консолідації нанокристалічних порошків діоксиду цирконію.

Фінансування. Статтю підготовлено в межах виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Науково-технологічні основи створення нанокомпозиційної кераміки поліфункціонального призначення з високими фізико-механічними властивостями за рахунок методу електроконсолідації» (ДРН 0126U002110) за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.

Список використаних джерел

1. Mamalis, A. G., Hevorkian, E. S., Nerybatskyi, V. P., Rucki, M., Krzysiak, Z., & Morozova, O. M. (2023). Effect of nanoadditives on the properties of partially stabilized zirconia. *Nanotechnology Perceptions.* Vol. 19, No. 3. P. 26–46. https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v19i3.325

2. Matsui, K., Hosoi, K., Feng, B., Yoshida, H. & Ikuhara, Y. (2023). Ultrahigh toughness zirconia ceramics. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* Vol. 120, No. 27. e2304498120. https://doi.org/10.1073/pnas.2304498120

3. Hevorkian, E. S., Morozova, O. M., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Sofronov, D. S., Moya, S., Abarrategi, A., Arnaiz, B., Bondarenko, M. A., & Vovk, R. V. (2024). Composite material based on zirconium dioxide partially stabilised with cerium oxide and aluminium oxide for bioengineering applications. *Functional Materials.* Vol. 31, No. 3. P. 351–358. https://doi.org/10.15407/fm31.03.351

4. Bapat, R. A., Yang, H. J., Chaubal, T. V., Dharmadhikari, S., Abdulla, A. M., Arora, S., Rawal, S., & Kesharwani, P. (2022). Review on synthesis, properties and multifarious therapeutic applications of nanostructured zirconia in dentistry. *RSC Advances.* Vol. 12. P. 12773–12793. https://doi.org/10.1039/D2RA00006G

5. Нерубацький, В. П., Геворкян, Е. С., Комарова, Г. Л., & Волошина, Л. В. (2025). Дослідження впливу нанодобавок на фізико-хімічні властивості частково стабілізованого діоксиду цирконію, що використовується у функціональних матеріалах транспортного призначення. *Тези доповідей 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні транспортні технології»* (Харків, УкрДУЗТ, 24–26 листопада 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ. С. 292–294.

6. Gevorkyan, E. S., Sofronov, D. S., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Morozova, O. M., Lebedynskyi, O. M., & Mateychenko, P. V. (2023). A study on the formation and sintering of powders synthesized from ZrO_2 micro- and nanoparticles from fluoride solutions. *Journal of Superhard Materials.* Vol. 45, Iss. 1. P. 31–45. https://doi.org/10.3103/S1063457623010057

7. Zhang, X., Wu, X., & Shi, J. (2020). Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review. *Journal of Materials Research and Technology.* Vol. 9, Iss. 4. P. 9029–9048. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.131

8. Motoc, A. M., Valsan, S., Slobozeanu, A. E., Corban, M., Valerini, D., Prakasam, M., Botan, M., Dragut, V., Vasile, B. S., Surdu, A. V., Trusca, R., Grill, M. L., & Piticescu, R. R. (2020). Design, fabrication, and characterization of new materials based on zirconia doped with mixed rare earth oxides: Review and first experimental results. *Metals.* Vol. 10, Iss. 6. 746. https://doi.org/10.3390/met10060746

9. Dobbins, T. A., Knight, R., & Mayo, M. J. (2003). HVOF thermal spray deposited Y_2O_3-stabilized ZrO_2 coatings for thermal barrier applications. *Journal of Thermal Spray Technology.* Vol. 12. P. 214–225. https://doi.org/10.1361/105996303770348320

10. Paz Alpuche, E., Gröger, P., Wang, X., Kroyer, T., & Fasoulas, S. (2021). Influence of the Sputtering Technique and Thermal Annealing on YSZ Thin Films for Oxygen Sensing Applications. *Coatings.* Vol. 11, Iss. 10. 1165. https://doi.org/10.3390/coatings11101165

11. Ratov, B. T., Mechnik, V. A., Bondarenko, N. A., Kolodnitskyi, V. M., Gevorkyan, E. S., Nerubaskyi, V. P., Gusmanova, A. G., Fedorov, B. V., Kaldibaev, N. A., Arshidinova, M. T., & Kulych, V. G. (2023). Features structure of the $C_{diamond}$–(WC–Co)–ZrO_2 composite fracture surface as a result of impact loading. *Journal of Superhard Materials.* Vol. 45, Iss. 5. P. 348–359. https://doi.org/10.3103/S1063457623050088

12. Ratov, B. T., Hevorkian, E., Mechnik, V. A., Bondarenko, N. A., Kolodnitskyi, V. M., Prikhna, T. O., Moshchil, V. E., Nerubaskyi, V. P., Kalzhanova, A. B., Bayamirova, R. U., Togasheva, A. R., & Sarbopeeva, M. D. (2024). Effect of the ZrO_2 content on the strength characteristics of the matrix material of $C_{diamond}$–(WC–Co) composites synthesized by spark plasma sintering. *Journal of Superhard Materials.* Vol. 46, Iss. 3. P. 175–186. https://doi.org/10.3103/S1063457624030079

13. Biswas, M., Ojha, P. K., Jayasingh, E. M., & Prasad, C. D. (2011). Synthesis of nanocrystalline yttria stabilized zirconia for SOFC. *Nanomaterials and Nanotechnology.* Vol. 1, No. 2. P. 55–58. https://doi.org/10.5772/50961

14. Manabe, K., Echigo, M., Tsuda, Y., Minami, K., Akedo, J., & Ohnishi, H. (2023). Formation of dense yttria-stabilized zirconia thin film by aerosol deposition method for metal-supported solid oxide fuel cell applications. *Journal of Chemical Engineering of Japan.* Vol. 56, Iss. 1. 2261771. https://doi.org/10.1080/00219592.2023.2261771

15. Miura, N., Sato, T., Anggraini, S. A., Ikeda, H., & Zhuiykov, S. (2014). A review of mixed-potential type zirconia-based gas sensors. *Ionics.* Vol. 20. P. 901–925. https://doi.org/10.1007/s11581-014-1140-1

16. Yan, Y., Ma, Z., Sun, J., Bu, M., Huo, Y., Wang, Z., Li, Y., & Hu, N. (2021). Surface microstructure-controlled ZrO_2 for highly sensitive room-temperature NO_2 sensors. *Nano Materials Science.* Vol. 3, Iss. 3. P. 268–275. https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.02.001

17. Yin, L., Nakanishi, Y., Alao, A.-R., Song, X.-F., Abduo, J., & Zhang, Y. (2017). A review of engineered zirconia surfaces in biomedical applications. *Procedia CIRP*. Vol. 65. P. 284–290. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.04.057

18. Han, M. K. (2024). Advances and challenges in zirconia-based materials for dental applications. *Journal of the Korean Ceramic Society.* Vol. 61. P. 783–799. https://doi.org/10.1007/s43207-024-00416-7

19. Su, G., Zhang, Y., Jin, C., Zhang, Q., Lu, J., Liu, Z., Wang, Q., Zhang, X., & Ma, J. (2023). 3D printed zirconia used as dental materials: a critical review. *Journal of Biological Engineering.* Vol. 17. 78. https://doi.org/10.1186/s13036-023-00396-y

20. Lin, H., Yin, C., & Mo, A. (2021). Zirconia based dental biomaterials: Structure, mechanical properties, biocompatibility, surface modification, and applications as implant. *Frontiers in Dental Medicine.* Vol. 2. 689198. https://doi.org/10.3389/fdmed.2021.689198

21. Нерубацький, В. П., Геворкян, Е. С., & Комарова, Г. Л. (2026). Сучасні технології створення поліфункціональної нанокераміки ZrO_2–WC для підвищення ресурсу деталей промислового обладнання і транспорту. *Матеріали 26-го Міжнар. наук.-техн. семінару «Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті»* (Київ, Асоціація технологів-машинобудівників України, 31 березня – 02 квітня 2026 р.). Київ: АТМ України; Житомир: ПП «Рута». С. 93–95.

22. Нерубацький, В. П., Геворкян, Е. С., Чишкала, В. О., & Комарова, Г. Л. (2026). Дослідження фізико-механічних властивостей нанокомпозиційної кераміки ZrO_2(3 мол.% Y_2O_3)–WC для високонавантажених вузлів машин і транспортних систем оборонного призначення. *Тези доповідей XXXIV Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD 2026»* (Харків, НТУ «ХПІ», 13–16 травня 2026 р.). Харків: НТУ «ХПІ». С. 622.

23. Meyers, M. A., Mishra, A., & Benson, D. J. (2006). Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science.* Vol. 51, Iss. 4. P. 427–556. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.08.003

24. Koch, C. C. (2003). Optimization of strength and ductility in nanocrystalline and ultrafine grained metals. *Scripta Materialia.* Vol. 49, Iss. 7. P. 657–662. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00394-4

25. Nerubatskyi, V. P., Vovk, R. V., Gevorkyan, E. S., Hordiienko, D. A., Nazyrov, Z. F., & Komarova, H. L. (2023). Investigation of phase and structural states in nanocrystalline powders based on zirconium dioxide. *Low Temperature Physics.* Vol. 49, No. 11. P. 1277–1282. https://doi.org/10.1063/10.0021374

26. Gevorkyan, E., Nerubatskyi, V., Chyshkala, V., & Morozova, O. (2021). Revealing specific features of structure formation in composites based on nanopowders of synthesized zirconium dioxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* Vol. 5, No. 12 (113). P. 6–19. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242503

27. Hevorkian, E. S., Nerubatskyi, V. P., Rucki, M., Kilikevicius, A., Mamalis, A. G., Samociuk, W., & Morozow, D. (2024). Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions.* Vol. 20, No. 1. P. 100–113. https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363

28. Krzysiak, Z., Gevorkyan, E., Nerubatskyi, V., Rucki, M., Chyshkala, V., Caban, J., & Mazur, T. (2022). Peculiarities of the phase formation during electroconsolidation of Al_2O_3–SiO_2–ZrO_2 powders mixtures. *Materials.* Vol. 15, Iss. 17. 6073. https://doi.org/10.3390/ma15176073

29. Hevorkian, E. S., Nerubaskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Lytovchenko, S. V., Prokopiv, M. M., Samociuk, W., & Mechnik, V. A. (2024). Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials.* Vol. 46, Iss. 5. P. 364–375. https://doi.org/10.3103/S1063457624050046

30. Tyagi, B., Sidhpuria, K., Shaik, B., & Vir Jasra, R. (2006). Synthesis of nanocrystalline zirconia using sol−gel and precipitation techniques. *Industrial & Engineering Chemistry Research.* Vol. 45, Iss. 25. P. 8643–8650. https://doi.org/10.1021/ie060519p

31. Chang, Y., Wang, C., Liang, T., Zhao, C., Luo, X., Guo, T., Gong, J., & Wu, H. (2015). Sol–gel synthesis of mesoporous spherical zirconia. *RSC Advances.* Vol. 5. 104629. https://doi.org/10.1039/c5ra23782c

32. Liu, L., Wang, S., Zhang, B., Jiang, G., Yang, J., Li, Y., Liu, W., Wang, J., & Kong, W. (2022). From modification to mechanism: Supercritical hydrothermal synthesis of nano-zirconia. *Ceramics International.* Vol. 48, Iss. 4. P. 4401–4423. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.028

33. Garanin, Y., Shakirzyanov, R., Borgekov, D., Kozlovskiy, A., Volodina, N., Shlimas, D., & Zdorovets M. (2024). Study of morphology, phase composition, optical properties, and thermal stability of hydrothermal zirconium dioxide synthesized at low temperatures. *Scientific Reports.* Vol. 14. 29398. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80399-x

34. Seisenbaeva, G. A., Dudarko, O. A., & Kessler, V. G. (2019). Hierarchically porous zirconia through precursor-directed large-scale synthesis. *Journal of Sol-Gel Science and Technology.* Vol. 90. P. 140–148. https://doi.org/10.1007/s10971-018-4836-2

35. Fariñas, J. C. (2025). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of nanocrystalline zirconiaSíntesis hidrotermal asistida por microondas de circona nanocristalina. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.* Vol. 64, Iss. 4. 100445. https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2025.100445

36. Biswas, M., Ojha, P. K., & Prasad, C. D. (2011). Synthesis of nanocrystalline yttria stabilized zirconia for SOFC. *Nanomaterials and Nanotechnology.* Vol. 1. https://doi.org/10.5772/50961

37. Tahmasebpour, M., Babaluo, A. A., & Razavi Aghjeh, M. K. (2008). Synthesis of zirconia nanopowders from various zirconium salts via polyacrylamide gel method. *Journal of the European Ceramic Society.* Vol. 28, Iss. 4. P. 773–778. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.018

38. Yang, C., Jin, Z., Chen, X., Fan, J., Qiu, M., Fu, K., & Fan, Y. (2021). Modified wet chemical method synthesis of nano-ZrO_2 and its application in preparing membranes. *Ceramics International.* Vol. 47, Iss. 10, Part A. P. 13432–13439. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.201

39. Bumajdad, A., Nazeer, A. A., Al Sagheer, F., Nahar, S., & Zaki, M. I. (2018). Controlled synthesis of ZrO_2 nanoparticles with tailored size, morphology and crystal phases via organic/inorganic hybrid films. *Scientific Reports.* Vol. 8. 3695. https://doi.org/10.1038/s41598-018-22088-0

40. Stolzenburg, P., Freytag, A., Bigall, N. C., & Garnweitner, G. (2016). Fractal growth of ZrO_2 nanoparticles induced by synthesis conditions. *CrystEngComm.* Vol. 18. P. 8396–8405. https://doi.org/10.1039/C6CE01916A

41. Foo, Y. T., Abdullah, A. Z., Horri, B. A., & Salamatinia, B. (2019). Optimised co-precipitation synthesis condition for oxalate-derived zirconia nanoparticles. *Ceramics International.* Vol. 45, Iss. 17, Part B. P. 22930–22939. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.336

42. Piticescu, R., Monty, C., & Millers, D. (2005). Hydrothermal synthesis of nanostructured zirconia materials: Present state and future prospects. *Sensors and Actuators B: Chemical.* Vol. 109, Iss. 1. P. 102–106. https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.03.092

43. Alresheedi, F. (2025). Hydrothermal sol–gel synthesis of zirconium dioxide (ZrO_2) nanoparticles for enhanced degradation of Congo Red. *Results in Physics.* Vol. 79. 108521. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108521

44. Li, Q., Wang, Z., & Wang, X. (2023). CFD–PBM simulation for continuous hydrothermal flow synthesis of zirconia nanoparticles in a confined impinging jet reactor. *Materials.* Vol. 16, Iss. 9. 3421. https://doi.org/10.3390/ma16093421

45. Itagaki, Y., Takemoto, M., Murata, H., Kanzawa, T., Tokudome, Y., & Nakahira, A. (2022). Supercritical hydrothermal synthesis of zirconia nanoparticles from zirconium basic carbonate. *Journal of the Ceramic Society of Japan.* Vol. 130, Iss. 11. P. 861–866. https://doi.org/10.2109/jcersj2.22083

46. Liu, S., Wang, J., Chen, Y., Song, Z., Han, B., Wu, H., Zhang, T., & Liu, M. (2023). Tetragonal nanosized zirconia: Hydrothermal synthesis and its performance as a promising ceramic reinforcement. *Inorganics.* Vol. 11, Iss. 5. 217. https://doi.org/10.3390/inorganics11050217

47. Pyda, W., Haberko, K., & Bułko, M. M. (1991). Hydrothermal crystallization of zirconia and zirconia solid solutions. *The American Ceramic Society.* Vol. 74, Iss. 10. P. 2622–2629. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb06810.x

48. Dell'Agli, G., Mascolo, G., Mascolo, M. C., & Pagliuca, C. (2006). Weakly-agglomerated nanocrystalline $(ZrO_2)_{0.9}(Yb_2O_3)_{0.1}$ powders hydrothermally synthesized at low temperature. *Solid State Sciences.* Vol. 8, Iss. 9. P. 1046–1050. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2006.03.009

49. Zhang, Y.-W., Sun, X., Xu, G., Tian, S.-J., Liao, C.-S., & Yan, C.-H. (2003). Co-doping effects of Y^{3+} and Sc^{3+} on the crystal structures, nanoparticle properties and electrical behavior of ZrO_2 solid solutions prepared by a mild urea-based hydrothermal method. *Physical Chemistry Chemical Physics.* Vol. 5, Iss. 10. P. 2129–2134. https://doi.org/10.1039/b301074k

50. Dudnik, E. V., Shevchenko, A. V., Ruban, A. K., Red'ko, V. P., & Lopato, L. M. (2010). Effect of Al_2O_3 on the properties of nanocrystalline ZrO_2 + 3 mol % Y_2O_3 powder. *Inorganic Materials.* Vol. 46. P. 172–176. https://doi.org/10.1134/S0020168510020159

51. Garg, N., Mittal, V. K., Bera, S., Dasgupta, A., & Sankaralingam, V. (2012). Preparation and characterization of tetragonal dominant nanocrystalline ZrO_2 obtained via direct precipitation. *Ceramics International.* Vol. 38, Iss. 3. P. 2507–2512. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.11.020

52. Mamalis, A., Hevorkian, E., Nerubatskyi, V., Krzysiak, Z., Morozova, O., & Chalko, L. (2023). Peculiarities of obtaining nanostructured materials compacted by the method of hot pressing due to the passage of direct electric current. *Book of Abstracts of the of the 12th Japanese-Mediterranean Workshop Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'12)* (Batumi, Ajara Autonomous Republic, Batumi Shota Rustaveli State University, July 17–20, 2023). P. 66–67.

53. Gevorkyan, E., Morozova, O., Chyshkala, V., & Nerubatskyi, V. (2023). Nanostructured materials compacted via hot pressing method by direct current transmission. *Book of Abstracts of the 8th International Materials Science Conference HighMatTech-2023* (Kyiv, October 2–6, 2023). P. 38.

54. Hevorkian, E., Samociuk, W., Rucki, M., Krzysiak, Z., Pieniak, D., Nerubatskyi, V., Chyshkala, V., Lytovchenko, S., Chalko, L., Morozow, D., Caban, J., & Kulich, V. (2025). Microstructure and properties of binderless μWC obtained using the electroconsolidation method. *Materials.* Vol. 18, Iss. 20. 4646. https://doi.org/10.3390/ma18204646

55. Hevorkian, E., Michalczewski, R., Rucki, M., Sofronov, D., Osuch-Słomka, E., Nerubatskyi, V., Krzysiak, Z., & Latosińska, J. N. (2024). Effect of the sintering parameters on the structure and mechanical properties of zirconia-based ceramics. *Ceramics International.* Vol. 50, Iss. 19, Part A. P. 35226–35235. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.06.331

56. Kocjan, A., Logar, M., & Shen, Z. (2017). The agglomeration, coalescence and sliding of nanoparticles, leading to the rapid sintering of zirconia nanoceramics. *Scientific Reports.* Vol. 7. 2541. https://doi.org/10.1038/s41598-017-02760-7

57. Fan, J., Liu, D., Zhao, K., Liu, J., & An, L. (2023). Densification kinetics and mechanism of zirconia ceramics via hot oscillating pressing. *Open Ceramics.* Vol. 13. 100323. https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100323

Reference

1. Mamalis, A. G., Hevorkian, E. S., Nerybatskyi, V. P., Rucki, M., Krzysiak, Z., & Morozova O. M. (2023). Effect of nanoadditives on the properties of partially stabilized zirconia. *Nanotechnology Perceptions*, *19* (3), 26–46. https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v19i3.325

2. Matsui, K., Hosoi, K., Feng, B., Yoshida, H., & Ikuhara, Y. (2023). Ultrahigh toughness zirconia ceramics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *120* (27), e2304498120. https://doi.org/10.1073/pnas.2304498120

3. Hevorkian, E. S., Morozova, O. M., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Sofronov, D. S., Moya, S., Abarrategi, A., Arnaiz, B., Bondarenko, M. A., & Vovk R. V. (2024). Composite material based on zirconium dioxide partially stabilised with cerium oxide and aluminium oxide for bioengineering applications. *Functional Materials*, *3 1*(3), 351–358. https://doi.org/10.15407/fm31.03.351

4. Bapat, R. A., Yang, H. J., Chaubal, T. V., Dharmadhikari, S., Abdulla, A. M., Arora, S., Rawal, S., & Kesharwani, P. (2022). Review on synthesis, properties and multifarious therapeutic applications of nanostructured zirconia in dentistry. *RSC Advances*, *12*, 12773–12793. https://doi.org/10.1039/D2RA00006G

5. Nerubatskyi, V. P., Hevorkian, E. S., Komarova, H. L., & Voloshyna, L. V. (2025). Doslidzhennia vplyvu nanodobavok na fizyko-khimichni vlastyvosti chastkovo stabilizovanoho dioksydu tsyrkoniiu, shcho vykorystovuietsia u funktsionalnykh materialakh transportnoho pryznachennia [Study of the effect of nanoadditives on the physicochemical properties of partially stabilized zirconium dioxide used in functional materials for transport applications]. Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference «*Intelligent Transport Technologies*» (Kharkiv, USURT, November 24–26, 2025). Kharkiv: USURT. 292–294 [in Ukrainian].

6. Gevorkyan, E. S., Sofronov, D. S., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Morozova, O. M., Lebedynskyi, O. M., & Mateychenko, P. V. (2023). A study on the formation and sintering of powders synthesized from ZrO_2 micro- and nanoparticles from fluoride solutions. *Journal of Superhard Materials*, *45* (1), 31–45. https://doi.org/10.3103/S1063457623010057

7. Zhang, X., Wu, X., & Shi, J. (2020). Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review. *Journal of Materials Research and Technology*, *9* (4), 9029–9048. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.131

8. Motoc, A. M., Valsan, S., Slobozeanu, A. E., Corban, M., Valerini, D., Prakasam, M., Botan, M., Dragut, V., Vasile, B. S., Surdu, A. V., Trusca, R., Grilli, M. L., & Piticescu, R. R. (2020). Design, fabrication, and characterization of new materials based on zirconia doped with mixed rare earth oxides: Review and first experimental results. *Metals*, *10* (6), 746. https://doi.org/10.3390/met10060746

9. Dobbins, T. A., Knight, R., & Mayo, M. J. (2003). HVOF thermal spray deposited Y_2O_3-stabilized ZrO_2 coatings for thermal barrier applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, *12*, 214–225. https://doi.org/10.1361/105996303770348320

10. Paz Alpuche, E., Gröger, P., Wang, X., Kroyer, T., & Fasoulas, S. (2021). Influence of the Sputtering Technique and Thermal Annealing on YSZ Thin Films for Oxygen Sensing Applications.

Coatings, *11* (10), 1165. https://doi.org/10.3390/coatings11101165

11. Ratov, B. T., Mechnik, V. A., Bondarenko, N. A., Kolodnitskyi, V. M., Gevorkyan, E. S., Nerubaskyi, V. P., Gusmanova, A. G., Fedorov, B. V., Kaldibaev, N. A., Arshidinova, M. T., & Kulych, V. G. (2023). Features structure of the $C_{diamond}$–(WC–Co)–ZrO_2 composite fracture surface as a result of impact loading. *Journal of Superhard Materials*, *45* (5), 348–359. https://doi.org/10.3103/S1063457623050088

12. Ratov, B. T., Hevorkian, E., Mechnik, V. A., Bondarenko, N. A., Kolodnitskyi, V. M., Prikhna, T. O., Moshchil, V. E., Nerubaskyi, V. P., Kalzhanova, A. B., Bayamirova, R. U., Togasheva, A. R., & Sarbopeeva, M. D. (2024). Effect of the ZrO_2 content on the strength characteristics of the matrix material of $C_{diamond}$–(WC–Co) composites synthesized by spark plasma sintering. *Journal of Superhard Materials*, *46* (3), 175–186. https://doi.org/10.3103/S1063457624030079

13. Biswas, M., Ojh, P. K., Jayasingh, E. M., & Prasad, C. D. (2011). Synthesis of nanocrystalline yttria stabilized zirconia for SOFC. *Nanomaterials and Nanotechnology*, *1* (2), 55–58. https://doi.org/10.5772/50961

14. Manabe, K., Echigo, M., Tsuda, Y., Minami, K., Akedo, J., & Ohnishi, H. (2023). Formation of dense yttria-stabilized zirconia thin film by aerosol deposition method for metal-supported solid oxide fuel cell applications. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, *56* (1), 2261771. https://doi.org/10.1080/00219592.2023.2261771

15. Miura, N., Sato, T., Anggraini, S. A., Ikeda, H., & Zhuiykov, S. (2014). A review of mixed-potential type zirconia-based gas sensors. *Ionics*, *20*, 901–925. https://doi.org/10.1007/s11581-014-1140-1

16. Yan, Y., Ma, Z., Sun, J., Bu, M., Huo, Y., Wang, Z., Li, Y., & Hu, N. (2021). Surface microstructure-controlled ZrO_2 for highly sensitive room-temperature NO_2 sensors. *Nano Materials Science*, *3* (3), 268–275. https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.02.001

17. Yin, L., Nakanishi, Y., Alao, A.-R., Song, X.-F., Abduo, J., & Zhang, Y. (2017). A review of engineered zirconia surfaces in biomedical applications. *Procedia CIRP*, *65*, 284–290. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.04.057

18. Han, M. K. (2024). Advances and challenges in zirconia-based materials for dental applications. *Journal of the Korean Ceramic Society*, *61*, 783–799. https://doi.org/10.1007/s43207-024-00416-7

19. Su, G., Zhang, Y., Jin, C., Zhang, Q., Lu, J., Liu, Z., Wang, Q., Zhang, X., & Ma, J. (2023). 3D printed zirconia used as dental materials: a critical review. *Journal of Biological Engineering*, *17*, 78. https://doi.org/10.1186/s13036-023-00396-y

20. Lin, H., Yin, C., & Mo, A. (2021). Zirconia based dental biomaterials: Structure, mechanical properties, biocompatibility, surface modification, and applications as implant. *Frontiers in Dental Medicine*, *2*, 689198. https://doi.org/10.3389/fdmed.2021.689198

21. Nerybatskyi, V. P., Hevorkian, E. S., & Komarova, H. L. (2026). Suchasni tekhnolohii stvorennia polifunktsionalnoi nanokeramiky ZrO_2–WC dlia pidvyshchennia resursu detalei promyslovoho obladnannia i transport [Modern technologies for the fabrication of multifunctional ZrO_2–WC nanoceramics to improve the service life of industrial equipment and transport components]. Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Seminar *«Current Issues of Production and Repair in Industry and Transport»* (Kyiv, Association of Mechanical Engineering Technologists of Ukraine, March 31 – April 02, 2026). Kyiv: Association of Mechanical Engineering Technologists of Ukraine; Zhytomyr: PE «Ruta». 93–95 [in Ukrainian].

22. Nerubatskyi, V. P., Hevorkian, E. S., Chyshkala, V. O., & Komarova, H. L. (2026). Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei nanokompozytsiinoi keramiky ZrO_2(3 mol.% Y_2O_3)–WC dlia vysokonavantazhenykh vuzliv mashyn i transportnykh system

oboronnoho pryznachennia [Study of the physicomechanical properties of ZrO_2(3 mol.% Y_2O_3)–WC nanocomposite ceramics for highly loaded units of machines and defense transport systems]. Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference *«Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health. MicroCAD 2026»* (Kharkiv, NTU «KhPI», May 13–16, 2026). Kharkiv: NTU «KhPI». 622 [in Ukrainian].

23. Meyers, M. A., Mishra, A., & Benson, D. J. (2006). Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, *51* (4), 427–556. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.08.003

24. Koch, C. C. (2003). Optimization of strength and ductility in nanocrystalline and ultrafine grained metals. *Scripta Materialia*, *49* (7), 657–662. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00394-4

25. Nerubatskyi, V. P., Vovk, R. V., Gevorkyan, E. S., Hordiienko, D. A., Nazyrov, Z. F., & Komarova, H. L. (2023). Investigation of phase and structural states in nanocrystalline powders based on zirconium dioxide. *Low Temperature Physics*, *49* (11), 1277–1282. https://doi.org/10.1063/10.0021374

26. Gevorkyan, E., Nerubatskyi, V., Chyshkala, V., & Morozova, O. (2021). Revealing specific features of structure formation in composites based on nanopowders of synthesized zirconium dioxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *5* (12(113)), 6–19. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242503

27. Hevorkian, E. S., Nerubatskyi, V. P., Rucki, M., Kilikevicius, A., Mamalis, A. G., Samociuk, W., & Morozow, D. (2024). Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*, *20* (1), 100–113. https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363

28. Krzysiak, Z., Gevorkyan, E., Nerubatskyi, V., Rucki, M., Chyshkala, V., Caban, J., & Mazur, T. (2022). Peculiarities of the phase formation during electroconsolidation of Al_2O_3–SiO_2–ZrO_2 powders mixtures. *Materials*, *15* (17), 6073. https://doi.org/10.3390/ma15176073

29. Hevorkian, E. S., Nerubaskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Lytovchenko, S. V., Prokopiv, M. M., Samociuk, W., & Mechnik, V. A. (2024). Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*, *46* (5), 364–375. https://doi.org/10.3103/S1063457624050046

30. Tyagi, B., Sidhpuria, K., Shaik, B., & Vir Jasra, R. (2006). Synthesis of nanocrystalline zirconia using sol−gel and precipitation techniques. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *45* (25), 8643–8650. https://doi.org/10.1021/ie060519p

31. Chang, Y., Wang, C., Liang, T., Zhao, C., Luo, X., Guo, T., Gong, J., & Wu, H. (2015). Sol–gel synthesis of mesoporous spherical zirconia. *RSC Advances*, *5*, 104629. https://doi.org/10.1039/c5ra23782c

32. Liu, L., Wang, S., Zhang, B., Jiang, G., Yang, J., Li, Y., Liu, W., Wang, J., & Kong, W. (2022). From modification to mechanism: Supercritical hydrothermal synthesis of nano-zirconia. *Ceramics International*, *48* (4), 4401–4423. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.028

33. Garanin, Y., Shakirzyanov, R., Borgekov, D., Kozlovskiy, A., Volodina, N., Shlimas, D., & Zdorovets, M. (2024). Study of morphology, phase composition, optical properties, and thermal stability of hydrothermal zirconium dioxide synthesized at low temperatures. *Scientific Reports*, *14*, 29398. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80399-x

34. Seisenbaeva, G. A., Dudarko, O. A., & Kessler, V. G. (2019). Hierarchically porous zirconia through precursor-directed large-scale synthesis. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, *90*, 140–148. https://doi.org/10.1007/s10971-018-4836-2

35. Fariñas, J. C. (2025). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of nanocrystalline zirconiaSíntesis hidrotermal asistida por microondas de circona nanocristalina. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, *64* (4), 100445. https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2025.100445

36. Biswas, M., Ojha, P. K., & Prasad, C. D. (2011). Synthesis of nanocrystalline yttria stabilized zirconia for SOFC. *Nanomaterials and Nanotechnology*, *1*. https://doi.org/10.5772/50961

37. Tahmasebpour, M., Babaluo, A. A., & Razavi Aghjeh, M. K. (2008). Synthesis of zirconia nanopowders from various zirconium salts via polyacrylamide gel method. *Journal of the European Ceramic Society*, *28* (4), 773–778. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.018

38. Yang, C., Jin, Z., Chen, X., Fan, J., Qiu, M., Fu, K., & Fan, Y. (2021). Modified wet chemical method synthesis of nano-ZrO_2 and its application in preparing membranes. *Ceramics International*, *47* (10(A)), 13432–13439. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.201

39. Bumajdad, A., Nazeer, A. A., Al Sagheer, F., Nahar, S., & Zaki, M. I. (2018). Controlled synthesis of ZrO_2 nanoparticles with tailored size, morphology and crystal phases via organic/ inorganic hybrid films. *Scientific Reports*, *8*, 3695. https://doi.org/10.1038/s41598-018-22088-0

40. Stolzenburg, P., Freytag, A., Bigall, N. C., & Garnweitner, G. (2016). Fractal growth of ZrO_2 nanoparticles induced by synthesis conditions. *CrystEngComm*, *18*, 8396–8405. https://doi.org/10.1039/C6CE01916A

41. Foo, Y. T., Abdullah, A. Z., Horri, B. A., & Salamatinia, B. (2019). Optimised co-precipitation synthesis condition for oxalate-derived zirconia nanoparticles. *Ceramics International*, *45* (17(B)), 22930–22939. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.336

42. Piticescu, R., Monty, C., & Millers, D. (2005). Hydrothermal synthesis of nanostructured zirconia materials: Present state and future prospects. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *109* (1), 102–106. https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.03.092

43. Alresheedi, F. (2025). Hydrothermal sol–gel synthesis of zirconium dioxide (ZrO_2) nanoparticles for enhanced degradation of Congo Red. *Results in Physics*, *79*, 108521. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108521

44. Li, Q., Wang, Z., & Wang, X. (2023). CFD–PBM simulation for continuous hydrothermal flow synthesis of zirconia nanoparticles in a confined impinging jet reactor. *Materials*, *16* (9), 3421. https://doi.org/10.3390/ma16093421

45. Itagaki, Y., Takemoto, M., Murata, H., Kanzawa, T., Tokudome, Y., & Nakahira, A. (2022). Supercritical hydrothermal synthesis of zirconia nanoparticles from zirconium basic carbonate. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, *130* (11), 861–866. https://doi.org/10.2109/jcersj2.22083

46. Liu, S., Wang, J., Chen, Y., Song, Z., Han, B., Wu, H., Zhang, T., & Liu, M. (2023). Tetragonal nanosized zirconia: Hydrothermal synthesis and its performance as a promising ceramic reinforcement. *Inorganics*, *11* (5), 217. https://doi.org/10.3390/inorganics11050217

47. Pyda, W., Haberko, K., & Bułko, M. M. (1991). Hydrothermal crystallization of zirconia and zirconia solid solutions. *The American Ceramic Society*, *74* (10), 2622–2629. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb06810.x

48. Dell'Agli, G., Mascolo, G., Mascolo, M. C., & Pagliuca, C. (2006). Weakly-agglomerated nanocrystalline $(ZrO_2)_{0.9}(Yb_2O_3)_{0.1}$ powders hydrothermally synthesized at low temperature. *Solid State Sciences*, *8* (9), 1046–1050. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2006.03.009

49. Zhang, Y.-W., Sun, X., Xu, G., Tian, S.-J., Liao, C.-S., & Yan, C.-H. (2003). Co-doping effects of Y^{3+} and Sc^{3+} on the crystal structures, nanoparticle properties and electrical behavior of ZrO_2 solid solutions prepared by a mild urea-based hydrothermal method. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *5* (10), 2129–2134. https://doi.org/10.1039/b301074k

50. Dudnik, E. V., Shevchenko, A. V., Ruban, A. K., Red'ko, V. P., & Lopato, L. M. (2010). Effect of Al_2O_3 on the properties of nanocrystalline ZrO_2 + 3 mol % Y_2O_3 powder. *Inorganic Materials*, *46*, 172–176. https://doi.org/10.1134/S0020168510020159

51. Garg, N., Mittal, V. K., Bera, S., Dasgupta, A., & Sankaralingam, V. (2012). Preparation and characterization of tetragonal dominant nanocrystalline ZrO_2 obtained via direct precipitation.

Ceramics International, *38* (3), 2507–2512. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.11.020

52. Mamalis, A., Hevorkian, E., Nerubatskyi, V., Krzysiak, Z., Morozova, O., & Chalko, L. (2023). Peculiarities of obtaining nanostructured materials compacted by the method of hot pressing due to the passage of direct electric current. Book of Abstracts of the of the *12th Japanese-Mediterranean Workshop Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'12)* (Batumi, Ajara Autonomous Republic, Batumi Shota Rustaveli State University, July 17–20, 2023). 66–67.

53. Gevorkyan, E., Morozova, O., Chyshkala, V., & Nerubatskyi, V. (2023). Nanostructured materials compacted via hot pressing method by direct current transmission. Book of Abstracts of the *8th International Materials Science Conference HighMatTech-2023* (Kyiv, October 2–6, 2023). 38.

54. Hevorkian, E., Samociuk, W., Rucki, M., Krzysiak, Z., Pieniak, D., Nerubatskyi, V., Chyshkala, V., Lytovchenko, S., Chalko, L., Morozow, D., Caban, J., & Kulich, V. (2025). Microstructure and properties of binderless μWC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*, *18* (20), 4646. https://doi.org/10.3390/ma18204646

55. Hevorkian, E., Michalczewski, R., Rucki, M., Sofronov, D., Osuch-Słomka, E., Nerubatskyi, V., Krzysiak, Z., & Latosińska, J. N. (2024). Effect of the sintering parameters on the structure and mechanical properties of zirconia-based ceramics. *Ceramics International*, *50* (19(A)), 35226–35235. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.06.331

56. Kocjan, A., Logar, M., & Shen, Z. (2017). The agglomeration, coalescence and sliding of nanoparticles, leading to the rapid sintering of zirconia nanoceramics. *Scientific Reports*, *7*, 2541. https://doi.org/10.1038/s41598-017-02760-7

57. Fan, J., Liu, D., Zhao, K., Liu, J., & An, L. (2023). Densification kinetics and mechanism of zirconia ceramics via hot oscillating pressing. *Open Ceramics*, *13*, 100323. https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100323

Геворкян Едвін Спартакович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.
Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Hevorkian Edvin Spartakovych, Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Wagon Engineering and Product Quality Department, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.
Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Дата надходження статті: 20.06.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 656.2

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ВАГОНОПОТОКІВ ШЛЯХОМ УРАХУВАННЯ КАТЕГОРІЙНОСТІ ПОЇЗДІВ ПРИ РОЗРАХУНКУ ПЛАНУ ФОРМУВАННЯ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

Канд. техн. наук В. М. Прохоров, д-р техн. наук Л. А. Пархоменко,
канд. техн. наук Т. Ю. Калашнікова, асп. О. В. Кофанов

INCREASING WAGON FLOW ROUTING BY CONSIDERING TRAIN CATEGORIZATION IN THE TRAIN FORMATION PLAN CALCULATION UNDER DIGITALIZATION CONDITIONS

PhD (Tech.) V. Prokhorov, D.Sc (Tech.) L. Parkhomenko,
PhD (Tech.) T. Kalashnikova, postgrad. O. Kofanov

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371336

Анотація. *Статтю присвячено підвищенню маршрутизації вагонопотоків в умовах цифровізації залізничного транспорту за рахунок виявлення внутрішніх технологічних резервів. Запропоновано модифіковану модель розрахунку плану формування поїздів (ПФП), яка інтегрує диференціацію дільничних швидкостей наскрізних і дільничних поїздів безпосередньо в оптимізаційний алгоритм. Моделювання на розгалуженому полігоні довело, що пряме врахування категорійності поїздів підвищує адекватність розрахунків, забезпечує зміну структури маршрутизації та чисту економію приведених вагоно-годин на рівні 4,5 %. Цей ефект досягнуто навіть за мінімально прийнятої різниці швидкостей у 5 %, хоча в реальних умовах експлуатації ця розбіжність є значно вищою. Розроблений підхід рекомендовано для систем оперативного планування.*

Ключові слова: *маршрутизація вагонопотоків, план формування поїздів, категорійність поїздів, диференціація дільничних швидкостей, цифровізація.*

Abstract. *The paper addresses the urgent scientific and practical task of improving freight transportation efficiency and expanding the scope of wagon flow routing across railway networks. Methodological principles for calculating the train formation plan (TFP) frequently rely on simplified classical models aimed exclusively at minimizing station accumulation and processing costs, thereby neglecting complex section movement kinematics. This study demonstrates that a significant potential for increasing transportation efficiency lies in accounting for train categorization and section speed differentiation within automated management systems. The proposed approach integrates the difference in section speeds of through and local freight trains directly into the structure of the mathematical objective function during the automated optimization stage, rather than utilizing it as an isolated post-factum adjustment, allowing a more accurate reflection of modern railway infrastructure operations.*

To evaluate the practical feasibility of the developed mathematical apparatus, comprehensive simulation modeling was performed on a network railway polygon using an advanced calculation method specifically designed for branched infrastructure structures. This advanced method enabled precise tracking of wagon flow distribution across multiple interconnected routes. As baseline inputs for the predictive modeling, section speeds were set at 47.5 km/h for through trains and 45 km/h for local

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Прохоров В. М., Пархоменко Л. А., Калашнікова Т. Ю., Кофанов О. В., 2026.

trains, representing a conservative 5 % difference, whereas retrospective analysis of stable operational periods in Ukraine shows actual variations from 50 km/h to 70 km/h and higher. The locomotive-hour to wagon-hour equivalence coefficient was fixed at 375 to ensure precise technological balancing within the objective function.

The digital simulation yielded two distinct TFP variants: the baseline approach resulted in 16 train formation destinations, while the speed-differentiated model expanded the plan to 17 optimal destinations. Comparative analysis demonstrates that post-factum adjustment of a pre-calculated plan provides only nominal cost reductions. In contrast, direct proactive integration of train categorization into the optimization algorithm substantially alters the routing structure, ensuring a net technological savings of 4. 5% in total equivalent wagon-hour expenditures. The experimental results prove that speed differentiation during automated calculation brings operational estimates closer to real conditions and uncovers internal capacity reserves. Under ongoing industry digitalization, the dynamic determination of these parameters will further enhance calculation accuracy and TFP quality, making the developed algorithm highly recommended for modern transportation planning systems.

Keywords: *wagon flow routing, train formation plan, train categorization, section speed differentiation, digitalization of railway transport.*

Вступ. Ефективність організації перевізного процесу на залізничному транспорті в сучасних умовах потребує безперервного пошуку додаткових внутрішніх резервів та оптимізації використання наявних технічних засобів. Тривалий час у сфері розрахунку плану формування поїздів не спостерігають істотного методологічного поступу, а чинні розрахункові моделі залишаються практично незмінними, базуючись на класичних принципах мінімізації витрат вагоно-годин лише на станційне накопичення та переробку. Проте такий спрощений підхід залишає поза увагою значний масив експлуатаційних факторів і резервів, пов’язаних безпосередньо з рухом поїздів і динамікою зміни їхніх параметрів на дільницях. Наявність суттєвого потенціалу для підвищення ефективності перевезень криється у врахуванні багатьох досі не інтегрованих у розрахунки факторів, нелінійності процесів диференціації деяких режимів, які раніше не враховували і не виділяли окремо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема розвитку методів і моделей розрахунку ПФП теоретично залишається актуальною вже не перше десятиліття. Однак останніми роками спостерігають підвищення інтересу до цієї теми. Аналіз сучасних досліджень свідчить про велике різноманіття підходів, що, з іншого боку, свідчить про відсутність сталих трендів у напрямах досліджень.

У роботі [1] уперше запропоновано нелінійну MIP-модель (англ. Mixed Integer Programming), яка одночасно визначає план призначення груп вагонів (англ. blocks) для всіх сортувальних станцій мережі. Проте час ходу поїздів у моделі взагалі не фігурує як змінна – ураховують лише вагоно-години простою/накопичення, тож питання про різницю швидкостей типів поїздів у цій постановці в принципі неможливо навіть поставити. У джерелі [2] задачу зведено до мережевої задачі проєктування (англ. network design) із величезною кількістю змінних, мінімізовано витрати на переробку та просування вагонів. Однак тривалість ходу відображена лише фіксованим «штрафом за переробку» на дузі, а не реальним часом руху залежно від категорії поїзда, тобто швидкісні відмінності між наскрізними та дільничними поїздами не враховані взагалі. У статті [3] запропоновано евристичний метод VLSN-пошуку (англ. Very Large-Scale Neighborhood), що дає змогу розв’язувати задачу блокування в реальному масштабі

великих мереж США. Поліпшення суто алгоритмічне: модель залишилася тією самою статичною мережею з фіксованим часом ходу по дугах, тож сумнівно, що вона взагалі здатна відобразити ефект від різної ходової швидкості поїздів різних категорій. У роботі [4] запропоновано генетичний алгоритм для тієї ж класичної мережевої постановки блокування, спрямований на прискорення розв'язання NP-складної задачі з мільярдами змінних. Але це знову про метод розв'язання, а не про модель: жодної диференціації швидкостей поїздів не введено, цільова функція та сама – витрати на переробку. У статті [5] маємо пряму аналогію з нашою задачею: одночасно визначають, формувати одногрупні (аналог дільничних) чи двогрупні/наскрізні призначення. Але незрозуміло і сумнівно, чи закладено в модель саме різницю ходових швидкостей – судячи зі структури витрат, ефект від об'єднання груп і тут виражений через вартість переробки вагона, а не через виграш у часі ходу за рахунок вищої швидкості наскрізного поїзда. Розвиток попередньої моделі в бік розв'язання на великих мережах гібридною метаевристикою (ГА + табу-пошук) розглянуто в роботі [6]. Поліпшено обчислюваність, але модельні припущення щодо часу ходу не переглянуто – та сама проблема, що і у статті [5], тільки для більших розмірностей мережі. У джерелі [7] запропоновано точну модель і алгоритм декомпозиції за деревом, що дають змогу знаходити точний розв'язок для великих мереж без переборних евристик. Але модель обмежена лише одногруповими поїздами (без дво- та багатогрупних варіантів), а час ходу знову задано як екзогенний параметр на дузі, без зв'язку зі швидкісною характеристикою категорії поїзда. У статті [8] поєднано задачу маршрутизації вагонопотоків і плану формування в єдину нелінійну модель, розв'язувану методом імітаційного відпалу. Ураховано практичну складність реальної мережі (обмеження місткості станцій і дільниць), але час перевезення знову закладено як фіксований параметр на дузі – швидкість поїзда як категоріальна характеристика (наскрізний/дільничний) у моделі не диференційована.

Отже, прогрес ішов або в бік удосконалення алгоритмів розв'язання (VLSN, ГА, табу-пошук, точна декомпозиція), або в бік ускладнення структури обмежень, однак дослідники чомусь не звернули уваги навіть на більш прості і природні аспекти цієї задачі, наприклад урахування різниці швидкостей між наскрізними і дільничними поїздами як фактор, що впливає на вибір оптимального плану.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення точності та адекватності експлуатаційних розрахунків для організації вагонопотоків через розвиток математичного апарату оптимізації плану формування вантажних поїздів на основі диференціації їхніх дільничних швидкостей.

Для реалізації такого підходу необхідно скорегувати модель побудови ПФП і змоделювати, проаналізувати результати і зробити висновки про доцільність запропонованого підходу.

Основна частина дослідження. Дільнична швидкість належить до головних експлуатаційних показників, що характеризують ефективність роботи залізничного транспорту. Різниця в дільничних швидкостях між різними категоріями вантажних поїздів є досить суттєвою і зумовлена як технологічними особливостями їхньої роботи, так і технічними параметрами рухомого складу та інфраструктури.

На залізницях України та інших мережах колії ширини 1520 мм дільнична швидкість істотно варіюється для різних типів вантажних поїздів. До основних категорій належать наскрізні, дільничні, збірні, а також прискорені вантажні поїзди.

Зазначений факт доцільно використовувати як додатковий стимул для

підвищення рівня маршрутизації вагонопотоків [9]. Навіть якщо прийняти різницю у швидкостях досить незначною, наприклад на рівні кількох відсотків, потрібно враховувати, що швидкість руху впливає не лише на витрати у вагоно-годинах, але і локомотиво-години. При цьому вартість однієї локомотиво-години в кілька сотень разів перевищує вартість однієї вагоно-години. Отже, очевидно, що врахування цього фактора в розрахунках плану формування поїздів (ПФП) матиме позитивний ефект не лише через наближення математичної моделі до реальних умов, але і як можливість економії часу перебування рухомого складу та відповідних витрат на вантажні перевезення.

Економію часу із просуванням вагонів і локомотивів у складі наскрізних поїздів визначатимуть залежно від різниці в дільничних швидкостях між категоріями поїздів і тривалості їх перебування на дільниці. Відповідна формула для розрахунку цієї економії має враховувати як скорочення часу перебування вагонів у дорозі, так і зменшення локомотиво-годин [9], що забезпечує додатковий економічний ефект:

$$\Delta t_{наск} = \frac{L_{діл}}{v_{діл}} - \frac{L_{діл}}{v_{наск}}, \qquad (1)$$

де $L_{діл}$ – довжина дільниці;

$v_{діл}, v_{наск}$ – середні дільничні швидкості дільничних і наскрізних поїздів відповідно.

Величину економії витрат, яка припадає на один вагон із просуванням вагонів і локомотивів у складі наскрізних поїздів [9], можна визначити за такою формулою:

$$\Delta B = \Delta t_{наск}\left(\frac{k_{лок}}{m} + 1\right), \qquad (2)$$

де $k_{лок}$ – коефіцієнт приведення локомотиво-годин економії до вагоно-годин;

m – нормативний склад поїзда, що рухається по певній дільниці, ваг.

Для проведення необхідних розрахунків було вибрано умовний залізничний полігон, що налічує 12 технічних станцій, схема якого подана на рис. 1. Тут зображено граф зазначеного полігона, де зафіксовано основні параметри інфраструктури: показники накопичення на технічних станціях, тривалість переробки одного вагона (без урахування часу накопичення, позначено синім кольором), а також відстані між технічними станціями.

Як вихідні дані для наскрізних поїздів було прийнято швидкість 47,5 км/год а для дільничних поїздів – 45 км/год. Тобто швидкість дільничних поїздів було прийнято приблизно лише на 5 % меншою за швидкість наскрізних поїздів, хоча в реальності ці швидкості можуть відрізнятися значно суттєвіше. Так, у довоєнний період в Україні середня швидкість дільничних поїздів досягала максимальних позначок близько 50 км/год, у той же час середня швидкість наскрізних поїздів могла досягати позначок 70 км/год і навіть вище. В умовах подальшої цифровізації ці швидкості можна буде визначати значно швидше, що у свою чергу допоможе підвищити точність розрахунків і якість ПФП.

Також для моделювання коефіцієнт приведення локомотиво-години до вагоно-години прийнято на рівні 375 до одного.

Із застосуванням описаної методики було проведено моделювання без апріорного урахування відмінностей у швидкостях руху дільничних і наскрізних составів та з урахування. Для проведення моделювання був застосований метод, наведений у роботі [10], – це один із найсучасніших методів розрахунку ПФП, саме завдяки його стало можливим проведення моделювання на полігоні, який має розгалужену мережеву структуру.

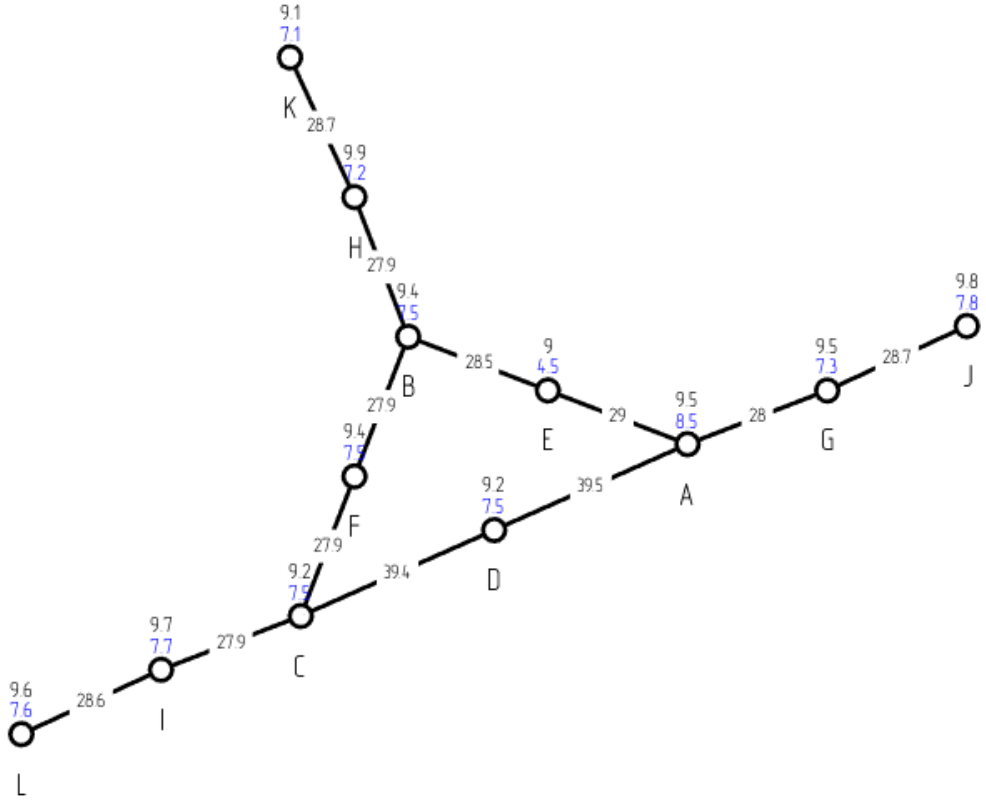


Рис. 1. Граф залізничного полігона з позначеними вихідними даними про довжини дільниць, параметри накопичення та витрати часу на переробку одного вагона на станціях

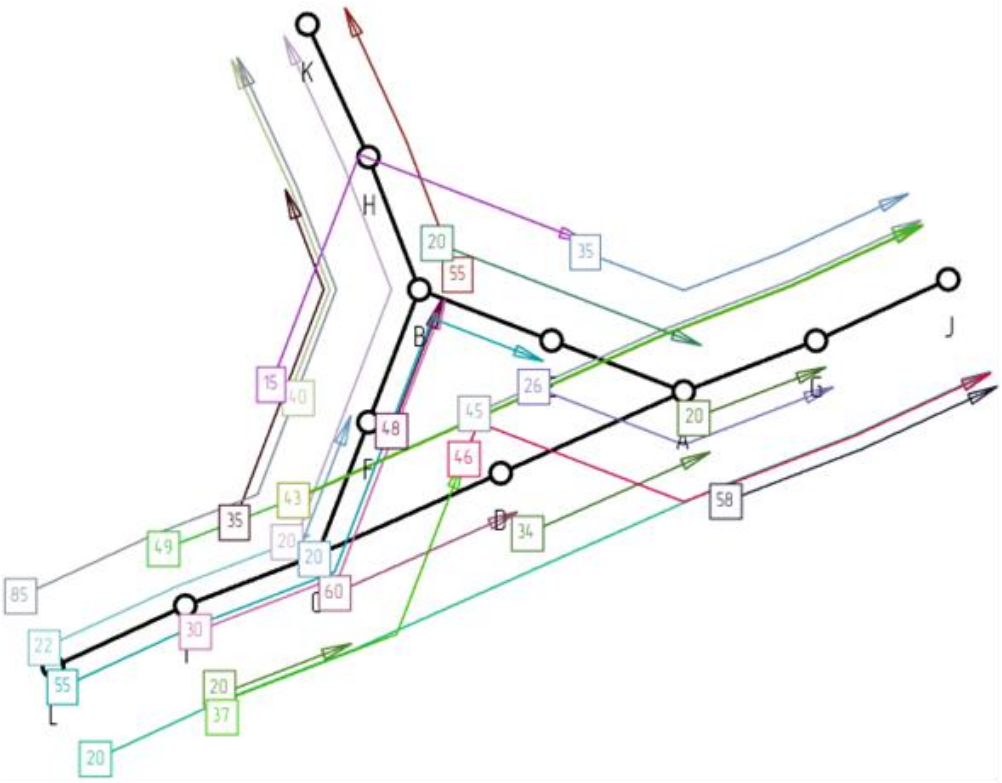


Рис. 2. Розрахункові потужності струменів вагонопотоків

У результаті моделювання були отримані два варіанти ПФП, перший (із урахуванням різниці швидкостей) налічував 17 напрямків формування поїздів і другий варіант (без урахування різниці швидкостей) 16 напрямків формування поїздів.

На рис. 3 наведено графік збіжності штрафної функції алгоритму під час моделювання з апріорним урахуванням різниці швидкостей вантажних поїздів різних категорій.

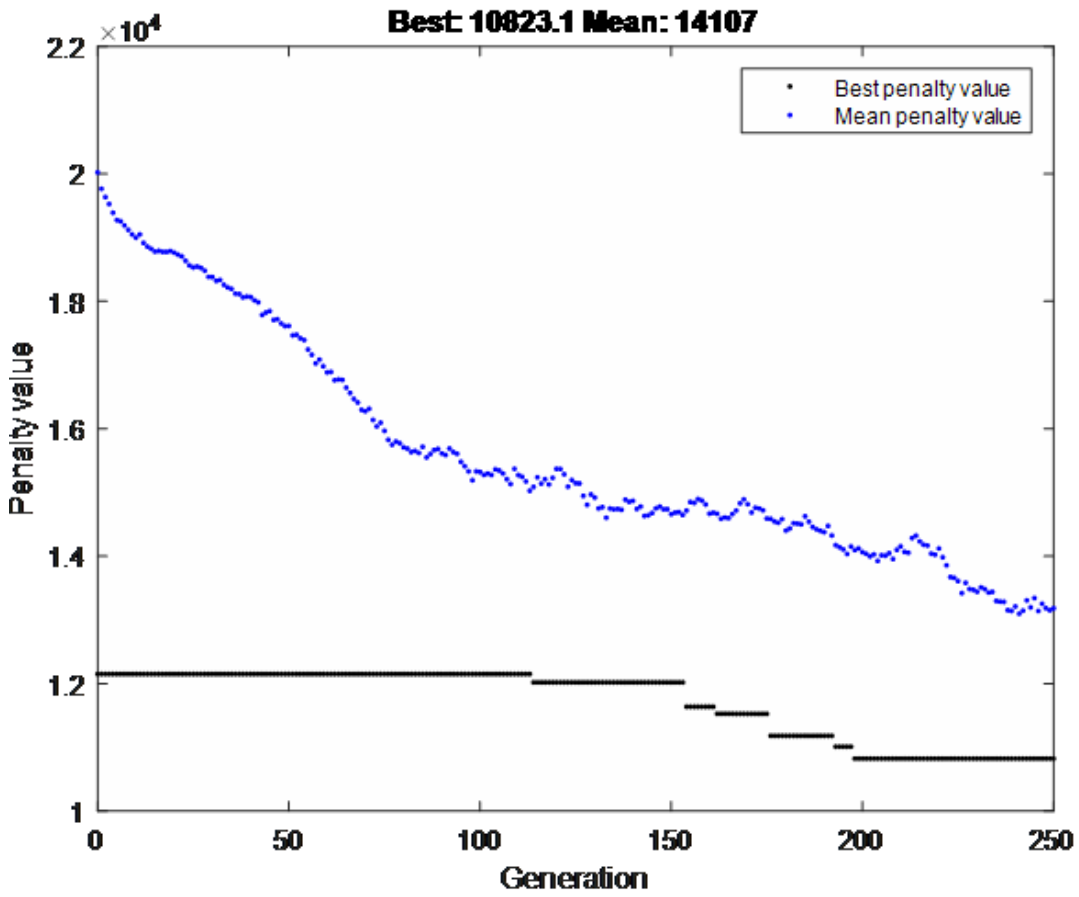


Рис. 3. Динаміка збіжності штрафної функції алгоритму

Результати моделювання з апріорним урахуванням різниці швидкостей наведені в табл. 1.

На рис. 4 наведено отриманий варіант ПФП (з апріорним урахуванням різниці швидкостей вантажних поїздів різних категорій) у графічному вигляді.

У табл. 2 наведено варіант ПФП, отриманий у результаті моделювання без апріорного урахуванням різниці швидкостей вантажних поїздів різних категорій, також там наведене значення сумарних витрат приведених вагоно-годин, тобто після урахування різниці швидкостей, яке можна назвати величиною фактичних витрат. Також в таблиці порівняно величини фактичних витрат обох варіантів плану і наведено чисельне значення їхньої різниці.

Таблиця 1

Результати розрахунку ПФП з урахуванням різниці у швидкостях

Номер	Струмені у складі напрямків	Початкова станція	Кінцева станція	Маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, що переробляють на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона	Витрати на переформування	Витрати на накопичення	Приведена економія від прослідування в наскрізному поїзді
1	EG,AG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	EJ,AJ	A	J	A,G,J	93	93	0	9.5	7.8	0	522.5	52.34807
3	FE,BA	B	E	B,E	35	15	20	9.4	4.5	90	517	0
4	CK,FK,BK	B	K	B,H,K	115	115	0	9.4	7.1	0	517	64.66612
5	LJ,CJ,CD	C	D	C,D	123	60	63	9.2	7.5	472.5	506	0
6	IB,IF,CF,CK	C	F	C,F	107	57	50	9.2	7.5	375	506	0
7	CH	C	H	C,F,B,H	35	35	0	9.2	7.2	0	506	29.08805
8	DA	D	A	D,A	34	34	0	9.2	8.5	0	506	0
9	LJ,DJ,CJ	D	J	D,A,G,J	108	108	0	9.2	7.8	0	506	103.1489
10	EJ,EG,BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	518.5	495	0
11	IB,CK,FE,FB, FK	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	562.5	517	0
12	FJ	F	J	F,B,E,A, G,J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	64.93022
13	IB,IC,IF	I	C	I,C	87	20	67	9.7	7.5	502.5	533.5	0
14	IJ	I	J	I,C,D,A, G,J	49	49	0	9.7	7.8	0	533.5	79.57006
15	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	23.59734
16	LE	L	E	L,I,C,F,B, E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	76.95318
17	LK	L	K	L,I,C,F,B, H,K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	142.6352
	Разом									2671	8789	636.9372
	Значення цільової функції									10823.06		

Аналіз отриманих результатів моделювання показує, що за базового розрахунку ПФП без урахування розбіжності середніх дільничних швидкостей наскрізних і дільничних поїздів значення цільової функції становить 11872 приведені вагоно-години. Додаткове врахування цього кінематичного фактора як постфактум-корегування для вже сформованого варіанта плану дає змогу формально знизити оцінку сумарних витрат до 11277,42 приведених вагоно-годин. Водночас інтеграція різниці дільничних швидкостей безпосередньо в оптимізаційний алгоритм на етапі обчислень забезпечує формування якісно іншої структури вагонопотоків із мінімальним значенням цільової функції – 10823,06 приведених вагоно-годин.

Порівняльний аналіз доводить, що врахування диференціації швидкостей безпосередньо в процесі розрахунку ПФП, а не у вигляді ізольованих додаткових обчислень, не лише підвищує адекватність експлуатаційної оцінки, але і забезпечує чисту технологічну економію в розмірі 454,4 приведених вагоно-годин, що становить 4,5 % загального обсягу витрат.

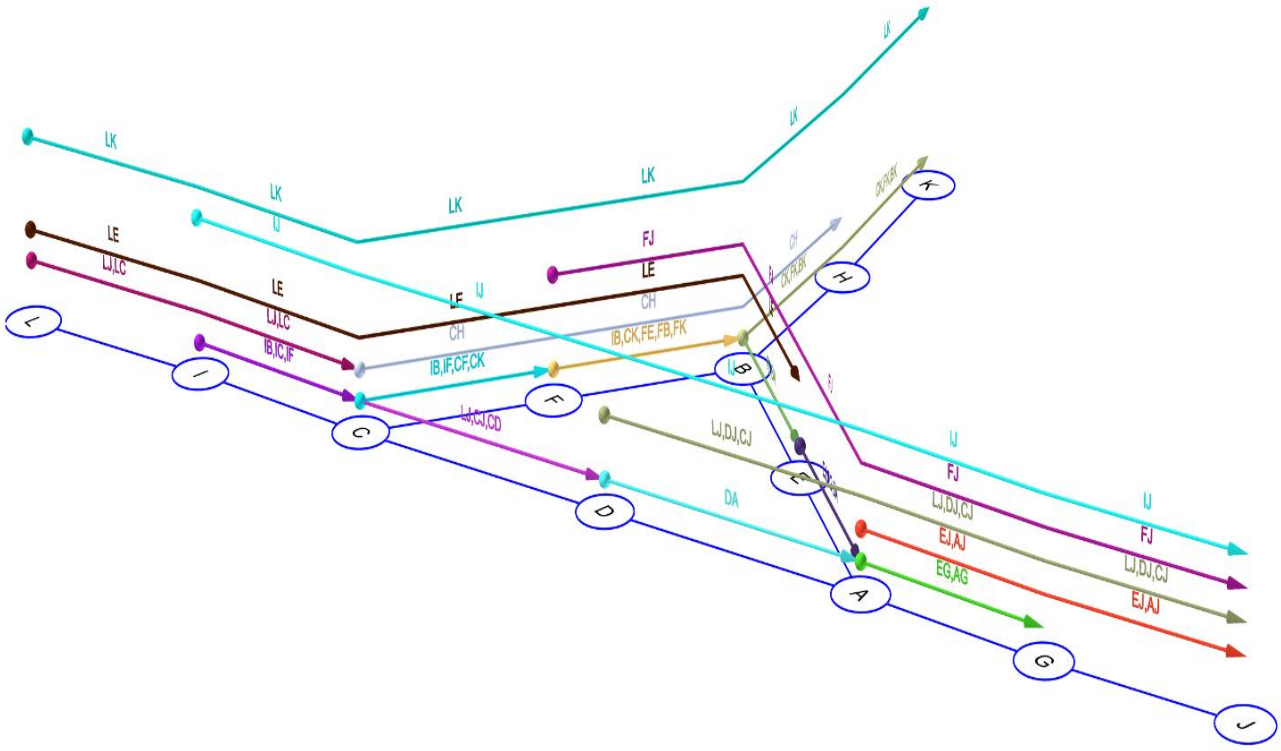


Рис. 4. Графічна інтерпретація отриманого варіанта ПФП

Висновки. У результаті проведеного дослідження вирішено науково-практичну завдання підвищення точності та адекватності експлуатаційних розрахунків для організації вагонопотоків на основі скорегованої моделі плану формування поїздів. Інтеграція диференційованих за категоріями поїздів дільничних швидкостей безпосередньо в оптимізаційний алгоритм розрахунку, на відміну від класичних ізольованих методів, дала змогу забезпечити якісно новий рівень обґрунтування рішень. Результати проведеного моделювання та порівняльний аналіз отриманих варіантів плану підтверджують високу технологічну та економічну доцільність запропонованого підходу, оскільки пряме врахування кінематичних параметрів руху в процесі обчислень забезпечує чисту економію у розмірі 454,4 приведених вагоно-годин. Отримане зниження сумарних витрат на 4,5 % доводить, що диференціація швидкостей є суттєвим і дієвим внутрішнім резервом підвищення ефективності перевізного процесу, а розроблений математичний апарат може бути рекомендований для впровадження в практику оперативного планування на залізничних полігонах.

Таблиця 2

Результати розрахунку ПФП без урахування різниці у швидкостях

Номер	Струмені у складі напрямів	Початкова станція	Кінцева станція	маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, що переробляють на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона на кінцевій станції маршруту	Витрати на переформування	Витрати на накопичення	Приведена економія від прослідування в наскрізному поїзді
1	AG,EG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	LJ,CJ,EJ,AJ, DJ	A	J	A,G,J	201	201	0	9.5	7.8	0	522.5	113.1394
3	FE,BA	B	E	B,E	35	15	20	9.4	4.5	90	517	0
4	CK,BK,FK	B	K	B,H,K	115	115	0	9.4	7.1	0	517	64.66612
5	LJ,CJ,CD	C	D	C,D	123	60	63	9.2	7.5	472.5	506	0
6	IB,CK,IF, CF	C	F	C,F	107	57	50	9.2	7.5	375	506	0
7	CH	C	H	C,F,B,H	35	35	0	9.2	7.2	0	506	29.08805
8	LJ,CJ,DJ, DA	D	A	D,A	142	34	108	9.2	8.5	918	506	0
9	EJ,EG,BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	518.5	495	0
10	IB,CK,FK, FE,FB	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	562.5	517	0
11	FJ	F	J	F,B,E,A,G,J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	64.93022
12	IB,IC,IF	I	C	I,C	87	20	67	9.7	7.5	502.5	533.5	0
13	IJ	I	J	I,C,D,A,G,J	49	49	0	9.7	7.8	0	533.5	79.57006
14	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	23.59734
15	LE	L	E	L,I,C,F,B,E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	76.95318
16	LK	L	K	L,I,C,F,B,H, K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	142.6352
	Разом									3589	8283	594.5796
	Значення цільової функції										11872.00	
	Сумарні витрати варіанта ПФП, отриманого без урахування різниці у швидкостях, після урахування										11277.42	
	Значення цільової функції варіанта ПФП, отриманого з урахуванням різниці у швидкостях										10823.06	
	Економія у випадку урахування різниці у швидкостях										**454.3576**	

Список використаних джерел

1. Bodin, L. D., Golden, B. L., Schuster, A. D., & Romig, W. (1980). A model for the blocking of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*, *14*(1–2), 115–120. https://doi.org/10.1016/0191-2615(80)90037-5

2. Barnhart, C., Jin, H., & Vance, P. H. (2000). Railroad blocking: A network design application. *Operations Research, 48*(4), 603–614. https://doi.org/10.1287/opre.48.4.603.12416

3. Ahuja, R. K., Jha, K. C., & Liu, J. (2007). Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, *37*(5), 404–419. https://doi.org/10.1287/inte.1070.0295

4. Yaghini, M., Seyedabadi, M., & Khoshraftar, M. M. (2012). A population-based algorithm for the railroad blocking problem. *Journal of Industrial Engineering International, 8*(1), Article 8. https://doi.org/10.1186/2251-712X-8-8

5. Xiao, J., & Lin, B. (2016). Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, *6*(3), 218–236. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.09.002

6. Xiao, J., Lin, B., & Wang, J. (2018). Solving the train formation plan network problem of the single-block train and two-block train using a hybrid algorithm of genetic algorithm and tabu search. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *86*, 124–146. https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.10.006

7. Chen, C., Dollevoet, T., & Zhao, J. (2018). One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, *118*, 1–30. https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.003

8. Lin, B., Zhao, Y., Lin, R., & Liu, C. (2021). Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, *93*, 811–830. https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.031

9. Прохоров, В. М., Крючков, В. О., & Богдан, Д. Л. (2023, 27–28 листопада). *Удосконалення технології організації вагонопотоків за рахунок уточнення моделі плану формування поїздів*. Тези доповідей 4-ої міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (ІТТ), Харків, Україна. (с. 46–47).

10. Butko, T., Prokhorov, V., & Chekhunov, D. (2017). Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *3*(3-85), 55–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276

References

1. Bodin, L. D., Golden, B. L., Schuster, A. D., & Romig, W. (1980). A model for the blocking of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*, *14*(1–2), 115–120. https://doi.org/10.1016/0191-2615(80)90037-5

2. Barnhart, C., Jin, H., & Vance, P. H. (2000). Railroad blocking: A network design application. *Operations Research, 48*(4), 603–614. https://doi.org/10.1287/opre.48.4.603.12416

3. Ahuja, R. K., Jha, K. C., & Liu, J. (2007). Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, *37*(5), 404–419. https://doi.org/10.1287/inte.1070.0295

4. Yaghini, M., Seyedabadi, M., & Khoshraftar, M. M. (2012). A population-based algorithm for the railroad blocking problem. *Journal of Industrial Engineering International, 8*(1), Article 8. https://doi.org/10.1186/2251-712X-8-8

5. Xiao, J., & Lin, B. (2016). Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, *6*(3), 218–236. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.09.002

6. Xiao, J., Lin, B., & Wang, J. (2018). Solving the train formation plan network problem of the single-block train and two-block train using a hybrid algorithm of genetic algorithm and tabu search. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *86*, 124–146. https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.10.006

7. Chen, C., Dollevoet, T., & Zhao, J. (2018). One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological, 118,* 1–30. https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.003

8. Lin, B., Zhao, Y., Lin, R., & Liu, C. (2021). Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm. *Applied Mathematical Modelling, 93,* 811–830. https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.031

9. Prokhorov, V. M., Kryuchkov, V. O., & Bohdan, D. L. (2023, November 27–28). *Udoskonalennya tekhnolohiyi orhanizatsiyi vahonopotokiv za rakhunok utochnennya modeli planu formuvannya poyizdiv* [Improvement of car-flow organization technology by clarifying the model of train formation plan] [Conference presentation]. 4th International Scientific and Technical Conference "Intellectual Transport Technologies" (ITT), Kharkiv, Ukraine. (pp. 46–47).

10. Butko, T., Prokhorov, V., & Chekhunov, D. (2017). Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3*(3-85), 55–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-8963-6467. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.
Пархоменко Лариса Олексіївна, доктор технічних наук, професор кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-1647-7746. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.
Калашнікова Тетяна Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-6563-5945. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.
Кофанов Олександр Володимирович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0005-3277-3731. E-mail: alex.vonafo@gmail.com.

Prokhorov Viktor, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-8963-6467. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.
Parkhomenko Larysa, D.Sc (Tech), Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-1647-7746. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.
Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-6563-5945. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.
Kofanov Oleksandr, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0005-3277-3731. E-mail: alex.vonafo@gmail.com.

Дата надходження статті: 06.07.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

UDC 621.391.8:519.21

ANALYSIS OF THE TOTAL SQUARED CORRELATION FOR EVALUATING ENSEMBLES OF UNEQUAL-ENERGY COMPLEX SIGNALS IN CODE-DIVISION MULTIPLE-ACCESS SYSTEMS

Candidate of Technical Sciences O. S. Zhuchenko

АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛА ЗАГАЛЬНОЇ КВАДРАТИЧНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ АНСАМБЛІВ РІЗНОЕНЕРГЕТИЧНИХ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ СИСТЕМ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ З КОДОВИМ РОЗДІЛЕННЯМ

Канд. техн. наук О. С. Жученко

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371329

Abstract. *The objective of this study is to establish a functional relationship between the autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation and the structural equivalent size of an unequal-energy complex signal ensemble by analyzing the autocorrelation and cross-correlation components and the dependence of the structural equivalent size on the distribution of signal energies within the ensemble. The autocorrelation and cross-correlation components of the normalized energy-weighted total squared correlation for an unequal-energy complex signal ensemble are analyzed. It is shown that the autocorrelation component is determined by the normalized sum of squared signal energies in the ensemble, whereas the cross-correlation component is expressed in terms of individual normalized multiple-access interference energies with weighting factors determined by the distribution of signal energies within the ensemble. The autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation is shown to equal the quadratic measure of signal energy concentration, which also determines the structural equivalent size. A functional relationship is established between the autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation and the structural equivalent size. For an equal-energy complex signal ensemble, the structural equivalent size coincides with the ensemble size, while the autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation corresponds to a uniform distribution of signal energies. The quadratic measure of signal energy concentration is also shown to appear in the cross-correlation component of the normalized energy-weighted total squared correlation as the sum of its weighting factors. The cross-correlation component also depends on the individual normalized multiple-access interference energies, which are determined by the signal energies and their cross-correlations. It is established that the normalized energy-weighted total squared correlation differs from the structural equivalent size: a direct functional relationship with the structural equivalent size is established for the autocorrelation component, whereas the distribution of signal energies alone is insufficient to determine the cross-correlation component.*

Keywords: *unequal-energy complex signal ensemble; total squared correlation; autocorrelation component; cross-correlation component; normalized energy-weighted total squared correlation; structural equivalent size; code-division multiple-access system; multiple-access interference.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Жученко О. С., 2026.

Анотація. *Метою статті є встановлення функціонального зв'язку між автокореляційною складовою енергетично-зваженого нормованого функціонала загальної квадратичної кореляції і структурним еквівалентним об'ємом ансамблю різноенергетичних складних сигналів на основі аналізу автокореляційної та взаємокореляційної складових функціонала і залежності структурного еквівалентного об'єму від розподілу енергій сигналів ансамблю. Проаналізовано автокореляційну та взаємокореляційну складові енергетично-зваженого нормованого функціонала загальної квадратичної кореляції для ансамблю різноенергетичних складних сигналів. Показано, що автокореляційна складова визначена нормованою сумою квадратів енергій сигналів ансамблю, а взаємокореляційна складова виражена через індивідуальні нормовані енергії завад множинного доступу з ваговими множниками, які визначають розподілом енергії сигналів ансамблю. Установлено, що автокореляційна складова енергетично-зваженого нормованого функціонала загальної квадратичної кореляції дорівнює квадратичній мірі концентрації енергії сигналів ансамблю, через яку також визначено структурний еквівалентний об'єм. Між автокореляційною складовою енергетично-зваженого нормованого функціонала загальної квадратичної кореляції і структурним еквівалентним об'ємом установлено функціональний зв'язок. Для ансамблю рівноенергетичних складних сигналів структурний еквівалентний об'єм збігається з об'ємом ансамблю, а автокореляційна складова енергетично-зваженого нормованого функціонала загальної квадратичної кореляції відповідає рівномірному розподілу енергії сигналів. Показано, що квадратична міра концентрації енергії сигналів входить також у взаємокореляційну складову енергетично-зваженого нормованого функціонала загальної квадратичної кореляції як сумарна величина її вагових множників. Значення взаємокореляційної складової також залежить від індивідуальних нормованих енергій завад множинного доступу, які визначені енергіями сигналів і їхніми взаємними кореляціями. Установлено, що енергетично-зважений нормований функціонал загальної квадратичної кореляції не є тотожним структурному еквівалентному об'єму: функціональний зв'язок зі структурним еквівалентним об'ємом безпосередньо встановлено для автокореляційної складової, тоді як для визначення взаємокореляційної складової одного розподілу енергії сигналів недостатньо.*

Ключові слова: *ансамбль різноенергетичних складних сигналів, функціонал загальної квадратичної кореляції, автокореляційна складова, енергетично-зважений нормований функціонал загальної квадратичної кореляції, квадратична міра концентрації енергії сигналів ансамблю, структурний еквівалентний об'єм, система множинного доступу з кодовим розділенням.*

Introduction. In remote condition-monitoring systems for railway transport, wireless transmission of operational data must support long-term autonomous operation of remote devices and simultaneous transmission of critical and non-critical messages. Meeting these requirements calls for a unified wireless ultra-wideband access platform with software-controlled parameter adjustment according to current tasks, access priorities, and the number of simultaneously supported channels. At the complex-signal-ensemble level, this requirement calls for code-division multiple access. A promising direction for the development of ultra-wideband code-division multiple-access systems is the use of complex impulse signals. In [1], ensembles of periodic pulse sequences with minimum energy interaction (hereinafter, complex time-division signal ensembles with a periodic structure) were proposed, for which no more than one pulse overlap occurs at arbitrary time shifts. The different numbers of pulses in these signals result in unequal energies of individual signals in the ensemble [2–6]; therefore, complex time-division signal ensembles with a periodic structure are unequal-energy ensembles.

Relevance of the research topic. One possible approach to evaluating the efficiency of complex signal ensembles is the use of Total Squared Correlation (TSC) [7–9]. For ensembles with unequal signal powers and/or energies, weighted variants of total squared correlation are used, in which squared correlations are assigned the corresponding weighting factors [10–14].

Another approach to evaluating unequal-energy complex signal ensembles is based on an equivalent transformation of such an ensemble into an equal-energy complex signal ensemble while preserving the total signal energy [15, 16]. The result of the equivalent transformation is the structural equivalent size, which is determined from the quadratic measure of signal energy concentration normalized to its value for an equal-energy ensemble and represents the calculated number of equal-energy signals. Numerically, it equals an approximate estimate of the normalized total energy of interfering signals and reflects the increase in interfering-signal energy for users with the lowest signal energies due to the dominance of signals from users with higher energies [15, 16]. The structural equivalent size was subsequently used in the formulation and study of performance indicators for unequal-energy complex signal ensembles and code-division multiple-access systems [17–20]. Thus, the available approaches to evaluating unequal-energy complex signal ensembles characterize the ensembles through different quantitative relationships. Therefore, establishing the relationship between total squared correlation and the structural equivalent size is a relevant task.

Analysis of recent research and publications. Total squared correlation is defined as the sum of squared correlations over all pairs of signals in the ensemble [7]. Its autocorrelation and cross-correlation components can be separated [8, 9].

For ensembles with unequal signal powers and/or energies, weighted and normalized weighted variants of total squared correlation are used; squared correlations are assigned weighting factors that depend on signal powers or energies, so the power or energy distribution affects the weighting factors [10–14].

The distribution of signal energies can also be accounted for by an equivalent transformation of an unequal-energy complex signal ensemble into an equal-energy complex signal ensemble while preserving the total signal energy. In this transformation, the structural equivalent size is determined from the quadratic measure of signal energy concentration normalized to its value for an equal-energy ensemble and therefore depends on the distribution of signal energies [15, 16].

At the same time, the normalized energy-weighted total squared correlation and the structural equivalent size are obtained within different approaches to evaluating unequal-energy complex signal ensembles. The relationship between the components of the normalized energy-weighted total squared correlation and the structural equivalent size has yet to be established.

Defining the purpose and objectives of the research. The objective of this article is to establish a functional relationship between the autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation and the structural equivalent size of an unequal-energy complex signal ensemble by analyzing the autocorrelation and cross-correlation components and the dependence of the structural equivalent size on the distribution of signal energies in the ensemble.

The main part of the research. Consider total squared correlation (TSC), defined as the sum of squared correlations over all pairs of signals in the ensemble [7]. For an ensemble of size L, TSC is given by:

$$\mathrm{TSC} = \sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{L}\left(R_{ij}^{(max)}\right)^2,$$

where L – ensemble size;

$R_{ij}^{(max)}$ – maximum correlation value between signals i and j, $i, j = 1, \dots, L$.

For ensembles with unequal signal energies, weighted and normalized weighted variants of total squared correlation are used [10–14]. For the subsequent analysis, we use the normalized energy-weighted total squared correlation, denoted by $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}$. Let the energy of signal i be denoted by E_i, and define the total signal energy of the ensemble E_Σ as

$$E_\Sigma = \sum_{i=1}^{L} E_i.$$

Accounting for the signal energies E_i, the normalized energy-weighted total squared correlation $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}$ can be written as

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}} = \frac{1}{E_\Sigma^2} \sum_{i=1}^{L} \sum_{j=1}^{L} E_i\, E_j \left(R_{ij}^{(max)}\right)^2,$$

where the squared correlation $\left(R_{ij}^{(max)}\right)^2$ is assigned the weighting factor $E_i E_j / E_\Sigma^2$. The quantity $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}$ is dimensionless because of normalization by E_Σ^2.

For the subsequent analysis, decompose the normalized energy-weighted total squared correlation into components according to whether the signal indices coincide [8, 9]. Terms with $i = j$ define the autocorrelation component, whereas terms with $i \neq j$ define the cross-correlation component:

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}} = \mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i=j)} + \mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)},$$

where $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i=j)}$ – autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation;

$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$ – cross-correlation component of the normalized energy-weighted total squared correlation.

For $\left(R_{ii}^{(max)}\right)^2 = 1$, the autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i=j)}$ is given by

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i=j)} = \frac{1}{E_\Sigma^2} \sum_{i=1}^{L} E_i^2,$$

which accounts for the distribution of signal energies E_i in the ensemble. Cross-correlations between signals do not enter this relationship.

The cross-correlation component of the normalized energy-weighted total squared correlation $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$ is given by:

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)} = \frac{1}{E_\Sigma^2} \sum_{i=1}^{L} \sum_{j=1,\, j\neq i}^{L} E_i\, E_j \left(R_{ij}^{(max)}\right)^2.$$

Next, consider the structural equivalent size $L_{\mathrm{eq}}^{(+)}$, defined as the calculated number of equal-energy complex signals in an ensemble equivalent to the original unequal-energy complex signal ensemble in terms of total signal energy [15, 16]. The structural equivalent size is obtained by multiplying the ensemble size L by a factor formed by normalizing the quadratic measure of signal energy concentration to $1/L$; the concentration measure is κ_E:

$$L_{\mathrm{eq}}^{(+)} = L\, \frac{\kappa_E}{1/L} = L^2 \kappa_E = L^2\, \frac{\sum_{i=1}^{L} E_i^2}{(\sum_{i=1}^{L} E_i)^2} = L^2\, \frac{\sum_{i=1}^{L} E_i^2}{E_\Sigma^2},$$

where the concentration measure κ_E is determined by the distribution of signal energies in the ensemble:

$$\kappa_E = \frac{\sum_{i=1}^{L} E_i^2}{(\sum_{i=1}^{L} E_i)^2} = \frac{\sum_{i=1}^{L} E_i^2}{E_\Sigma^2}.$$

For an equal-energy complex signal ensemble with $E_i = E$, the concentration measure takes the value $\kappa_E = 1/L$.

The structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$ is numerically equal to an approximate estimate of the normalized total energy of interfering signals in the equivalent equal-energy complex signal ensemble when the approximation $L_{\text{eq}}^{(+)} - 1 \approx L_{\text{eq}}^{(+)}$ is used under the condition that $L_{\text{eq}}^{(+)}$ is sufficiently large, whereas without this approximation the normalized total energy of interfering signals is $L_{\text{eq}}^{(+)} - 1$.

Now use the concentration measure κ_E to express the relationship obtained above for the autocorrelation component $\text{TSC}_{\text{enwt}}^{(i=j)}$ of the normalized energy-weighted total squared correlation:

$$\text{TSC}_{\text{enwt}}^{(i=j)} = \frac{1}{E_\Sigma^2}\sum_{i=1}^{L} E_i^2 = \kappa_E.$$

Thus, the structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$ and the autocorrelation component $\text{TSC}_{\text{enwt}}^{(i=j)}$ of the normalized energy-weighted total squared correlation are both expressed through the quadratic measure of signal energy concentration κ_E. Substituting $\kappa_E = L_{\text{eq}}^{(+)}/L^2$ gives the functional relationship between the autocorrelation component $\text{TSC}_{\text{enwt}}^{(i=j)}$ and the structural equivalent size $L_{\text{eq}}^{(+)}$:

$$\text{TSC}_{\text{enwt}}^{(i=j)} = \kappa_E = \frac{L_{\text{eq}}^{(+)}}{L^2}.$$

Thus, the autocorrelation component $\text{TSC}_{\text{enwt}}^{(i=j)}$ of the normalized energy-weighted total squared correlation TSC_{enwt} is determined by the distribution of signal energies in the ensemble and equals the quadratic measure of signal energy concentration. The structural equivalent size is also determined through the concentration measure κ_E, normalized to its value for an equal-energy ensemble; consequently, a functional relationship is established between the autocorrelation component and the structural equivalent size.

Next, consider the cross-correlation component $\text{TSC}_{\text{enwt}}^{(i\neq j)}$ of the normalized energy-weighted total squared correlation TSC_{enwt}. For user i, define the individual multiple-access interference energy $E_{I,i}$ as the sum of the energies of interfering users' signals weighted by the squares of the corresponding cross-correlations:

$$E_{I,i} = \sum_{j=1, j\neq i}^{L} E_j \left(R_{ij}^{(max)}\right)^2.$$

Substituting the definition of $E_{I,i}$ into the expression for the cross-correlation component gives:

$$\text{TSC}_{\text{enwt}}^{(i\neq j)} = \frac{1}{E_\Sigma^2}\sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1, j\neq i}^{L} E_i\, E_j \left(R_{ij}^{(max)}\right)^2 =$$

$$= \frac{1}{E_\Sigma^2}\sum_{i=1}^{L} E_i \left(\sum_{j=1, j\neq i}^{L} E_j \left(R_{ij}^{(max)}\right)^2\right) = \frac{1}{E_\Sigma^2}\sum_{i=1}^{L} E_i\, E_{I,i}.$$

In this relationship, the individual multiple-access interference energies $E_{I,i}$ enter the sum with weights determined by the energies of the corresponding signals. For the subsequent transformation, introduce the weighting factors w_i:

$$w_i = \frac{E_i}{E_\Sigma}, \quad \sum_{i=1}^{L} w_i = 1.$$

The cross-correlation component $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$ is then given by:

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)} = \sum_{i=1}^{L} w_i \frac{E_{I,i}}{E_\Sigma},$$

where, for each user i, the ratio $E_{I,i}/E_i$ is the individual normalized multiple-access interference energy. Since $E_i/E_\Sigma = w_i$, the last expression can be transformed to:

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)} = \sum_{i=1}^{L} \frac{E_i^2}{E_\Sigma^2} \frac{E_{I,i}}{E_i}.$$

Thus, the cross-correlation component $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$ is expressed in terms of the individual normalized multiple-access interference energies $E_{I,i}/E_i$ with weighting factors E_i^2/E_Σ^2. The sum of the weighting factors equals the quadratic measure of signal energy concentration in the ensemble κ_E:

$$\sum_{i=1}^{L} \frac{E_i^2}{E_\Sigma^2} = \kappa_E,$$

which shows that the quadratic measure of signal energy concentration κ_E enters the relationship for the cross-correlation component $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$, where κ_E gives the sum of the weighting factors applied to the individual normalized multiple-access interference energies $E_{I,i}/E_i$. Write the weighting factor as:

$$\frac{E_i^2}{E_\Sigma^2} = \kappa_E \frac{E_i^2}{\sum_{j=1}^{L} E_j^2},$$

where the fractions $E_i^2 / \sum_{j=1}^{L} E_j^2$ specify the fraction of the sum of squared signal energies attributable to signal i, and the sum of these fractions equals one:

$$\sum_{i=1}^{L} \frac{E_i^2}{\sum_{j=1}^{L} E_j^2} = 1.$$

Thus, the weighting factor E_i^2/E_Σ^2 can be written as the product of two components: the concentration measure κ_E and the fraction $E_i^2 / \sum_{j=1}^{L} E_j^2$. The quadratic measure of signal energy concentration κ_E determines the overall quadratic concentration of energy in the ensemble, whereas the ratio $E_i^2 / \sum_{j=1}^{L} E_j^2$ gives the fraction of the sum of squared signal energies associated with signal i.

Substituting $E_i^2/E_\Sigma^2 = \kappa_E E_i^2 / \sum_{j=1}^{L} E_j^2$ into the expression for $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$ gives:

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)} = \sum_{i=1}^{L} \frac{E_i^2}{E_\Sigma^2} \frac{E_{I,i}}{E_i} = \kappa_E \sum_{i=1}^{L} \frac{E_i^2}{\sum_{j=1}^{L} E_j^2} \frac{E_{I,i}}{E_i},$$

where the concentration measure κ_E is a common factor of the cross-correlation component $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$, while the quantities $E_{I,i}/E_i$ depend on the energies of the interfering signals and the squares of their cross-correlations with signal i. Thus, the cross-correlation component $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$ simultaneously accounts for the distribution of signal energies in the ensemble and their cross-correlations.

Write the normalized energy-weighted total squared correlation $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}$ as the sum of the autocorrelation $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i=j)}$ and cross-correlation $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$ components:

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}} = \mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i=j)} + \mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)} = \\ = \kappa_E + \kappa_E \sum_{i=1}^{L} \frac{E_i^2}{\sum_{j=1}^{L} E_j^2} \frac{E_{I,i}}{E_i} = \kappa_E \left(1 + \sum_{i=1}^{L} \frac{E_i^2}{\sum_{j=1}^{L} E_j^2} \frac{E_{I,i}}{E_i}\right).$$

The resulting relationship shows two factors that determine the normalized energy-weighted total squared correlation $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}$. The quadratic measure of signal energy concentration κ_E characterizes the distribution of signal energies in the ensemble and is a common factor of both the autocorrelation and cross-correlation components. The expression in parentheses accounts for the individual normalized multiple-access interference energies $E_{I,i}/E_i$, which also depend on the cross-correlations between signals. At the same value of κ_E, $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}$ can take different values if the quantities $E_{I,i}/E_i$ differ between signal ensembles.

Since the structural equivalent size $L_{\mathrm{eq}}^{(+)}$ satisfies the relationship $L_{\mathrm{eq}}^{(+)} = L^2\kappa_E$, the normalized energy-weighted total squared correlation $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}$ can also be expressed in terms of the structural equivalent size:

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}} = \frac{L_{\mathrm{eq}}^{(+)}}{L^2}\left(1 + \sum_{i=1}^{L} \frac{E_i^2}{\sum_{j=1}^{L} E_j^2} \frac{E_{I,i}}{E_i}\right),$$

where $L_{\mathrm{eq}}^{(+)}/L^2 = \kappa_E$ directly determines the autocorrelation component $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i=j)}$ and is a common factor of the cross-correlation component $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$.

For an equal-energy complex signal ensemble, where $E_i = E$, $i = 1, \ldots, L$, we obtain:

$$\kappa_E = \frac{\sum_{i=1}^{L} E^2}{(LE)^2} = \frac{LE^2}{L^2E^2} = \frac{1}{L},$$

and for each signal, the fraction of the sum of squared signal energies associated with signal i is:

$$\frac{E_i^2}{\sum_{j=1}^{L} E_j^2} = \frac{E^2}{LE^2} = \frac{1}{L}.$$

Substituting $\kappa_E = 1/L$, $E_i^2/\sum_{j=1}^{L} E_j^2 = \\ = 1/L$, $E_{I,i} = E\sum_{j=1,\, j\neq i}^{L}\left(R_{ij}^{(max)}\right)^2$, and $E_{I,i}/E = \sum_{j=1,\, j\neq i}^{L}\left(R_{ij}^{(max)}\right)^2$ into the expression for the cross-correlation component $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$ gives:

$$\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)} = \kappa_E \sum_{i=1}^{L} \frac{E_i^2}{\sum_{j=1}^{L} E_j^2} \frac{E_{I,i}}{E_i} = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L} \frac{1}{L} \frac{E_{I,i}}{E} = \frac{1}{L^2}\sum_{i=1}^{L} \frac{E_{I,i}}{E} = \frac{1}{L^2}\sum_{i=1}^{L} \sum_{j=1,\, j\neq i}^{L} \left(R_{ij}^{(max)}\right)^2.$$

Thus, for an equal-energy complex signal ensemble, the cross-correlation component $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}^{(i\neq j)}$ of the normalized energy-weighted total squared correlation $\mathrm{TSC}_{\mathrm{enwt}}$ is determined by the sum of squared cross-correlations with weighting factor $1/L^2$. The structural equivalent size $L_{\mathrm{eq}}^{(+)}$ for such an ensemble coincides with the ensemble size L.

Conclusions. The autocorrelation and cross-correlation components of the normalized energy-weighted total squared correlation for an unequal-energy complex signal ensemble are analyzed. It is shown that the autocorrelation component is determined by the normalized sum of squared signal energies in the ensemble, whereas the cross-correlation

component is expressed in terms of individual normalized multiple-access interference energies with weighting factors determined by the distribution of signal energies within the ensemble. The autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation is shown to equal the quadratic measure of signal energy concentration, which also determines the structural equivalent size. A functional relationship is established between the autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation and the structural equivalent size. For an equal-energy complex signal ensemble, the structural equivalent size coincides with the ensemble size, while the autocorrelation component of the normalized energy-weighted total squared correlation corresponds to a uniform distribution of signal energies. The quadratic measure of signal energy concentration is also shown to appear in the cross-correlation component of the normalized energy-weighted total squared correlation as the sum of its weighting factors. The cross-correlation component also depends on the individual normalized multiple-access interference energies, which are determined by the signal energies and their cross-correlations. It is established that the normalized energy-weighted total squared correlation differs from the structural equivalent size: a direct functional relationship with the structural equivalent size is established for the autocorrelation component, whereas the distribution of signal energies alone is insufficient to determine the cross-correlation component.

References

1. Lysechko, V. P. (2005). Metod formirovaniya ansambley slozhnykh signalov na osnove posledovatelnostey s minimalnym energeticheskim vzaimodeystviyem. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika, 1*(1), 65–68.

2. Severinov, A. V., Lysechko, V. P., & Zhuchenko, A. S. (2006). Analiz ansamblevykh svoystv slozhnykh signalov. *Systemy obrobky informatsii, 5*(54), 105–108.

3. Lysechko, V. P., Kulagin, D. O., Indyk, S. V., Zhuchenko, O. S., & Kovtun, I. V. (2022). The Study of the Cross-Correlation Properties of Complex Signals Ensembles Obtained by Filtered Frequency Elements Permutations. *Radio Electronics, Computer Science, Control, 2*(61), 15–23. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-2

4. Indyk, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Kitov, V. S. (2020). The Formation Method of Complex Signals Ensembles by Frequency Filtration of Pseudo-Random Sequences with Low Interaction in the Time Domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, *4*(55), 7–14. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-1

5. Zhuchenko, O., Indyk, S., & Zablotskyi, V. (2026). Study of Properties of Complex Time-Division Signal Ensembles with a Periodic Structure for Ultra-Wideband Code-Division Multiple Access Systems. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production,* 63, 310–317. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-63-34

6. Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Method for Synthesis of Ensembles of Complex Time-Division Signals with a Periodic Structure for Ultra-Wideband Multiple Access Systems. *Teoriya i praktyka suchasnoyi nauky v umovakh transformatsiy : materialy nauk.-prakt. konf. (Poltava, 24–25 kvitnya 2026 r.). Odesa: Vydavnytstvo «Molodyy vchenyy»*, 142–144. [in English].

7. Rupf, M., & Massey, J. L. (1994). Optimum Sequence Multisets for Synchronous Code-Division Multiple-Access Channels. *IEEE Transactions on Information Theory, 40*(4), 1261–1266. DOI: https://doi.org/10.1109/18.335940. URL: https://www.researchgate.net/publication/3078580_Optimum_sequence_multisets_for_synchronous_code-division_multiple-access_channels

8. Karystinos, G. N., & Pados, D. A. (2001). Minimum Total-Squared-Correlation Design of DS-CDMA Binary Signature Sets. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '01), Communication Theory Symposium,* 2, 801–805. DOI: https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2001.965529

9. Karystinos, G. N., & Pados, D. A. (2003). New Bounds on the Total Squared Correlation and Optimum Design of DS-CDMA Binary Signature Sets. *IEEE Transactions on Communications, 51*(1), 48–51. DOI: https://doi.org/10.1109/TCOMM.2002.807628

10. Popescu, D. C., & Rose, C. (2003). Interference Avoidance and Power Control for Uplink CDMA Systems. *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall,* 3, 1473–1477. DOI: https://doi.org/10.1109/VETECF.2003.1285269, URL: https://www.winlab.rutgers.edu/~crose/papers/IApower.pdf

11. Cotae, P. (2004). Spreading Sequence Design for Multiple-Cell Synchronous DS-CDMA Systems under Total Weighted Squared Correlation Criterion. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking,* 2004(1), 4–11. https://doi.org/10.1155/S1687147204405027

12. Cotae, P. (2006). Transmitter Adaptation Algorithm for Multicellular Synchronous DS-CDMA Systems With Multipath. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 24*(1), 94–103. DOI: https://doi.org/10.1109/JSAC.2005.858891. URL: https://www.researchgate.net/publication/3236211_Transmitter_adaptation_algorithm_for_multicellular_synchronous_DS-CDMA_systems_with_multipath

13. Cotae, P. (2007). On the Optimal Sequences and Total Weighted Square Correlation of Synchronous CDMA Systems in Multipath Channels. I*EEE Transactions on Vehicular Technology, 56*(4), 2063–2072. DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2007.897235. URL: https://www.researchgate.net/publication/3156480_On_the_Optimal_Sequences_and_Total_Weighted_Square_Correlation_of_Synchronous_CDMA_Systems_in_Multipath_Channels

14. Cotae, P., & Aguirre, M. (2006). Method for Minimizing Total Generalized Squared Correlation of Synchronous DS-CDMA Signature Sequence Sets in Multipath Channels. *Journal of Communications Software and Systems, 2*(1), 20–29. DOI: https://doi.org/10.24138/jcomss.v2i1.302

15. Zhuchenko, O., & Shubina, H. (2026). Theoretical Foundations of Equivalent Transformation of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles for Code Division Multiple Access Systems. *Science-Based Technologies, 2*(70), 205–211. DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.70.21196 [in English].

16. Zhuchenko, O., Panchenko, S., Lysechko, V., & Indyk, S. (2026). Methodology of Equivalent Transformations of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles in Code-Division Multiple Access Systems. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production,* 62, 337–345. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-38 [in English].

17. Zhuchenko, O. S., Lysechko, V. P., & Indyk, S. V. (2026). Justification of Requirements for a Structural Efficiency Indicator of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles in Code Division Multiple Access Systems. *Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport,* 216, 187–198. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362542 [in English].

18. Zhuchenko, O. S., Lysechko, V. P., & Indyk, S. V. (2026). Method for Evaluating the Structural Efficiency of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles in Ultra-Wideband Code-Division Multiple Access Systems. *Rol' nauky u vyrishenni hlobal'nykh vyklykiv suchasnosti : materialy nauk.-prakt. konf. (Ivano-Frankivs'k, 29–30 travnya 2026 r.). Odesa: Vydavnytstvo «Molodyy vchenyy»*, 137–138. URL: https://molodyivchenyi.ua/omp/index.php/conference/catalog/book/181/3263/6785-1 [in English].

19. Lysechko, V. P., Trubchaninova, K. A., Zhuchenko, O. S., & Shubina, H. V. (2026). Multi-Level Functional Model of Performance Indicators for a Code-Division Multiple Access System. *Control, Navigation and Communication Systems, 2*(84). 233–236. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2026.2.233 [in English].

20. Panchenko, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Efficiency Evaluation of a Code Division Multiple Access System Based on a Multilevel Functional Model of Performance Indicators. *Information and Control Systems at Railway Transport, 31*(2), 105–112. DOI: https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i2.362295 [in English].

Список використаних джерел

1. Lysechko, V. P. (2005). Metod formirovaniya ansambley slozhnykh signalov na osnove posledovatelnostey s minimalnym energeticheskim vzaimodeystviyem. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika, 1*(1), 65–68.

2. Severinov, A. V., Lysechko, V. P., & Zhuchenko, A. S. (2006). Analiz ansamblevykh svoystv slozhnykh signalov. *Systemy obrobky informatsii, 5*(54), 105–108.

3. Lysechko, V. P., Kulagin, D. O., Indyk, S. V., Zhuchenko, O. S., & Kovtun, I. V. (2022). The Study of the Cross-Correlation Properties of Complex Signals Ensembles Obtained by Filtered Frequency Elements Permutations. *Radio Electronics, Computer Science, Control, 2*(61), 15–23. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-2

4. Indyk, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Kitov, V. S. (2020). The Formation Method of Complex Signals Ensembles by Frequency Filtration of Pseudo-Random Sequences with Low Interaction in the Time Domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control, 4*(55), 7–14. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-1

5. Zhuchenko, O., Indyk, S., & Zablotskyi, V. (2026). Study of Properties of Complex Time-Division Signal Ensembles with a Periodic Structure for Ultra-Wideband Code-Division Multiple Access Systems. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production,* 63, 310–317. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-63-34

6. Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Method for Synthesis of Ensembles of Complex Time-Division Signals with a Periodic Structure for Ultra-Wideband Multiple Access Systems. *Теорія і практика сучасної науки в умовах трансформацій : матеріали наук.-практ. Конф.* (Полтава, 24–25 квітня 2026 р.). Одеса: Видавництво «Молодий вчений», 142–144.

7. Rupf, M., & Massey, J. L. (1994). Optimum Sequence Multisets for Synchronous Code-Division Multiple-Access Channels. *IEEE Transactions on Information Theory, 40*(4), 1261–1266. DOI: https://doi.org/10.1109/18.335940. URL: https://www.researchgate.net/publication/3078580_Optimum_sequence_multisets_for_synchronous_code-division_multiple-access_channels

8. Karystinos, G. N., & Pados, D. A. (2001). Minimum Total-Squared-Correlation Design of DS-CDMA Binary Signature Sets. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '01), Communication Theory Symposium,* 2, 801–805. DOI: https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2001.965529

9. Karystinos, G. N., & Pados, D. A. (2003). New Bounds on the Total Squared Correlation and Optimum Design of DS-CDMA Binary Signature Sets. *IEEE Transactions on Communications, 51*(1), 48–51. DOI: https://doi.org/10.1109/TCOMM.2002.807628

10. Popescu, D. C., & Rose, C. (2003). Interference Avoidance and Power Control for Uplink CDMA Systems. *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall,* 3, 1473–1477. DOI: https://doi.org/10.1109/VETECF.2003.1285269, URL: https://www.winlab.rutgers.edu/~crose/papers/IApower.pdf

11. Cotae, P. (2004). Spreading Sequence Design for Multiple-Cell Synchronous DS-CDMA Systems under Total Weighted Squared Correlation Criterion. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking,* 2004(1), 4–11. https://doi.org/10.1155/S1687147204405027

12. Cotae, P. (2006). Transmitter Adaptation Algorithm for Multicellular Synchronous DS-CDMA Systems With Multipath. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 24*(1), 94–

103. DOI: https://doi.org/10.1109/JSAC.2005.858891. URL: https://www.researchgate.net/publication/3236211_Transmitter_adaptation_algorithm_for_multicellular_synchronous_DS-CDMA_systems_with_multipath

13. Cotae, P. (2007). On the Optimal Sequences and Total Weighted Square Correlation of Synchronous CDMA Systems in Multipath Channels. I*EEE Transactions on Vehicular Technology, 56*(4), 2063–2072. DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2007.897235. URL: https://www.researchgate.net/publication/3156480_On_the_Optimal_Sequences_and_Total_Weighted_Square_Correlation_of_Synchronous_CDMA_Systems_in_Multipath_Channels

14. Cotae, P., & Aguirre, M. (2006). Method for Minimizing Total Generalized Squared Correlation of Synchronous DS-CDMA Signature Sequence Sets in Multipath Channels. *Journal of Communications Software and Systems, 2*(1), 20–29. DOI: https://doi.org/10.24138/jcomss.v2i1.302

15. Zhuchenko, O., & Shubina, H. (2026). Theoretical Foundations of Equivalent Transformation of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles for Code Division Multiple Access Systems. *Science-Based Technologies, 2*(70), 205–211. DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.70.21196

16. Zhuchenko, O., Panchenko, S., Lysechko, V., & Indyk, S. (2026). Methodology of Equivalent Transformations of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles in Code-Division Multiple Access Systems. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production,* 62, 337–345. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-38

17. Zhuchenko, O. S., Lysechko, V. P., & Indyk, S. V. (2026). Justification of Requirements for a Structural Efficiency Indicator of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles in Code Division Multiple Access Systems. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп,* 216, 187–198. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362542

18. Zhuchenko, O. S., Lysechko, V. P., & Indyk, S. V. (2026). Method for Evaluating the Structural Efficiency of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles in Ultra-Wideband Code-Division Multiple Access Systems. *Роль науки у вирішенні глобальних викликів сучасності : матеріали наук.-практ. конф.* (Івано-Франківськ, 29–30 травня 2026 р.). Одеса: Видавництво «Молодий вчений», 137–138. URL: https://molodyivchenyi.ua/omp/index.php/conference/catalog/book/181/3263/6785-1

19. Lysechko, V. P., Trubchaninova, K. A., Zhuchenko, O. S., & Shubina, H. V. (2026). Multi-Level Functional Model of Performance Indicators for a Code-Division Multiple Access System. *Control, Navigation and Communication Systems, 2*(84). 233–236. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2026.2.233

20. Panchenko, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Efficiency Evaluation of a Code Division Multiple Access System Based on a Multilevel Functional Model of Performance Indicators. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 31*(2), 105–112. DOI: https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i2.362295

Zhuchenko Oleksandr Serhiiovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel.: +38 (063) 779-44-12. E-mail: n030201@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3275-810X.

Жученко Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. Тел.: +38 (063) 779-44-12. E-mail: n030201@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3275-810X.

Дата надходження статті: 02.08.2026 р. Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 656.212:519.87

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВАНТАЖНИХ ФРОНТІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПІД'ЇЗНИХ КОЛІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ RAMS-ПІДХОДУ

Д-р техн. наук Д. В. Ломотько, канд. техн. наук Д. С. Лючков, Phd М. Д. Ломотько, канд. філол. наук С. М. Донець

MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION OF RAILWAY ACCESS TRACK LOADING/UNLOADING FRONTS USING THE RAMS APPROACH

Dr. of Technical Sciences D. V. Lomotko, Cand. of Technical Sciences D. S. Lyuchkov, Phd M. D. Lomotko, PhD S. M. Donets

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371332

Анотація. *Стаття присвячена розробленню багатокритеріальної математичної моделі оптимізації параметрів функціонування вантажних фронтів залізничних під'їзних колій з інтеграцією RAMS-аналізу (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) відповідно до стандарту EN 50126 (IEC 62278). Система «станція — під'їзна колія» формалізована як багатоканальна система масового обслуговування M/M/Z із використанням формули Ерланга-С, що дає змогу врахувати стохастичний характер вагонопотоку. Цільова функція побудована з урахуванням 14 компонентів витрат і двох конкуруючих стейкхолдерів — залізниці (мінімізація операційних витрат, простоїв і черг) і вантажовласника (мінімізація заморожування капіталу і власних експлуатаційних витрат), що обумовлює багатокритеріальний характер задачі.*

Головною науковою новизною є введення детермінованого еквівалента chance-constrained задачі Z_min(RAMS), який ураховує коефіцієнт варіації вхідного вагонопотоку (CV_N) і готовність накопичувально-розподільних машин (A_HPM) через ефективні параметри системи μ_eff і T_sys_eff. Показано, що традиційна детерміністична оптимізація систематично занижує необхідну кількість НРМ: для типового сценарію (CV_N = 0,30, A_HPM = 0,95, рівень надійності α = 0,95) детерміністичний розрахунок дає Z_min = 5, тоді як RAMS-обмеження потребують Z_min = 7, що на 40 % більше. Запропонована стохастична ризикова надбавка C_{11}(RAMS) із множником ($1+z\_\alpha\cdot CV_N$) допомагає кількісно оцінити економічні наслідки нехтування варіативністю потоку.

На основі числового прикладу (зернова під'їзна колія, N_заг = 34 ваг/доба) виконано порівняльний аналіз варіантів оптимізації для обох стейкхолдерів, побудовано таблиці чутливості (Z_min(RAMS) від CV_N та A_HPM, компоненти TCO залежно від Z, динаміка параметрів протягом року) і сформовано дерево цілей RAMS. Верифікація моделі на фактичних даних показала відхилення модельних значень від облікових не більше 6 % (за критерієм Фішера). Результати можуть бути використані для технологічного нормування часу обробки вагонів, обґрунтування інвестиційних рішень про кількість НРМ і формування договірних умов між залізницею і вантажовласниками з урахуванням стохастичних ризиків.

Ключові слова: *залізнична під'їзна колія, RAMS-аналіз, теорія масового обслуговування, формула Ерланга-С, chance-constrained оптимізація, вантажний фронт, EN 50126, стохастичне моделювання.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Ломотько Д. В., Лючков Д. С., Ломотько М. Д., Донець С. М., 2026.

Abstract. *The article is devoted to the development of a multi-criteria mathematical model for optimizing the parameters of the operation of freight fronts of railway access tracks with the integration of RAMS analysis (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) in accordance with the EN 50126 (IEC 62278) standard. The station-access track system is formalized as a multi-channel M/M/Z mass transit system using the Erlang-C formula, which allows taking into account the stochastic nature of the train flow. The objective function is constructed taking into account 14 cost components and two competing stakeholders – the railway (minimization of operating costs, downtime and queues) and the cargo owner (minimization of capital freezing and own operating costs), which determines the multi-criteria nature of the problem.*

The key scientific novelty is the introduction of a deterministic equivalent of the chance-constrained problem Z_min(RAMS), which takes into account the coefficient of variation of the incoming car flow (CV_N) and the readiness of the storage and distribution machines (A_HRM) through the effective system parameters μ_eff and T_sys_eff. It is shown that traditional deterministic optimization systematically underestimates the required number of HRM: for a typical scenario (CV_N = 0.30, A_HRM = 0.95, reliability level α = 0.95) the deterministic calculation gives Z_min = 5, while the RAMS constraints require Z_min = 7, which is 40 % more. The proposed stochastic risk premium C_{11}(RAMS) with the multiplier ($1+z_\alpha \cdot CV_N$) allows us to quantitatively assess the economic consequences of neglecting the variability of the flow.

Based on a numerical example (grain approach track, N_row = 34 weights/day), a comparative analysis of optimization options for both stakeholders was performed, sensitivity tables were constructed (Z_min(RAMS) from CV_N and A_HRM, TCO components depending on Z, parameter dynamics during the year) and a RAMS objective tree was formed. Verification of the model on actual data showed a deviation of model values from the accounting values of no more than 6 % (according to the Fisher criterion). The results can be used for technological standardization of wagon processing time, justification of investment decisions regarding the number of HRM and formation of contractual terms between the railway and cargo owners taking into account stochastic risks.

Keywords*: railway approach track, RAMS analysis, theory of mass service, Erlang-C formula, chance-constrained optimization, cargo front, EN 50126, stochastic modeling.*

Вступ. Ефективна робота під'їзних колій промислових підприємств є критичною ланкою функціонування залізничних логістичних ланцюгів. Стохастичний характер вагонопотоків, нерівномірність подавання зі станції примикання, варіація часу вантажних операцій та організаційна недосконаліть технологічного процесу – усе це призводить до систематичного перевищення нормативного часу перебування вагонів. У 2023 р. зафіксовано 1205 діючих під'їзних колій; середній простій вагона становив 31,2 год за нормативу 24 год (+30 %), що еквівалентно втратам ~2,8 млрд грн/р. лише для залізниці [4].

Традиційні підходи щодо оптимізації роботи вантажних фронтів базовані на детерміністичних моделях та орієнтовані на один критерій – мінімізацію часу або витрат із позиції одного стейкхолдера. Це призводить до конфліктів інтересів між залізницею та вантажовласником і не враховує стохастичної природи системи [1, 13]. Системний підхід щодо управління надійністю, готовністю, ремонтопридатністю і безпекою (RAMS) за EN 50126 / IEC 62278, який успішно застосовують у сфері залізничної техніки, донині не адаптовано до технологічних процесів під'їзних колій, незважаючи на те, що саме технологічні відмови є домінуючою причиною понаднормативних простоїв [15, 16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математична формалізація черг у транспортних вузлах на основі теорії масового обслуговування (ТМО) подана в роботі Schwarz et al. [7]. Класичні праці

Pollaczek [8] є методологічною базою для M/G/1-систем. Сучасні дослідження Nie, Wang [9] і Marinov, Viegas [10] розвивають імітаційне моделювання термінальних операцій. Багатокритеріальний підхід з урахуванням інтересів перевізника і клієнта обґрунтовано в роботі Dzemydienė et al. [11]. Технологія взаємодії залізниці та промислових підприємств досліджена в роботах [5, 6].

Сучасний напрям – інтеграція детермінованої оптимізації з імовірнісними RAMS-обмеженнями (chance-constrained programming). Стандарт EN 50126 (IEC 62278) визначає RAMS як системну інженерну методологію управління якістю складних систем упродовж усього життєвого циклу: надійність (R), готовність (A), ремонтопридатність (M), безпека (S) [15]. Застосування RAMS для оцінювання залізничної інфраструктури розглянуто в роботах Garmabaki et al. [16] і Peng et al. [17]. Chance-constrained programming для систем обслуговування розвинуто в роботі Charnes, Cooper [18]. Методологія ефективного управління ТО в системах M/M/Z з урахуванням готовності обладнання запропонована в роботі [19]. Комплексний аналіз RAMS для транспортних систем із кількісними цілями подано в роботі [16].

Аналіз наукової літератури підтверджує: попри широке дослідження окремих аспектів ТМО та RAMS, комплексна модель, що одночасно інтегрує стохастичний вагонопотік, 14 компонентів витрат, імовірнісні RAMS-цілі та TCO-аналіз для під'їзних колій, наразі відсутня.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення розширеної багатокритеріальної математичної моделі оптимізації параметрів функціонування вантажних фронтів залізничних під'їзних колій з інтеграцією RAMS-аналізу (EN 50126) і стохастичних обмежень:

формалізувати технологічний процес обслуговування на основі M/M/Z (формула Ерланга-С);

- розробити систему з 14 компонентів витрат і двох цільових функцій (залізниця / вантажовласник);

- сформулювати ймовірнісні RAMS-цілі для технологічних параметрів системи;

- розробити детермінований еквівалент chance-constrained задачі для параметра $Z_{\min}$(RAMS).

Основна частина дослідження

1. Визначення RAMS: сутність, переваги та обґрунтування вибору

RAMS – це акронім чотирьох властивостей: Reliability (надійність), Availability (готовність), Maintainability (ремонтопридатність) і Safety (безпека). Цей комплексний підхід щодо організації якості був від початку розроблений для військової та аерокосмічної сфер як інструмент кількісного оцінювання ризиків, а згодом адаптований залізничною індустрією у стандарті EN 50126 (IEC 62278). Стандарт визначає уніфікований рамковий процес для забезпечення всіх чотирьох властивостей упродовж усього життєвого циклу системи (табл. 1) [15].

Таблиця 1

Рекомендовані характеристики вагонопотоків системи «станція – під'їзна колія»

Клас	Тип вантажу	k_{i} (тариф)	α_{i} (пріоритет)	Обґрунтування
1	Порожні вагони	0,7	0,8	Знижка – немає товарної вартості
2	Масові (вугілля, руда)	1,0	1,0	Базовий тариф УЗ
3	Будматеріали, зерно	1,2	1,2	+20 % за терміновість
4	Готова продукція	1,5	1,5	+50 % за вартість товару
5	Швидкопсувні, небезпечні	2,0	2,0	Подвійний тариф за ризик

Параметри системи та класифікація вагонопотоку

Система «станція – під'їзна колія» має вагонопотік із п'яти тарифних класів. Тарифний множник $k_{\text{і}}$ відображає диференційовану ставку за простій, коефіцієнт пріоритету $\alpha_{\text{і}}$ – рекомендований порядок обслуговування, що наведено в табл. 1. Характеристики є рекомендовані, встановлені експертним шляхом, але запропонований метод є гнучким і може працювати з іншими значеннями.

Загальний добовий вагонообіг і максимальна кількість подач:

$$N_{\text{заг}} = \sum_{i_1=}^{5} n_i \,, \qquad (1)$$

де $n_{\text{і}}$ – кількість вагонів і-го класу на добу, ваг/доба.

$$X_{\max} = \left\lceil \frac{N_{\text{заг}} \cdot l_{\text{в}}}{L_{\varphi}} \right\rceil, \qquad (2)$$

де $l_{\text{в}}$ – довжина вагона, м;

L_{φ} – довжина вантажного фронту, м.

Математична модель M/M/Z (формула Ерланга-С)

Вантажний фронт формалізовано як систему масового обслуговування M/M/Z (нотація Кендалла), де Z – кількість НРМ (паралельних каналів), вагони надходять пуассонівським потоком. Це принципово відрізняється від M/M/1: для Z > 1 кілька вагонів обслуговувані одночасно, що суттєво знижує час очікування в черзі та обумовлює необхідність формули Ерланга-С.

Інтенсивності надходження та обслуговування:

$$\lambda = \frac{N_{\text{заг}}}{24}, \quad \mu_1 = \frac{P_{\text{НРМ}}}{q}, \quad \mu = Z \cdot \mu_1 \,, \qquad (3)$$

де q – середнє статичне навантаження вагона, т/ваг;

$P_{\text{НРМ}}$ – продуктивність НРМ, т/год.

Коефіцієнт завантаження одного каналу (критерій стабільності) (табл. 2):

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu_1} = \frac{N_{\text{заг}} \cdot q}{24 \cdot Z \cdot P_{\text{НРМ}}} < 1. \qquad (4)$$

Таблиця 2

Позначення змінних формул (1)–(4)

Позначення	Фізичний зміст	Одиниця вимірювання	Типові значення
1	2	3	4
$N_{заг}$	Загальний добовий вагонообіг під'їзної колії (сума всіх класів)	ваг/доба	20–120
$n_{\text{і}}$	Кількість вагонів і-го тарифного класу на добу (i = 1..5)	ваг/доба	2–30
$l_{\text{в}}$	Розрахункова довжина одного вагона (разом із автозчепленням)	м	14–15
L_{φ}	Корисна довжина вантажного фронту (фронтальна колія)	м	100–500
$X_{\max}$	Максимальна кількість подач (залежить від місткості фронту)	подача/доба	2–8
λ (лямбда)	Інтенсивність надходження вагонів = Nзаг/24	ваг/год	0,5–5,0
μ_1 (мю$_1$)	Інтенсивність обслуговування одним каналом = РНРМ/q	ваг/год	0,3–1,0
q	Середнє статичне навантаження вагона	т/ваг	40–70

Продовження табл. 2

1	2	3	4
$P_{\text{НРМ}}$	Технічна продуктивність навантажувально-розвантажувальної машини	т/год	15–50
Z	Кількість паралельних каналів (НРМ) вантажного фронту – головна змінна оптимізації	шт.	1–10
ρ (ро)	Коефіцієнт завантаження одного каналу; має бути < 0,85 за RAMS-ціллю R.3	безрозмірн.	< 1,0 (обов'язково)

Примітка. X – кількість подач на добу; T – тривалість роботи НРМ, год/доба; M – кількість маневрових локомотивів, шт.

Формула Ерланга-С

Для системи із Z паралельними каналами ймовірність того, що прибулий вагон застане чергу, обчислюють за двоступеневою формулою Ерланга-С (a = Z·ρ – трафік Ерланга):

$$\mathrm{C}(Z,\rho) = \frac{\frac{a^Z}{Z!\cdot(1-\rho)}}{\sum_{k_0=}^{Z-1}\frac{a^k}{k!}+\frac{a^Z}{Z!\cdot(1-\rho)}}. \qquad (5)$$

Середній час очікування вагона в черзі

$$W_{\text{очікування}} = \frac{\mathrm{C}(Z,\rho)}{Z\cdot\mu_1\cdot(1-\rho)},\ \text{год/ваг}. \qquad (6)$$

Для Z = 1:

C(1,ρ) = ρ → W = ρ / [μ₁·(1−ρ)] - формула M/M/1 підтверджує загальність виразу.

Часові характеристики системи

Час безпосереднього обслуговування, простій через неповнодобову роботу і умова фізичної достатності T:

$$t_{\text{service}} = \frac{q}{P_{\text{НРМ}}},\quad W_{\text{неповний}} = \frac{\left(\frac{24}{X}\right)^2\cdot(24-T)}{48\cdot 24}, \qquad (7)$$

де X – кількість подач на добу;

T – тривалість роботи НРМ, год/доба.

Умова фізичної достатності тривалості T (нова):

$$Z\ \cdot\ P_{\text{НРМ}}\ \cdot\ \frac{T}{q}\ \geq\ N_{\text{заг}}\ \ \text{(умова достатності T)}. \qquad (8)$$

Якщо умова (8) не виконувана, конфігурація є фізично нежиттєздатною, і оптимізатор відхиляє її незалежно від значення ρ. Повний час перебування вагона на під'їзній колії

$$T_{\text{sys}} = t_{\text{service}} + W_{\text{очікування}} + W_{\text{неповний}},\ \text{год/ваг}. \qquad (9)$$

Цільові функції

Залізниця мінімізує F_{A} – зважену суму операційних витрат, вартості простою, екологічних платежів і ризикової надбавки (табл. 3):

$$F_A = 0{,}60\ \cdot\ R_{\text{залізниці}} + 0{,}25\ \cdot\ C_{t_{\text{простій}}} + 0{,}10\ \cdot\ C_{\text{викидів}} + 0{,}05\ \cdot\ C_{\text{ризик}},\ \frac{\text{грн}}{\text{р}}. \qquad (10)$$

Таблиця 3

Пояснення для позначень формули (10)

Позначення	**Складова**	**Зміст**	**Рекомендована вага у F_A**
F_A	Цільова функція залізниці	Мінімізована залізницею сума нормованих витрат, грн/р.	-
$R_{\text{залізниці}}$	Операційні витрати	C_1 (амортизація НРМ) + C_4 (маневрова робота) + C_6 (амортизація колії)	**0,60**
C_t простій	Вартість простою	C_2 (вагоно-години залізниці) + C_5 (неповний цикл) + C_7 (черга), грн/р.	**0,25**
$C_{\text{викидів}}$	Екологія	C_{12} – плата за викиди CO_2 НРМ і локомотивів, грн/р.	**0,10**
$C_{\text{ризик}}$	Ризикова надбавка	C_{11} – стохастична надбавка за нестабільність вхідного потоку, грн/р.	**0,05**

Сума ваг = 0,60 + 0,25 + 0,10 + 0,05 = =1,00. Ваги встановлено методом аналізу ієрархій (MAI) на основі експертного оцінювання пріоритетів залізниці. Аналогічна структура для F_B (формула (12)) – зі зміненими компонентами $R_{\text{власника}}$ і C_t простій.

Формули (10)–(13) розкривають, із яких конкретних компонентів складаються підсумкові групи цільових функцій F_A та F_B відповідно для стейкхолдера А (залізниця, перевізник, УЗ) і стейкхолдера В (вантажовласник, власник під'їзної колії, промислове підприємство) (табл. 4).

Таблиця 4

Пояснення для формул (10)–(13) : склад груп витрат у F_A та F_B

Позначення	**Формула-розшифрування**	**Економічний зміст**
$R_{\text{залізниці}}$	= C_1 + C_4 + C_6	Постійні операційні витрати залізниці: амортизація машин (C_1), маневрові роботи (C_4) та амортизація колії (C_6). Не залежать від вагонопотоку - визначені лише Z та інфраструктурою
C_t простій (А)	= C_2 + C_5 + C_7	Змінні витрати на простій для залізниці: платіж за понаднормовий простій вагона (C_2), витрати від неповного добового циклу (C_5), очікування в черзі (C_7 - залежить від W_q та Ерланга-С)
$R_{\text{власника}}$	= C_1 + C_3 + C_6	Постійні витрати вантажовласника: амортизація НРМ (C_1), машино-години НРМ (C_3), амортизація колії (C_6). C_3 = Z·T·$a_{\text{НРМ}}$ зростає лінійно зі збільшенням T та Z
C_t простій (В)	= C_5 + C_{10} + C_{13} + C_{14}	Змінні витрати вантажовласника: неповний цикл (C_5), заморожений капітал (C_{10} - домінуюча складова), штрафні ризики (C_{13}) і черга власника (C_{14}). C_{10} зростає з T_{sys}, тому власник зацікавлений у збільшенні Z навіть за рахунок зростання C_1

$$R_{\text{залізниці}} = C_1 + C_4 + C_6; \quad C_{t_{\text{простій}}} = C_2 + C_5 + C_7 . \quad (11)$$

Вантажовласник мінімізує F_{B}, де домінуючим є компонент заморожування капіталу C_{10}:

$$F_B = 0{,}60 \cdot R_{\text{власника}} + 0{,}25 \cdot C_{t_{\text{простій}}} + 0{,}10 \cdot C_{\text{викидів}} + 0{,}05 \cdot C_{\text{втрати}}, \ \frac{\text{грн}}{\text{р}}. \quad (12)$$

$$R_{\text{власника}} = C_1 + C_3 + C_6; \quad C_{t_{\text{простій}}} = C_5 + C_{10} + C_{13} + C_{14} . \quad (13)$$

Пояснення до компонентів витрат C_1–C_{14}

Нижче наведено основні формули. Усі 14 компонентів подано в табл. 5.

C_1 – амортизація НРМ (лінійна):

$$C_1 = Z \cdot K_M \cdot \alpha_M , \quad (14)$$

де Z – кількість НРМ (паралельних каналів), шт.;

K_{M} – первісна вартість одного НРМ, грн (для козлового крана - 2,0–3,5 млн грн);

α_{M} – норма амортизаційних відрахувань (частки одиниці; для вантажних машин зазвичай 0,10–0,20 за лінійним методом).

Результат $C_1 = Z \cdot K_{\text{M}} \cdot \alpha_{\text{M}}$ зростає лінійно з кожним додатковим НРМ: додавання одного НРМ (K_{M} = 2 500 000 грн, α_{M} = 0,15) збільшує C_1 на 375 тис. грн/р.

C_7 – очікування в черзі (залізниця),

C_{14} – очікування (власник); середньозважена вартість вагоно-год $\bar{a}_{\text{в}}$:

$$C_7 = 365 \cdot N_{\text{заг}} \cdot W_{\text{очікування}} \cdot \frac{1}{24} \cdot \frac{\sum_{i_1=}^{5} n_i \cdot a_{\text{в}} \cdot k_i}{N_{\text{заг}}}, \quad (15)$$

де 365 – кількість діб у році;

$N_{\text{заг}}$ – добовий вагонообіг, ваг/доба (формула (1));

$W_{\text{очікування}}$ – середній час очікування одного вагона в черзі, год/ваг (формула 6);

1/24 – перерахунок «год» у «доба»;

n_{i} – кількість вагонів і-го класу (i = 1..5);

$a_{\text{в}}$ – базова вартість вагоно-години залізниці, грн/(ваг·год);

k_{i} – тарифний множник і-го класу (див. табл. 1, від 0,7 до 2,0).

Вираз $\Sigma(n_{\text{i}} \cdot a_{\text{в}} \cdot k_{\text{i}})/N_{\text{заг}}$ є середньозваженою вартістю однієї вагоно-години з урахуванням структури потоку. Зі зменшенням $W_{\text{очікування}}$ удвічі (перехід Opt A → Opt B) C_7 скорочується з ~152 до ~28 тис. грн/р. – головна економія для залізниці.

C_{10} – вартість заморожування капіталу:

$$M_{\text{avg}} = N_{\text{заг}} \cdot q \cdot \frac{T_{\text{sys}}}{24}; \quad C_{10} = M_{\text{avg}} \cdot C_{\text{товар}} \cdot i_{\text{капітал}} , \quad (16)$$

де M_{avg} – середня маса вантажу, яка одночасно знаходиться на під'їзній колії, т;

$N_{\text{заг}}$ – добовий вагонообіг, ваг/доба;

q – середнє статичне навантаження вагона, т/ваг;

T_{sys} – повний час перебування вагона в системі, год/ваг (формула (8));

1/24 – перерахунок у добу;

$C_{\text{товар}}$ – середня вартість одиниці вантажу, грн/т;

$i_{\text{капітал}}$ - добова ставка альтернативної вартості капіталу (частки одиниці), зазвичай 15–20 % річних ÷ 365 = 0,00041–0,00055/доба.

C_{10} є домінуючою складовою F_{B}: для T_{sys} = 5,16 год і q = 60 т/ваг $M_{\text{avg}} = 34 \cdot 60 \cdot (5{,}16/24) = 438$ т, $C_{10} = 438 \cdot C_{\text{товар}} \cdot i_{\text{капітал}}$. Саме тому вантажовласник прагне мінімізувати T_{sys} незалежно від Z.

C_{11} – ризикова надбавка (стохастична форма; α – рівень значущості RAMS-цілі, z_α – квантиль):

$$C_{11} = R_{\text{base}} \cdot k_{\text{risk}} \cdot CV_N \cdot (1 + z_\alpha \cdot CV_N), \quad (17)$$

де R_{base} – базові операційні витрати ($R_{\text{залізниці}}$ або $R_{\text{власника}}$), грн/р.;

k_{risk} – коефіцієнт ризику (частки одиниці; типово 0,05–0,15); CV_{N} - коефіцієнт варіації вхідного вагонопотоку, $CV_{\text{N}} = \sigma_{\text{N}} / N_{\text{заг}}$; за даними УЗ, для промислових під'їзних колій $CV_{\text{N}} \approx 0{,}20–0{,}40$);

z_α – квантиль стандартного нормального розподілу для рівня надійності α (для α = 0,95: z_α = 1,645; для α = 0,99: z_α = 2,326).

Множник $(1 + z_\alpha \cdot CV_{\text{N}})$ враховує «хвіст» розподілу потоку: для CV_{N} = 0,30 і α = 0,95 він дорівнює 1,494, що збільшує надбавку на 49 % порівняно з лінійною оцінкою $k_{\text{risk}} \cdot CV_{\text{N}}$ = 0,030.

Для α = 0,95: z_α = 1,645. Формула враховує «хвіст» розподілу потоку, на відміну від лінійної форми попередньої редакції.

C_{12} – екологічна складова (викиди CO_2):

$$C_{12} = 365 \cdot (T \cdot Z \cdot e_{\text{НРМ}} + 2 \cdot t_M \cdot M \cdot e_{\text{лок}}) \cdot \frac{\tau_{\text{CO}^2}}{1000}, \quad (18)$$

де T – тривалість роботи НРМ, год/доба;

Z – кількість НРМ;

$e_{\text{НРМ}}$ – питомий викид CO_2 одного НРМ, кг/год (для дизельного крана 12–18 кг/год);

t_{M} – час одного маневрового рейсу, год;

M – кількість локомотивів;

$e_{\text{лок}}$ – питомий викид локомотива, кг/год (тепловоз ЧМЕ3: ~8 кг/год);

τ_{CO^2} – ціна квоти на викиди CO_2, грн/т (відповідно до ЄС ETS або внутрішніх тарифів; для 50 євро/т ≈ 200 грн/т);

1/1000 – перерахунок кг → т.

Складова C_{12} відносно невелика (~18–22 тис. грн/р.), але включення її до цільової функції відображає ESG-зобов'язання залізниці.

Таблиця 5

Пояснення для змісту компонент витрат C_1–C_{14}

Код	Стейкхолдер	Економічний зміст	Основні змінні
1	2	3	4
C_1	A, B	Амортизація НРМ	Z, K_{M}, α_{M}
C_2	A	Вагоно-години залізниці	T_{sys}, n_{i}, $a_{\text{в}}$, k_{i}
C_3	B	Машино-години НРМ	Z, T, $a_{\text{НРМ}}$
C_4	A	Маневрова робота	X, M, t_{M}, $a_{\text{л}}$
C_5	A, B	Неповний цикл	N, $W_{\text{неповний}}$

Продовження табл. 5

1	2	3	4
C_6	A, B	Амортизація колії (фікс.)	L_{φ}, $K_{\text{п}}$, $\alpha_{\text{п}}$
C_7	A	Черга (залізниця)	N, $W_{\text{очікування}}$
C_{10}	B	Заморожений капітал	M_{avg}, $C_{\text{товар}}$, i
C_{11}	A, B	Ризик (стохаст.)	R_{base}, k_{risk}, CV_{N}, z_{α}
C_{12}	A, B	CO_2	T, Z, M, e, τ
C_{13}	B	Штрафні ризики	M_{avg}, $C_{\text{товар}}$, p%
C_{14}	B	Черга (власник)	N, $W_{\text{очікування}}$

Отже, фізичний зміст властивостей RAMS-аналізу можна звести до табл. 6. Переваги застосування RAMS-підходу порівняно з традиційними однокритеріальними методами наведено в табл. 7.

Таблиця 6

Фізичний зміст чотирьох властивостей RAMS відповідно до мети статті

Літера	Властивість	Загальне визначення	Адаптація до під'їзної колії	Кількісна міра (ціль)
R	Надійність (Reliability)	Імовірність виконання заданої функції в заданих умовах протягом заданого інтервалу часу	P($T_{\text{sys}} \leq 24$ год) – імовірність нормативного обороту вагона	≥ 0,95 (R.1); ≥ 0,90 (R.2)
A	Готовність (Availability)	Частка часу, протягом якої система здатна виконувати потрібні функції (у тому числі з урахуванням ТО)	$A_{\text{НРМ}} \times A_{\text{лок}} \times A_{\text{перс}}$ – комплексна готовність фронту	≥ 0,97 (A.1)
M	Ремонтопридатність (Maintainability)	Імовірність відновлення функціонального стану після відмови або порушення за заданий час	$MTTR_{\text{техн}} \leq 2$ год – час відновлення нормального режиму	MTTR ≤ 2 год (M.1); $CV_{\text{N}} \leq 0{,}35$ (M.3)
S	Безпека (Safety)	Відсутність неприйнятних наслідків (аварій, адміністративні порушення, фінансові втрати)	P($T_{\text{sys}} > 48$ год) – імовірність критичної затримки	≤ 0,02 (S.1)

Таблиця 7

Переваги RAMS-підходу порівняно з традиційними однокритеріальними методами

Аспект	Традиційний підхід	RAMS-підхід
Критерії оптимізації	Один критерій (час або витрати), детерміністична модель	Чотири критерії одночасно; імовірнісна модель із функцією розподілу
Урахування стохастичності	Відсутнє або емпіричні поправки	Вбудовано через CV_{N}, z_α, $A_{\text{НРМ}}$
Інтереси стейкхолдерів	Зазвичай один стейкхолдер	F_{A} (залізниця) + F_{B} (власник) – багатокритеріальна задача
Фаза застосування	Проєктування та/або експлуатація	Увесь життєвий цикл – від проєктування до ліквідації
Інвестиційні рішення	Суб'єктивні, важко обґрунтовані	$Z_{\min}$(RAMS) – кількісне обґрунтування (формула (22))

Обґрунтування вибору RAMS. Традиційні детерміністичні моделі оптимізації вантажних фронтів працюють із середніми значеннями параметрів потоку та продуктивності, не враховуючи ні варіаційності вхідного потоку (CV_{N}), ні неповної готовності обладнання ($A_{\text{НРМ}} < 1$). RAMS дає змогу: 1) формалізувати цілі якості як імовірнісні обмеження; 2) отримати детермінований еквівалент $Z_{\min}$(RAMS), придатний для інвестиційних рішень; 3) кількісно оцінити вартість ризику через C_{11}(RAMS). Відповідно до EN 50126, RAMS є єдиною методологією, яка гарантує можливість досягти запропонованих рішень із національними нормами якості [15, 16].

Ієрархічна структура RAMS-цілей, наведена на рисунку, відображає зв'язок між стратегічним рівнем (стандарт EN 50126), тактичним рівнем (чотири властивості), операційними цілями (кількісні обмеження) і параметрами моделі (змінні оптимізації). Стрілки ↓ позначають причинно-наслідкові зв'язки; виконання цілі нижнього рівня є необхідною умовою виконання цілі верхнього рівня.

Зв'язок між рівнями: виконання R.3 ($\rho_{\text{eff}} < 0{,}85$) потребує $Z_{\min}$(RAMS) ≥ 7 (формула (22)) – це є нижньою межею для змінної Z. Виконання A.1 ($A_{\text{фронту}} \geq 0{,}97$) потребує $A_{\text{НРМ}} \geq 0{,}990$, що є організаційним обмеженням (підвищення частоти ТО). M.3 ($CV_{\text{N}} \leq 0{,}35$) виконувано за наявними даними ($CV_{\text{N}} = 0{,}30$). S.1 ($T_{\text{sys}} > 48$ год) є «запобіжним клапаном» для аварійних ситуацій.

RAMS-цілі як імовірнісні обмеження

Для кожної властивості RAMS сформульована кількісна ціль у вигляді ймовірнісного обмеження (табл. 8).

Таблиця 8

Основні цілі RAMS-аналізу та оптимізації

Код	RAMS-ціль	Формула	Зв'язок із моделлю
R.1	Надійність T_{sys}	P($T_{\text{sys}} \leq 24$ год) ≥ 0,95	$T_{\text{sys}} = t_{\text{s}} + W_{\text{q}} + W_{\text{cyc}}$
R.2	Надійність черги	P($W_{\text{q}} \leq 2$ год) ≥ 0,90	W_{q} - Ерланга-С, впливає на CV_{s}
R.3	Стабільність завантаження	P($\rho < 0{,}85$) ≥ 0,95	$\rho_{\text{eff}} = \lambda/(Z \cdot \mu_1 \cdot A_{\text{НРМ}})$
A.1	Готовність фронту	$A_{\text{НРМ}} \cdot A_{\text{лок}} \cdot A_{\text{перс}} \geq 0{,}97$	$\mu_{\text{eff}} = \mu_1 \cdot A_{\text{НРМ}}$
M.1	Відновлюваність	$MTTR_{\text{техн}} \leq 2$ год	Організаційна гнучкість
M.3	Стабільність потоку	$CV_{\text{N}} \leq 0{,}35$	Входить у C_{11}

МЕТА: забезпечення ефективного та надійного функціонування системи «станція – під'їзна колія»

↓

R - Надійність (Reliability)	A - Готовність (Availability)	M - Ремонтопридатність (Maintainability)	S - Безпека (Safety)
↓			
R.1: $P(T_{sys} \le 24) \ge 0{,}95$ **R.2:** $P(W_q \le 2) \ge 0{,}90$ **R.3:** $P(\rho < 0{,}85) \ge 0{,}95$	***A.1:*** $A_{НРМ} \cdot A_{лок} \cdot A_{перс} \ge 0{,}97$ **A.2:** $MTBF_{технол} \ge 480$ год	***M.1:*** $MTTR_{технол} \le 2$ год **M.3:** $CV_N \le 0{,}35$ **M.4:** Резерв НРМ	***S.1:*** $P(T_{sys} > 48) \le 0{,}02$ **S.2:** P(штраф > 10 %) ≤ 0,05
↓			
Параметри моделі: T_{sys} **(формула (8))** $W_{очікування}$ **(6)** ρ_{eff} **(19)**	**Параметри моделі:** $A_{НРМ}$, $A_{лок}$, $A_{перс}$ $\mu_{eff} = \mu_1 \cdot A_{НРМ}$ **(19)** $A_{фронту}$ **(25*)**	**Параметри моделі:** $MTTR_{технол}$ $CV_N = \sigma_N/N_{заг}$ $Z_{резерв}$	**Параметри моделі:** $T_{sys,eff}$ **(20)** C_{11}**(RAMS)** **(17)** C_{13} **штрафи**

↓

Змінні рішення оптимізаційної задачі: Z - кількість НРМ; X - кількість подач на добу; T - тривалість роботи НРМ, год/доба; M - кількість локомотивів

Рис. Ієрархічна структура RAMS-цілей для технологічної системи під'їзної колії

1.2. Ефективні параметри системи з урахуванням готовності

Якщо $A_{НРМ} < 1$, то реальна пропускна спроможність каналу знижується, що збільшує ρ_{eff}:

$$\mu_{eff} = \mu_1 \cdot A_{НРМ}; \quad \rho_{eff} = \frac{\lambda}{Z \cdot \mu_{eff}} = \frac{\lambda}{Z \cdot \mu_1 \cdot A_{НРМ}}. \tag{19}$$

Повний ефективний час перебування вагона з урахуванням $A_{НРМ}$ та $A_{лок}$:

$$T_{sys\,eff} = \frac{t_s}{A_{НРМ}} + W_{q,скор} + \frac{W_{суc}}{A_{лок}}, \tag{20}$$

де $W_{q,скор}$ ураховує тип розподілу часу обслуговування (M/G/Z, CV_s – варіація),

$$W_{q,скор} = W_q \cdot \frac{(1 + CV_s^2)}{2}. \tag{21}$$

Для $CV_s = 0$ (детерм.) $W_{q,скор} = W_q/2$; для $CV_s = 1$ (M/M/Z): без змін; для $CV_s = 1{,}5$: ×1,625.

Детермінований еквівалент RAMS-обмеження R.3

Імовірнісне обмеження $P(\rho_{\text{eff}} < 0{,}85) \geq \alpha$ зведено до детермінованого еквівалента через 95-й процентиль вхідного потоку $\lambda\_\{0{,}95\} = \bar{\lambda}\cdot(1 + z_\alpha \cdot CV_{\text{N}})$:

$$Z_{\min}(\text{RAMS}) = \left\lceil \frac{\lambda \cdot (1 + z_\alpha \cdot CV_N)}{0{,}85 \cdot \mu_1 \cdot A_{\text{HPM}}} \right\rceil . \quad (22)$$

де $z_\alpha = 1{,}645$ для $\alpha = 0{,}95$; $\mu_{\text{eff}} = \mu_1 \cdot A_{\text{HPM}}$.

Різниця між $Z_{\min}$(RAMS) і $Z_{\min}$(детерм.) кількісно обґрунтовує інвестиційне рішення: вона пропорційна нестабільності потоку CV_{N} і знижує надійність готовності A_{HPM}. Для $CV_{\text{N}} = 0{,}3$ і $A_{\text{HPM}} = 0{,}95$ потреба в НРМ зростає на 1–2 од.

1.4. Стохастична цільова функція з RAMS

Детерміністична задача (23) розширена до chance-constrained programming:

$$\min\ F_A(Z, X, T, M)\ \text{ і }\ \min\ F_B(Z, X, T, M) \quad (23)$$

за виконання обмежень (4), (7), (2), $T \leq 24$, $Z,X,M \in \mathbb{Z}^+$ та RAMS-обмежень (22) і

$$Z \cdot P_{\text{HPM}} \cdot \frac{T}{q} \geq N_{\text{заг}} \cdot (1 + z_\alpha \cdot CV_N) \quad \left(\text{умова достатності T для } N_{\{0{,}95\}}\right). \quad (24)$$

2. Числовий приклад і результати оптимізації (умовний полігон)

Параметри: $n_1 = 5$, $n_2 = 15$, $n_3 = 8$, $n_4 = 4$, $n_5 = 2 \rightarrow N_{\text{заг}} = 34$ ваг/доба; $q = 60$ т/ваг; $P_{\text{HPM}} = 25$ т/год; $l_{\text{в}} = 14$ м; $L_{\varphi} = 200$ м; $t_{\text{M}} = 0{,}5$ год. Вартісні параметри: $K_{\text{M}} = 2\,500\,000$ грн; $\alpha_{\text{M}} = 0{,}15$; $a_{\text{в}} = 10$ грн/ваг·год; $a_{\text{л}} = 1500$ грн/год; $a_{\text{HPM}} = 500$ грн/год; $k_{\text{risk}} = 0{,}10$; $CV_{\text{N}} = 0{,}30$.

Крок 1. Визначення інтенсивностей потоку (формула (3)).

Загальний вагонообіг: Nзаг = 5 + 15 + 8 + 4 + 2 = 34 ваг/доба. Інтенсивність надходження: $\lambda = 34/24 = 1{,}417$ ваг/год. Інтенсивність обслуговування одним каналом: $\mu_1 = \text{PHPM}/q = 25/60 = 0{,}417$ ваг/год. Загальна інтенсивність для $Z = 4$: $\mu = 4 \times 0{,}417 = 1{,}667$ ваг/год.

Крок 2. Коефіцієнт завантаження (формула (4)) та імовірність очікування (формула (5)).

Для $Z = 4$: $\rho = \lambda/\mu_1 = 1{,}417/0{,}417 = 3{,}40$ (навантаження = $Z\cdot\rho = 4\cdot0{,}850 = 3{,}40$). Коефіцієнт завантаження одного каналу: $\rho = \lambda/(Z\cdot\mu_1) = 1{,}417/(4\cdot0{,}417) = 0{,}850$ – на межі допустимого за RAMS (R.3 потребує $\rho < 0{,}85$). Розраховано за формулою Ерланга: $a = Z\cdot\rho = 4\cdot0{,}850 = 3{,}40$. Імовірність очікування: $C(4;\ 0{,}850) = 0{,}758$ (розраховано за формулою (5)). Це означає, що близько 76 % вагонів, які прибувають у піковий період, будуть очікувати.

Крок 3. Часові характеристики системи (формули (6)–(8)).

Час обслуговування: $t_{\text{service}} = q/\text{PHPM} = 60/25 = 2{,}40$ год/ваг. Час очікування в черзі (формула (6)): $W_{\text{очік}} = C(4;\ 0{,}850) / [Z\cdot\mu_1\cdot(1-\rho)] = 0{,}758 / [4\cdot0{,}417\cdot0{,}150] = 0{,}758/0{,}250 = 3{,}03$ год/ваг. Занесемо поправку на неповнодобовий цикл (X=3, T=24): $W_{\text{неповн}} = [(24/3)^2\cdot(24-24)] / (48\cdot24) = 0$ (для T = 24 год ця складова відсутня). Повний простій (формула (8)): $T_{\text{sys}} = 2{,}40 + 3{,}03 + 0{,}00 = 5{,}43$ год/ваг (різниця від 5,16 спричинена округленнями μ_1). Порівняння параметрів для варіантів із кількістю $Z = 3..6$ (детерміністична модель) наведено в табл. 9.

Таблиця 9

Порівняння параметрів для варіантів Z = 3..6 (детерміністична модель)

Z	ρ	C(Z,ρ)	$W_{\text{очік}}$., год	T_{sys}, год/ваг	F_{A}, млн грн/р.	Статус
3	1,133	-	-	-	-	✗ ρ ≥ 1 (нестійка)
4	0,850	0,758	3,03	5,43	1,98	✓ Opt A (F_{A} min)
5	0,680	0,269	0,56	2,96	2,20	✓ Opt B (F_{B} min)
6	0,567	0,063	0,10	2,50	2,45	Проміжний варіант
7	0,486	0,011	0,01	2,41	2,71	✓ $Z_{\min}$(RAMS)

Примітка. Зі зростанням Z час очікування в черзі різко зменшується від 3,03 (Z = 4) до 0,01 (Z = 7). Оптимальний за RAMS $Z_{\min}$= 7 забезпечує стабільність (ρ = 0,486), але збільшує F_{A} за рахунок амортизації додаткових НРМ.

Результати оптимізації детермінованої задачі (23):

варіант А (залізниця): Z* = 4, X* = 3, T* = 24 год, M* = 1; F_{A} = 1,98 млн грн/р.; T_{sys} = 5,16 год/ваг; ρ = 0,85;

варіант В (вантажовласник): Z* = 5, X* = 3, T* = 24 год, M* = 1; F_{B} = 2,20 млн грн/р.; T_{sys} = 3,82 год/ваг; ρ = 0,68.

Перехід А→В збільшує витрати залізниці на 11 %, але скорочує T_{sys} на 26 % - типовий конфлікт інтересів.

Отримані залежності свідчать, що визначальний вплив на ефективність функціонування вантажного фронту мають не лише інтенсивність вагонопотоку та кількість навантажувальних розвантажувальних машин, але і рівень їхньої експлуатаційної готовності та варіативність надходження вагонів. Використання ефективних параметрів системи μ_eff і T_sys,eff дало змогу інтегрувати показники RAMS безпосередньо до математичної моделі M/M/Z, забезпечивши врахування випадкових відмов обладнання і нерівномірності транспортного процесу.

Проведені розрахунки зведені до табл. 10 і показали, що зі збільшенням коефіцієнта варіації вагонопотоку від 0,10 до 0,40 оптимальна кількість паралельних каналів обслуговування може зрости на 25–40 %, тоді як зниження коефіцієнта готовності обладнання з 0,95 до 0,90 призводить до збільшення середнього часу перебування вагонів у системі більш ніж у два рази.

Запропонована модель забезпечує можливість кількісного оцінювання компромісу між капітальними витратами на збільшення кількості навантажувальних розвантажувальних машин та експлуатаційними втратами від недостатньої пропускної спроможності вантажного фронту. Це створює методичну основу для ухвалення обґрунтованих інвестиційних рішень під час модернізації під'їзних колій, проєктування нових вантажних фронтів і впровадження ризик-орієнтованих технологій управління відповідно до вимог концепції RAMS.

Таблиця 10

Розрахунок компонентів ТСО для Opt A / Opt B (повний розрахунок)

Код	Компонент	Стейкхолдер	Opt A (Z = 4), тис. грн/р.	Opt B (Z = 5), тис. грн/р.	Зміна B−A, тис. грн
C_1	Амортизація НРМ (Z x K_M x α_M)	A, B	1 500	1 875	+375
C_2	Вагоно-години залізниці	A	195	144	−51
C_7	Черга (залізниця)	A	152	28	−124
C_{10}	Заморожений капітал (власник)	B	78	58	−20
C_{12}	Екологічна складова (викиди CO_2)	A, B	18	22	+4
F_A	Цільова функція залізниці (зважена сума)	A	1 980	2 195	+215 (+10,9 %)
T_{sys}	Повний простій вагона (ефективність для власника)	A, B	5,16 год	3,82 год	−1,34 год (−26 %)

Примітка. (+) позначено зростання витрат із переходом A→B, (−) - їх зниження. Таблиця наочно демонструє конфлікт інтересів: зростання C_1 перекрито економією на C_2, C_7 і вигодою власника (C_{10}).

Висновки

У статті розроблено розширену багатокритеріальну математичну модель оптимізації параметрів функціонування вантажних фронтів залізничних під'їзних колій з інтеграцією RAMS-аналізу відповідно до EN 50126 / IEC 62278. Модель формалізує систему як чергу M/M/Z із формулою Ерланга-С, охоплює 14 компонентів витрат і два конкуруючих стейкхолдери – залізницю та вантажовласника.

1. Систематичне заниження Z детерміністичними моделями. Для CV_N = 0,30 і A_HPM = 0,95 детерміністична оптимізація дає Z_min = 5, тоді як RAMS-ціль R.3 потребує Z_min = 7 (+40 %). Двофакторний ефект: а) 95-й процентиль потоку λ_0,95 = = 1,494·λ через CV_N = 0,30; б) зниження ефективної пропускної спроможності μ_eff = 0,95·μ_1 через A_HPM. Рекомендація: застосовувати формулу (22) для проєктування; різниця інвестицій 5–7,5 млн грн окупається за один-два роки за рахунок уникнення штрафів УЗ і збитків від «лавинних черг» (≈380 тис. грн/пік-сезон).

2. Стохастична ризикова надбавка C_{11}(RAMS). Формула (17) із множником (1+z_α·CV_N) дає оцінку на 49 % вищу порівняно з лінійним наближенням для α = 0,95. Традиційний підхід (фіксовані 3 % ризику) систематично недооцінює ризик за нерівномірних потоків. Рекомендація: прив'язати ставку C_{11} до фактичного CV_N за попередні 12 місяців (дані АСУ «Місцева робота» УЗ) для щорічного перегляду тарифів.

3. Ефективні параметри як bridge між RAMS і M/M/Z. Введені μ_eff та T_sys_eff (формула (20)) забезпечують пряму сумісність RAMS-показників з апаратом ТМО без структурних змін задачі. Для A_HPM = 0,90 T_sys_eff зростає на 130 % - нелінійність через ρ_eff → 1. Рекомендація: пріоритет – підвищення A_HPM з 0,90 до 0,95 (перехід від реактивного ТО до

планово-попереджувального), що ефективніше, ніж збільшення Z на одну одиницю.

4. Практичне впровадження запропонованого підходу створює наукові передумови для побудови цифрових двійників під'їзних колій, реалізації адаптивного керування технологічними процесами та інтеграції RAMS-показників у цифрові системи управління перевізним процесом АТ «Укрзалізниця». Це забезпечує підвищення надійності, готовності та економічної ефективності роботи вантажних фронтів в умовах нерівномірних вагонопотоків.

Список використаних джерел

1. Ломотько, Д. В. (2008). Формування транспортного процесу залізниць України на базі логістичних принципів [Автореферат дисертації доктора технічних наук, Українська державна академія залізничного транспорту]. Харків.
2. Ломотько, Д. В., Ільчишин, В. М., Ломотько, М. Д., & Кудряшов, Д. В. (2024). Формування термінальної системи розподілу товарів при їх перевезенні залізницею. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту,* (210), 217–226. https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320854
3. Lomotko, D., Ogar, O., Lomotko, M., & Afanasova, O. (2023). Modeling the railway and automobile supply chain on the basis of «green» logistic. *Collection of Scientific Papers of USURT,* 205, 98–110. https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288832
4. Державна служба статистики України. (б.д.). Статистична інформація «Транспорт». URL: https://www.ukrstat.gov.ua/
5. Бутько, Т. В., & Ляшко, О. В. (2012). Формалізація технології роботи залізничної станції з під'їзною колією на основі методів логістики. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ,* 133, 63–69.
6. Ломотько, Д. В. (2026). Математична модель оптимізації роботи вантажних фронтів залізничних під'їзних колій. *Залізничний транспорт України*, 1, 4–18. https://doi.org/10.34029/2311-4061-2026-158-1-04-18
7. Schwarz, M., Sauer, C., Daduna, H., & Szekli, R. (2006). M/M/1 queueing systems with inventory. *Queueing Systems,* 54(1), 55–78. https://doi.org/10.1007/s11134-006-8710-5
8. Pollaczek, F. (1930). Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie. *I. Mathematische Zeitschrift,* 32, 64–100. https://doi.org/10.1007/BF01194620
9. Nie, X., & Wang, L. (2019). Simulation process design for scheduling mode of railway container terminals based on Flexsim. *Journal of Physics: Conference Series*, 1176, Article 052012. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1176/5/052012
10. Marinov, M., & Viegas, J. (2009). A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17 (7), 1106–1129. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.04.001
11. Dzemydienė, D., Burinskienė, A., & Miliauskas, A. (2021). Integration of multi-criteria decision support with infrastructure of smart services for sustainable multi-modal transportation of freights. *Sustainability,* 13 (9), Article 4675. https://doi.org/10.3390/su13094675
12. Liu, R. R., & Golovitcher, I. (2003). Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37 (10), 917–932. https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.07.001
13. Ковальов, А. О., & Волик, О. І. (2013). Визначення раціонального технічного оснащення під'їзної колії підприємства. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 135, 50–53.

14. Про затвердження Правил обслуговування залізничних під'їзних колій (2000): Наказ Міністерства транспорту України № 644 від 21.11.2000 р.). *Офіційний вісник України*, 50, ст. 2192. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0875-00

15. ДСТУ EN 50126-1:2019 (EN 50126-1:2017, IDT). Залізничні застосування. Специфікація та демонстрація надійності, готовності, ремонтопридатності та безпеки (RAMS). Частина 1. Загальний процес та загальні положення. (2019). Київ: ДП «УкрНДНЦ».

16. Garmabaki, A. H. S., Ahmadi, A., Mahmood, Y. A., & Barabadi, A. (2020). Maintenance optimisation under uncertain and dynamic conditions. *Quality and Reliability Engineering International*, 36 (4), 1422–1437. https://doi.org/10.1002/qre.2633

17. Peng, F., Kang, S., Li, X., Ouyang, Y., Somani, K., & Acharya, D. (2011). A heuristic approach to the railroad track maintenance scheduling problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,* 26 (2), 129–145. https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00670.x

18. Charnes, A., & Cooper, W. W. (1959). Chance-constrained programming. *Management Science*, 6 (1), 73–79. https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.73

19. Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2013). Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications (2nd ed.). CRC Press.

References

1. Lomotko, D. V. (2008). Formuvannia transportnoho protsesu zaliznyts Ukrainy na bazi lohistychnykh pryntsypiv [Formation of the transport process of Ukrainian railways based on logistic principles] [Avtoreferat dysertatsii doktora tekhnichnykh nauk, Ukrainska derzhavna akademiia zaliznychnoho transportu]. Kharkiv. [in Ukrainian]

2. Lomotko, D. V., Ilchyshyn, V. M., Lomotko, M. D., & Kudriashov, D. V. (2024). Formuvannia terminalnoi systemy rozpodilu tovariv pry yikh perevezenni zaliznytseiu [Formation of a terminal system for distribution of goods during their transportation by rail]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 210, 217–226. https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320854 [in Ukrainian]

3. Lomotko, D., Ogar, O., Lomotko, M., & Afanasova, O. (2023). Modeling the railway and automobile supply chain on the basis of «green» logistic. *Collection of Scientific Papers of USURT*, 205, 98–110. https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288832 [in English]

4. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. (n.d.). Statystychna informatsiia «Transport» [Statistical information «Transport»]. Retrieved January 15, 2026. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/ [in Ukrainian]

5. Butko, T. V., & Liashko, O. V. (2012). Formalizatsiia tekhnolohii roboty zaliznychnoi stantsii z pid'iznoiu koleiu na osnovi metodiv lohistyky [Formalization of the operating technology of a railway station with an access track based on logistics methods]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, 133, 63–69. [in Ukrainian]

6. Lomotko, D. V. (2026). Matematychna model optymizatsii roboty vantazhnykh frontiv zaliznychnykh pid'iznykh kolii [Mathematical model for optimizing the operation of loading fronts of railway access tracks]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, 1, 4–18. https://doi.org/10.34029/2311-4061-2026-158-1-04-18 [in Ukrainian]

7. Schwarz, M., Sauer, C., Daduna, H., & Szekli, R. (2006). M/M/1 queueing systems with inventory. Queueing Systems, 54 (1), 55–78. https://doi.org/10.1007/s11134-006-8710-5 [in English]

8. Pollaczek, F. (1930). Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie. I. Mathematische Zeitschrift, 32, 64–100. https://doi.org/10.1007/BF01194620 [in German]

9. Nie, X., & Wang, L. (2019). Simulation process design for scheduling mode of railway container terminals based on Flexsim. *Journal of Physics: Conference Series*, 1176, Article 052012. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1176/5/052012 [in English]

10. Marinov, M., & Viegas, J. (2009). A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17 (7), 1106–1129. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.04.001 [in English]

11. Dzemydienė, D., Burinskienė, A., & Miliauskas, A. (2021). Integration of multi-criteria decision support with infrastructure of smart services for sustainable multi-modal transportation of freights. *Sustainability*, 13 (9), Article 4675. https://doi.org/10.3390/su13094675 [in English]

12. Liu, R. R., & Golovitcher, I. (2003). Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37 (10), 917–932. https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.07.001 [in English]

13. Kovalov, A. O., & Volyk, O. I. (2013). Vyznachennia ratsionalnoho tekhnichnoho osnashchennia pid'iznoi kolii pidpryiemstva [Determination of the rational technical equipment of an enterprise's access track]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, 135, 50–53. [in Ukrainian]

14. Ministerstvo transportu Ukrainy [Ministry of Transport of Ukraine]. (2000). Pro zatverdzhennia Pravyl obsluhovuvannia zaliznychnykh pid'iznykh kolii (Nakaz № 644 vid 21.11.2000) [On approval of the Rules for servicing railway access tracks (Order No. 644 dated 21.11.2000)]. Ofitsiinyi visnyk Ukrainy, (50), st. 2192. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0875-00 [in Ukrainian]

15. DP «UkrNDNTs» [State Enterprise «UkrNDNTs»]. (2019). DSTU EN 50126-1:2019 (EN 50126-1:2017, IDT). Zaliznychni zastosuvannia. Spetsyfikatsiia ta demonstratsiia nadiinosti, hotovnosti, remontoprydatnosti ta bezpeky (RAMS). Chastyna 1. Zahalnyi protses ta zahalni polozhennia [Railway applications. Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). Part 1. Generic process and general requirements]. Kyiv: DP «UkrNDNTs». [in Ukrainian]

16. Garmabaki, A. H. S., Ahmadi, A., Mahmood, Y. A., & Barabadi, A. (2020). Maintenance optimisation under uncertain and dynamic conditions. *Quality and Reliability Engineering International*, 36 (4), 1422–1437. https://doi.org/10.1002/qre.2633 [in English]

17. Peng, F., Kang, S., Li, X., Ouyang, Y., Somani, K., & Acharya, D. (2011). A heuristic approach to the railroad track maintenance scheduling problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26 (2), 129–145. https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00670.x [in English]

18. Charnes, A., & Cooper, W. W. (1959). Chance-constrained programming. *Management Science*, 6 (1), 73–79. https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.73 [in English]

19. Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2013). Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications (2nd ed.). CRC Press. [in English]

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-7624-2925.

Лючков Дмитро Степанович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна. E-mail: :L_DS@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0001-7230-1986.

Ломотько Микола Денисович, PhD, асистент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна. E-mail: :kolyanl890@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-0294-2686.

Донець Світлана Михайлівна, кандидат філологічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна.
E-mail: donets.inyazdep@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-7191-0648.

Lomotko Denis Viktorovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Maidan Oboronny Val, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. E-mail: den@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-7624-2925.
Lyuchkov Dmytro Stepanovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Maidan Oboronny Val, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. E-mail: :L_DS@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0001-7230-1986.
Lomotko Mykola Denisovych, PhD, Assistant Professor of the Department of Freight and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Maidan Oboronny Val, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. E-mail: :kolyanl890@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-0294-2686.
Donets Svitlana Mykhailivna, PhD, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport. Maidan Oboronny Val, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. E-mail: donets.inyazdep@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-7191-0648.

Дата надходження статті: 14.07.2026 р. Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 621.313.2+621.3.011.71

РОЗРАХУНОК ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЯКОРЯ КОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА БАЗІ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПОДАННЯ ЙОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

Канд. техн. наук М. Г. Давиденко

CALCULATION OF THE ARMATURE ROTATION SPEED OF A BRUSHED DC MOTOR BASED ON THE PARAMETRICAL REPRESENTATION OF ITS ELECTRICAL CIRCUIT

PhD (Tech.) M. G. Davidenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371326

Анотація. *Для визначення швидкості обертання якоря колекторного двигуна постійного струму з послідовним збудженням в коло якоря вводять невелику тестову синусоїдну напругу з відомими параметрами. Показано, що спектр викликаного дією цієї напруги струму якоря складається з трьох компонент, при цьому частоти двох із них певним чином пов'язані зі швидкістю обертання якоря і частотою тестової напруги. Розглянуто шляхи технічної реалізації можливостей розрахунку вказаної швидкості, які випливають із цієї залежності.*

Ключові слова*: швидкість обертання якоря, двигун постійного струму, інжекція напруги, спектр струму.*

Abstract*. The armature rotation speed of a brushed DC motor is a defining characteristic for controlling the train movement layout or the operating mode of any electric drive. In practice, direct and indirect methods are used to measure this speed. The application of the direct method requires installing special sensors on the motor shaft. Such sensors are negatively affected by contamination and*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Давиденко М. Г., 2026.

ambient temperature. The indirect method is based on monitoring either the armature current and voltage, or only its current. The equipment required for the indirect method is located in more favorable operating conditions. Its algorithmic flexibility and adaptability are prerequisites for creating an optimal motor control system. The objectivity of the speed measurement result increases if it is based on the use of informational signals whose intensity does not depend on the effects caused by the continuous DC supply voltage of the motor. This paper considers a series-wound brushed DC motor. The informational signal is an incremental armature current generated by injecting a small sinusoidal voltage in series into the armature circuit. To determine the time variation law of this current, a mathematical model of the armature electrical circuit of the aforementioned motor is formulated. A formal description of the time dependence of the mutual inductance between the armature winding and the field winding during constant speed armature rotation is provided. This inductance is a positive quantity that periodically varies in time at twice the armature rotation speed. As a result, the total inductance of the armature circuit is time-varying, meaning the specified circuit is a parametric electrical circuit. The intensity of such a parametric effect does not depend on the motor operating mode. The resulting description is integrated into the aforementioned mathematical model. It is shown that the time variation law of the incremental current is determined by a first-order linear non-homogeneous differential equation with variable coefficients. An analytical solution to this equation is obtained. According to this solution, the incremental current consists of three sinusoidal components, the frequencies of which simply depend on the known frequency of the injected voltage and the unknown armature rotation speed. By obtaining estimates of the frequencies of these components, the armature rotation speed can be calculated.

***Keywords**: armature rotation speed, brushed DC motor, electric rolling stock, current spectrum.*

Вступ. Колекторні двигуни постійного струму (КДПС, brushed DC motors) широко використовують на залізниці як тягові, а також у допоміжних системах локомотивів. Поточна швидкість обертання якоря такого двигуна є визначальною характеристикою для керування режимом руху поїзда, синхронізації роботи двигунів, захисту від юзу та боксування, захисту двигуна від розносу. На практиці використовують прямі та непрямі способи вимірювання цієї швидкості. Для перших використовують фізичні датчики, частина конструкції яких закріплена на валу двигуна (оптичні, індукційні, гальваномагнітні). Другі базовані на математичній моделі двигуна, вхідними даними для якої є поточні напруга і струм, а швидкість обертання ротора є похідною величиною. Можливе також вимірювання швидкості підрахуванням пульсацій струму, викликаних комутацією. Непрямі способи вільні від потреби мати на валу двигуна датчики, на які негативно впливають забруднення та температурні коливання. Відповідне обладнання розташоване в більш сприятливих для роботи умовах. Їхня алгоритмічна гнучкість і можливість адаптації параметрів моделі в реальному масштабі часу є передумовами побудови всеохоплюючої системи оптимального автоматичного керування тяговим рухомим складом. У свою чергу, це забезпечило б мінімізацію технічних, організаційних і фінансових витрат на його експлуатацію. Отже, розроблення нових підходів для непрямого вимірювання швидкості обертання якоря КДПС є в умовах суворого ресурсозбереження дуже актуальною проблемою.

Постановка проблеми та аналіз досліджень і публікацій. Використання стабільних періодичних компонент струму якоря КДПС дає фізичну можливість для визначення величини швидкості обертання його якоря непрямими способами. Джерелом таких компонент є явище комутації. Розрізняють два види: комутаційні пульсації (ripples) і комутаційні

сплески (spikes); у подальшому будемо скорочено називати їх відповідно пульсаціями та сплесками. Пульсації є фундаментальним періодичним перехідним процесом, який викликаний перемиканнями в індуктивно-резистивному колі якоря як наслідком почергового проходження пластин колектора під щітками. Сплески виникають під час комутації внаслідок розриву кола кожної секції якоря з переходом краю щітки з однієї пластини колектора на сусідню пластину та дуже короткочасного електричного пробою проміжку між щіткою та попередньою пластиною. Загалом як пульсації, так і сплески є носіями інформації про швидкість обертання якоря. Однак, оскільки сплески є потужним джерелом електромагнітних завад, їх приглушують різними засобами. Тому визначення швидкості обертання на базі спостереження послідовності сплесків не набуло суттєвого поширення та висвітлене лише в невеликій кількості робіт [1, 2]. Підхід, який опосередковано використовує й інформацію, що міститься в сплесках, розглянуто в роботі [3]. Запропоновано обчислити амплітудний спектр струму якоря та знайти його автокореляційну функцію. Але на застосовність цього методу негативно впливає зменшення корисного сигналу зі зменшенням швидкості обертання.

Переважна кількість публікацій присвячена способам вимірювання швидкості, які базовані на спостереженні пульсацій (ripples) струму якоря. Згідно з роботою [4], метод визначення швидкості обертання по пульсаціях був запропонований В. Чжаном у китайськомовній статті «Метод тестування швидкості обертання мікромотора постійного струму», опублікованій у журналі КНР «Радіо», № 3 за 1978 рік. У роботі [4], як розвиток цього питання, опубліковано співвідношення між швидкістю обертання і частотою пульсацій для всіх можливих схемних конфігурацій обмотки якоря. Зазначимо, що на сьогодні такий безпосередній перерахунок без вторинної обробки часової послідовності пульсацій використовують лише для дослідження суто конструкторських питань [5, 6]. Автори роботи [7] розглянули три способи вторинної обробки: спектральний аналіз із застосуванням швидкого перетворення Фур'є, адаптивну фільтрацію та виявлення комутації з використанням компаратора. Автори дійшли висновку, що для досліджених зразків двигунів найкращу точність показав спектральний аналіз, але обмежилися цим окремим випадком. У роботі [8] описано спосіб оцінювання швидкості обертання, базований на підрахунку пульсацій і вимірюванні інтервалів часу між ними із подальшим розпізнаванням образу кожної пульсації. Але застосування цього способу потребує використання комп'ютера, що не завжди можливе на борту локомотива. Отримання додаткової інформації про часове розташування пульсацій передбачено і в статті [9]: для корегування результату вимірювання за пульсаціями використовують дані від тахометра з відбивачем інфрачервоного випромінювання, закріпленим на валу двигуна. На стабільність показань такого тахометра суттєво впливають забруднення відбивача і відхилення температури. У роботі [10] продемонстровано стабілізацію характеристик пульсацій їх обробкою адаптивним підсилювачем ліній спектра. Спосіб визначення частоти обертання якоря авторами не вказано, однак текст статті дає підстави зрозуміти, що цю частоту зчитували з графіка спектра. Автори роботи [11] запропонували процедуру двоетапної фільтрації пульсацій. Реалізація такого фільтра для серійного виробу може виявитися непростою задачею. Спосіб фільтрації пульсацій за допомогою вейвлетів розглянуто в роботі [12]. Має місце також використання пульсацій лише для калібрування системи керування КДПС перед робочим запуском [13].

Принципово інший підхід для визначення швидкості обертання якоря

базований на ідентифікації коефіцієнтів системи рівнянь, складеної поєднанням другого закону Кірхгофа для кола якоря, виразу для ЕРС реакції якоря («проти-ЕРС») і динамічного рівняння двигуна як механічної системи. Така сукупність рівнянь являє собою математичну модель КДПС і дає змогу виразити швидкість обертання якоря через миттєві значення струму якоря та напруги на ньому. У найбільш загальному вигляді такий зв'язок був описаний для електроприводів у роботі [14]. У пізнішій роботі [15] величина швидкості обертання подана як змінна, оцінку якої формує фільтр Калмана, який, зокрема, містить математичну модель двигуна. Використання такої моделі тільки для розрахунку швидкості потребує надлишкових обчислювальних ресурсів. У роботі [16] модель спрощено, унаслідок чого для отримання швидкості обертання достатньо тільки знання миттєвого значення струму якоря. Однак ця модель не враховує взаємної індуктивності між обмотками якоря та збудження і тому її не можна вважати коректною. Фільтр Калмана застосовано і в способі, описаному в роботі [17]. Його використано для уточнення оцінки величини швидкості обертання, отриманої описаним вище пульсаційним методом. Головним недоліком цього методу є суттєве зменшення амплітуди корисного сигналу зі зменшенням вказаної швидкості.

Щоб позбутися такої закономірності, потрібно визначити швидкість обертання через параметри двигуна, інтенсивність впливу яких на струм якоря не залежить від цієї швидкості, і використати незалежне від двигуна джерело тестового сигналу. Таким параметром є взаємна індуктивність обмоток якоря та збудження [18]. У роботі [19] розроблено математичну модель процесу розповсюдження високочастотного струму, викликаного введенням джерела малої тестової синусоїдної напруги в коло якоря КДПС із послідовним збудженням. Показано, що струм описано лінійним диференціальним рівнянням другого порядку зі змінними коефіцієнтами. Аналітичне розв’язання цього рівняння вкрай ускладнене, а числове розв'язання потребує критично великої кількості кроків інтегрування. Авторам роботи [20] вдалося уникнути цих складнощів. Вони розробили модель аналогічного призначення, оминувши математичний опис роботи колекторно-щіткового вузла. Вони показали, що за дії тестової напруги у вигляді меандру спектральні складові струму якоря розташовані на частотах, які є комбінаційними частотами гармонік тестового сигналу і частоти комутації (вона пропорційна частоті обертання якоря). Усебічне викладення проблем і їх розв’язання в цій роботі дещо перенасичене розглядом деталей, пов’язаних із формою застосованої тестової напруги, унаслідок чого не є прозорим фізичний бік зроблених авторами кроків. Зокрема, поза межами явного висвітлення залишився вплив на досліджені явища змінної в часі взаємної індуктивності обмоток якоря та збудження.

Отже, існує певна кількість теоретичних напрацювань і практичних розробок у сфері бездатчикового визначення величини швидкості обертання якоря КДПС. Але не вдалося виявити публікацій, у яких був би обґрунтовано поданий вплив взаємної індуктивності обмоток на існування та кількісні характеристики вказаних ефектів. Розв’язання задачі такого обґрунтування надало б коректності результатам вимірювання швидкості обертання якоря КДПС останнім способом і об’єктивності – експлуатаційним заходам, що пов’язані з ними.

Мета та задачі дослідження. Мета дослідження – встановлення кількісного зв'язку між швидкістю обертання якоря і параметрами додаткового струму якоря, що викликаний введенням джерела тестової синусоїдної напруги до його кола, з урахуванням взаємної індуктивності обмоток якоря та збудження.

Для досягнення поставленої мети були розв'язані три задачі:

1) формування математичної моделі кола якоря КДПС із послідовним збудженням як параметричного кола;

2) математичний опис часової залежності взаємної індуктивності обмотки якоря та обмотки збудження;

3) визначення виразу для миттєвого значення струму якоря КДПС і встановлення зв'язку параметрів цього струму зі швидкістю обертання якоря.

Основна частина

Формування математичної моделі кола якоря КДПС із послідовним збудженням

Будемо аналізувати електричне коло якоря в рамках його лінійного подання. За дотримання цієї умови принцип накладання дає змогу описувати електричні явища, викликані джерелом синусоїдної тестової напруги, окремо від явищ, викликаних дією постійної напруги живлення. Розглядатимемо КДПС з однією парою полюсів і двома пластинами колектора. Наведемо класичну електричну схему КДПС із послідовним збудженням [21], додавши до неї позначення об'єктивно існуючого індуктивного зв'язку між обмоткою якоря та обмоткою збудження (рисунок). Умовні позначення: ***e(t)*** – електрорушійна сила (ЕРС) джерела тестової напруги; $\boldsymbol{R_f}$ – активний опір обмотки збудження; $\boldsymbol{L_f}$ – власна індуктивність обмотки збудження; $\boldsymbol{R_a}$ – активний опір обмотки якоря; $\boldsymbol{L_a}$ – власна індуктивність обмотки якоря; ***M(t)*** – взаємна індуктивність обмоток; ***i(t)*** – миттєве значення струму якоря; $\boldsymbol{u_a(t)}$ і $\boldsymbol{u_f(t)}$ – миттєві значення напруг відповідно якоря та збудження.

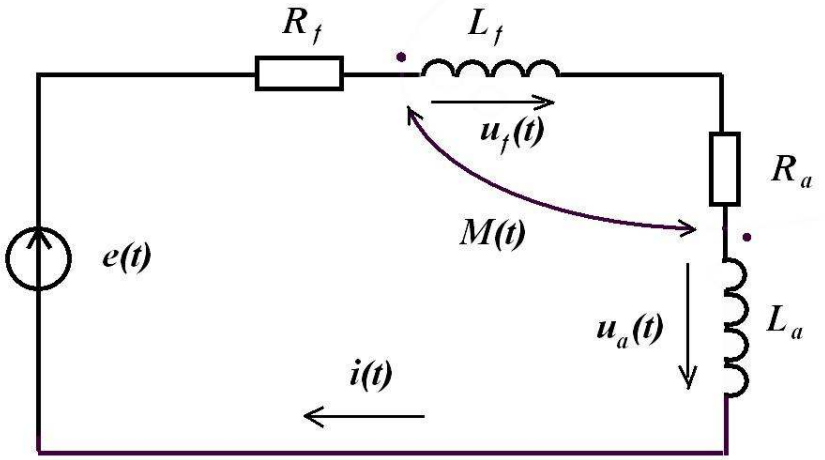


Рис. Електрична схема КДПС із послідовним збудженням

Величина тестової ЕРС є достатньо малою, щоб не впливати на параметри режиму роботи КДПС.

За другим законом Кірхгофа,

$$e(t) = i(t) \cdot \left(R_f + R_a\right) + u_f(t) + u_a(t)\,. \quad (1)$$

Виразимо $u_f(t)$ і $u_a(t)$ через потокозчеплення $\Psi_f(t)$ і $\Psi_a(t)$ відповідних обмоток:

$$u_f(t) = \frac{d\Psi_f(t)}{dt}\ ; \quad (2)$$

$$u_a(t) = \frac{d\Psi_a(t)}{dt}\ . \quad (3)$$

З урахуванням наявності взаємної індукції між обмотками якоря та збудження отримаємо

$$\Psi_f(t) = L_f \cdot i(t) + M(t) \cdot i(t) \ ; \quad (4)$$

$$\Psi_a(t) = L_a \cdot i(t) + M(t) \cdot i(t) \ . \quad (5)$$

Тому

$$u_f(t) = \left[L_f + M(t)\right] \cdot \frac{di(t)}{dt} + i(t) \cdot \frac{dM(t)}{dt} \ , \quad (6)$$

$$u_a(t) = \left[L_a + M(t)\right] \cdot \frac{di(t)}{dt} + i(t) \cdot \frac{dM(t)}{dt} . \quad (7)$$

Підстановка цих формул до виразу (1) призводить до такого диференціального рівняння:

$$e(t) = \left[R_f + R_a + 2 \cdot \frac{dM(t)}{dt}\right] \cdot i(t) + \left[L_f + L_a + 2M(t)\right] \cdot \frac{di(t)}{dt} \ . \quad (8)$$

Це рівняння є математичною моделлю поведінки в часі струму якоря за будь-якої введеної ЕРС. Вираз у перших квадратних дужках має фізичний сенс змінного в часі активного опору кола якоря. Вираз у других квадратних дужках має фізичний сенс змінної в часі індуктивності цього кола. Отже, математична модель (8) описує лінійне параметричне резистивно-індуктивне коло.

Часова залежність взаємної індуктивності обмоток якоря та збудження

Взаємна індуктивність обмоток якоря та збудження без урахування випрямної дії колекторно-щіткового вузла та спеціальної конфігурації полюсів змінюється в часі за законом

$$M(t) = M_0 \cdot \cos(\omega_a \cdot t) \ , \quad (9)$$

де M_0 – максимальна величина взаємної індуктивності;

ω_a – кутова частота обертання якоря.

Згідно з наведеним у роботі [22] аналізом перетворення електромагнітної енергії обертовим перетворювачем, у КДПС залежність (9) за рахунок випрямної дії колекторно-щіткового вузла має такий вигляд:

$$M(t) = M_0 \cdot |\cos(\omega_a \cdot t)| \ . \quad (10)$$

Пульсації взаємної індуктивності фундаментально притаманні КДПС; їхній розмах (інтенсивність) не залежать від швидкості обертання якоря. Нескладно показати, що

$$|\cos x| = \frac{2}{\pi} + \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{4n^2-1} \cdot \cos(2nx) \ .$$

Доданки під знаком суми швидко зменшуються зі зростанням величини n, тож можна вважати, що

$$|\cos x| \approx \frac{2}{\pi} + \frac{4}{3\pi} \cdot \cos(2x) \ . \quad (11)$$

Тому вираз (10) набуває вигляду

$$M(t) \approx \frac{2M_0}{\pi} \cdot \left[1 + \frac{2}{3} \cdot \cos(2\omega_a \cdot t)\right] . \quad (12)$$

Отже, взаємна індуктивність обмоток якоря та збудження є пульсуючою додатною величиною.

Виведення виразу для миттєвого значення струму якоря та його параметрів, які залежать від швидкості обертання

Лінійне неоднорідне диференціальне рівняння (8) можна подати в такому вигляді:

$$\frac{e(t)}{\left(L_f+L_a\right)\cdot\left[1+\frac{2M(t)}{L_f+L_a}\right]} = \frac{R_f+R_a+2\cdot\frac{dM(t)}{dt}}{\left(L_f+L_a\right)\cdot\left[1+\frac{2M(t)}{L_f+L_a}\right]} \cdot i(t) + \frac{di(t)}{dt} . \quad (13)$$

На практиці $L_a \ll L_f$. Оскільки $M_0 = \sqrt{L_f \cdot L_a}$, а середнє геометричне менше за середнє арифметичне або дорівнює йому, то $M_0 \ll (L_f + L_a)$. Із урахуванням цього рівняння (13) набуває вигляду

$$\frac{e(t)}{L_w} \cdot \left[1 - \frac{2M(t)}{L_w}\right] = \frac{R_w + 2\frac{dM(t)}{dt}}{L_w} \cdot \left[1 - \frac{2M(t)}{L_w}\right] \cdot i(t) + \frac{di(t)}{dt}, \quad (14)$$

де

$$L_w = L_f + L_a \,, \quad (15)$$

$$R_w = R_f + R_a \,. \quad (16)$$

Введемо сталу часу кола

$$\tau_w = {L_w}/{R_w} \,. \quad (17)$$

Також застосуємо синусоїдну ЕРС тестового сигналу

$$e(t) = E_{mT} \cdot \sin(\omega_T t + \varphi_T) \,, \quad (18)$$

де E_{mT} – амплітуда цієї ЕРС;
φ_T – її початкова фаза;
ω_T – її кутова частота.

З урахуванням введених позначень вираз (14) має такий вигляд:

$$\frac{E_{mT}}{L_w} \cdot \left[1 - \frac{2M(t)}{L_w}\right] \cdot \sin(\omega_T t + \varphi_T) =$$

$$= \left[\frac{1}{\tau_w} + \frac{2}{L_w} \cdot \frac{dM(t)}{dt}\right] \cdot \left[1 - \frac{2M(t)}{L_w}\right] \cdot i(t) + \frac{di(t)}{dt} \,. \quad (19)$$

Це лінійне неоднорідне диференціальне рівняння із змінними коефіцієнтами вигляду

$$\frac{di(t)}{dt} + P(t) \cdot i(t) = Q(t) \,. \quad (20)$$

Тут

$$P(t) = \left[\frac{1}{\tau_w} + \frac{2}{L_w} \cdot \frac{dM(t)}{dt}\right] \cdot \left[1 - \frac{2M(t)}{L_w}\right] \,, \quad (21)$$

$$Q(t) = \frac{E_{mT}}{L_w} \cdot \left[1 - \frac{2M(t)}{L_w}\right] \cdot \sin(\omega_T t + \varphi_T) \,. \quad (22)$$

Приймемо як початкову умову, що $i(0) = 0$. Розв'язок такого рівняння відомий [23]:

$$i(t) = e^{-\int_0^t P(t)dt} \cdot \left\{\int_0^t \left[Q(t) \cdot e^{\int_0^t P(t)dt}\right] dt\right\} + C \,, \quad (23)$$

де C – стала інтегрування.

Після підстановки до формули (21) виразу (12) для часової залежності взаємної індуктивності, урахування нерівності $M_0 \ll L_w$ і можливості, що випливає звідси, користуватися за потреби рівністю $e^x \approx 1 + x$ отримаємо

$$\int_0^t P(t)dt = e^{\frac{t}{\tau w}} \,, \quad (24)$$

$$\int_0^t \left[Q(t)\cdot e^{\int_0^t P(t)dt}\right]dt = = \frac{E_{mT}}{L_w\cdot\sqrt{\omega_T^2+\frac{1}{\tau_w^2}}}\cdot\left[e^{\frac{t}{\tau_w}}\cdot\sin(\omega_T t+\varphi_T-\alpha)-\sin(\varphi_T-\alpha)\right]-$$

$$-\frac{4E_{mT}M_0}{3\pi L_w^2\cdot\sqrt{(\omega_T+2\omega_a)^2+\frac{1}{\tau_w^2}}}\left[e^{\frac{t}{\tau_w}}\sin[(\omega_T+2\omega_a)t+\varphi_T-\beta]-\sin(\varphi_T-\beta)\right]-$$

$$-\frac{4E_{mT}M_0}{3\pi L_w^2\cdot\sqrt{(\omega_T-2\omega_a)^2+\frac{1}{\tau_w^2}}}\left[e^{\frac{t}{\tau_w}}\sin[(\omega_T-2\omega_a)t+\varphi_T-\gamma]-\sin(\varphi_T-\gamma)\right], \quad (25)$$

де

$$\alpha = arctg(\omega_T\tau_w)\ , \quad (26)$$

$$\beta = arctg[(\omega_T+2\omega_a)\tau_w], \quad (27)$$

$$\gamma = arctg[(\omega_T-2\omega_a)\tau_w]. \quad (28)$$

Підставивши вирази (24) і (25) до формули (23) і врахувавши наведену вище початкову умову, а також рівність (17), отримаємо

$$i(t) = \frac{E_{mT}}{R_w\sqrt{1+(\omega_T\tau_w)^2}}\cdot\sin(\omega_T t+\varphi_T-\alpha)-$$

$$-\frac{0{,}424E_{mT}}{R_w\sqrt{1+[(\omega_T+2\omega_a)\tau_w]^2}}\cdot\frac{M_0}{L_w}\cdot\sin[(\omega_T+2\omega_a)t+\varphi_T-\beta]-$$

$$-\frac{0{,}424E_{mT}}{R_w\sqrt{1+[(\omega_T-2\omega_a)\tau_w]^2}}\cdot\frac{M_0}{L_w}\cdot\sin[(\omega_T-2\omega_a)t+\varphi_T-\gamma]. \quad (29)$$

Отже, струм якоря КДПС із послідовним збудженням є сумою трьох синусоїдних струмів із кутовими частотами ω_T, $(\omega_T+2\omega_a)$ і $(\omega_T-2\omega_a)$. Для визначення величини ω_a і подальшого розрахунку швидкості обертання n_a за відомої частоти ω_T тестового сигналу необхідно визначити величину другої або третьої з вказаних вище частот. Зокрема, для розглянутого в цій роботі КДПС з однією парою полюсів, двома пластинами колектора і двома щітками $n_a = \frac{\omega_a}{120\pi} = f_a/60$ оберт/с, де f_a – частота обертання, Гц. Щоб визначити останню, можна, наприклад, виконати спектральний аналіз струму $i(t)$ із визначенням частот розташування піків спектра [24]. Іншим можливим шляхом є синхронне детектування [25] складової з частотою (f_T-2f_a), де f_T – частота тестового сигналу, Гц. У будь-якому випадку основною задачею для технічної реалізації можливостей розрахунку величини n_a, які випливають із виразу (29), є достатньо точна

локалізація на осі частот другої або третьої компонент струму $i(t)$ з урахуванням кінцевої протяжності в часі інтервалу спостереження цього струму, суттєвої різниці між амплітудами цих компонент і амплітудою першої компоненти, а також впливу електромагнітних завад.

Висновки

Розглянуте питання стосується сукупності методів визначення величини швидкості обертання якоря колекторного двигуна постійного струму. У цій роботі теоретично обґрунтовано можливість розрахунку цієї швидкості введенням тестової синусоїдної напруги до кола якоря та визначенням величин частот спектральних складових додаткового струму, викликаного дією вказаної напруги. При цьому коректно враховано змінний у часі характер величини взаємної індуктивності між обмотками якоря та збудження. Результати роботи дають змогу вимірювати швидкість обертання якоря незалежно від тих електромагнітних процесів у двигуні, які викликані дією його джерела живлення. Це підвищує об'єктивність висновків щодо подальших експлуатаційних заходів. Завданням майбутніх досліджень є кількісне визначення впливу супроводжуючих факторів на результати такого вимірювання.

Список використаних джерел

1. Radcliffe, P., & Kumar, D. (2015). Sensorless speed measurement for brushed DC motors. *IET Power Electronics, 8* (11), 2223–2228. https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0147

2. Precision Microdrives. (2026). *Using DC Motor Commutation Spikes to Measure Motor Speed RPM*. URL: https://www.precisionmicrodrives.com/using-dc-motor-commutation-spikes-measure-motor-speed-rpm

3. Vasquez-Sanchez, E., Sottile, J., & Gomez-Gil, J. (2017). A Novel Method for Sensorless Speed Detection of Brushed DC Motors. *Applied Sciences, 7* (14), 1–15. https://doi.org/10.3390/app7010014

4. Yuan, B., Hu, Z., & Zhou, Z. (2007). Expression of Sensorless Speed Estimation in Direct Current Motor with Simplex Lap Winding. *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2007)*. IEEE. P. 816–821. https://doi.org/10.1109/ ICMA.2007.4303650

5. Doshi, K., & Thompson, J. (2024). *Solving Sensorless Brushed DC Motor Speed and Position Control Using Ripple Counting* (Application Report SLVAFO8A). Texas Instruments. URL: https://www.ti.com/lit/an/slvafo8a/slvafo8a.pdf

6. Björnberg, A., & Vesterlund, J. (2024). *DC Motor Control without Encoder – A Ripple Based Approach* (Master's thesis, Lund University). URL: https://www2.iea.lth.se/ publications/MS-Theses/Full%20document/5513_full_document.pdf

7. Vasquez-Sanchez, E., & Gomez-Gil, J. (2009). Analisis de tres metodos para la deteccion de la velocidad de giro de un motor DC, sin el empleo de sensores externos. *Revista Española de Electrónica (REE)*, 655, 72–79. URL: https://www.redeweb.com/_txt/655/72.pdf

8. Vasquez-Sanchez, E. et al. (2012). A New Method for Sensorless Estimation of the Speed and Position in Brushed DC Motors Using Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *59*(3), 1397–1408. https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161651

9. Chi, C.-T., & Yin, S.-A. (2012). Speed measurement of a general DC brushed motor based on sensorless method. *10th International Conference on Power and Energy (IPEC 2012)*. 332–337. https://doi.org/10.1109/ASSCC.2012.6523288

10. Ramli, R. M., Mikami, N., & Takahashi, H. (2010). Adaptive filters for rotational speed estimation of a sensorless DC motor with brushes. *10th International Conference on Information*

Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA 2010). P. 562–565. https://doi.org/10.1109/ISSPA.2010.5605587

11. Vidlak, M. et al. (2021). Sensorless Speed Control of a Brushed DC Motor Based at New Current Ripple Signal Processing. *Energies*, 14, 5359. https://doi.org/10.3390/en14175359

12. Cheng, S. et al. (2024). Sensorless Design and Analysis of a Brushed Motor Speed Regulation System for Branches Saving. *Agriculture*, 14, 2078. https://doi.org/10.3390/agriculture14112078

13. Ertl, D., & Weber, L. (2020). A Method for Real-Time Sensorless Speed Control of Brushed DC Motors in Cost Constrained Systems. *2020 IEEE 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 152–157. https://doi.org/10.1109/GPECOM49333.2020.9248712

14. Chang, Y.-C., & Lee, C.-H. (1999). Robust tracking control for constrained robots actuated by DC motors without velocity measurements. *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, *146* (2), 147–156. https://doi.org/10.1049/ip-cta:19990517

15. Praesomboon, S. et al. (2009). Sensorless speed control of the DC servo motor using Kalman filter. *7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS 2009)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/ICICS.2009.5397682

16. Tripathi, R. P. et al. (2022). Sensorless speed control of the DC motor using EKF estimator and TSK fuzzy logic controller. *Automatika*, *63* (2), 338–348. https://doi.org/10.1080/00051144.2022.2039990

17. Zhang, Q., Wen, B., & He, Y. (2021). Rotational speed monitoring of brushed DC motor via current signal. *Measurement*, 184, 109890. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109890

18. Дідух Л. Д. (2020). *Електрика та магнетизм*: підручник (Серія «Загальна фізика»). Тернопіль: Підручники і посібники. 464 с.

19. Панченко С. В. та ін. (2023). Математична модель процесу розповсюдження високочастотних сигналів у колах живлення двигунів постійного струму. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, *28*(1), 3–10. https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276286

20. Kim, N.-S., Hwang, J.-S., & Choi, H.-G. (2025). Sensorless Speed Control of Brushed DC Motor Using High-Frequency Signal Injection. *IEEE Access*. Vol. 13, Art. no. 3646019. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3646019

21. Осташевський М. О., & Юр'єва О. Ю. (2018). *Електричні машини та трансформатори*: навч. посіб. Київ: Каравела. 454 с.

22. White, D. C., & Woodson, H. H. (1959). *Electromechanical Energy Conversion*. New York: Wiley. URL: https://archive.org/details/electromechanica000whit

23. Kamke, E. (1948). Differentialgleichungen: Lösungsmethoden und Lösungen. Band 1: Gewöhnliche Differentialgleichungen. Leipzig: Akademische Verlagsanstalt Geest & Portig K.-G.

24. Kay, S. M. (1988). Modern Spectral Estimation: Theory and Application. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. URL: https://course.ece.cmu.edu/~ece792/handouts/LO_Chap_SpectralEstimation.pdf

25. Van Trees, H. L., Bell, K. L., & Tian, Z. (2013). Detection, Estimation and Modulation Theory. New York: John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/0471221082

References

1. Radcliffe, P., & Kumar, D. (2015). Sensorless speed measurement for brushed DC motors. *IET Power Electronics, 8* (11), 2223–2228. https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0147

2. Precision Microdrives. (2026*)*. Using DC motor commutation spikes to measure motor speed RPM. URL: https://www.precisionmicrodrives.com/using-dc-motor-commutation-spikes-measure-motor-speed-rpm.

3. Vasquez-Sanchez, E., Sottile, J., & Gomez-Gil, J. (2017). A novel method for sensorless speed detection of brushed DC motors. *Applied Sciences*, *7*(14), 1–15. https://doi.org/10.3390/app7010014

4. Yuan, B., Hu, Z., & Zhou, Z. (2007). Expression of sensorless speed estimation in direct current motor with simplex lap winding. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 816–821. https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303650

5. Doshi, K., & Thompson, J. (2024). Solving sensorless brushed DC motor speed and position control using ripple counting (Application Report No. SLVAFO8A). Texas Instruments. URL: https://www.ti.com/lit/an/slvafo8a/slvafo8a.pdf

6. Björnberg, A., & Vesterlund, J. (2024). DC motor control without encoder – A ripple based approach [Master's thesis, Lund University]. Lund University Publications. URL: https://www2.iea.lth.se/publications/MS-Theses/Full%20document/5513_full_ document.pdf

7. Vasquez-Sanchez, E., & Gomez-Gil, J. (2009). Analisis de tres metodos para la deteccion de la velocidad de giro de un motor DC, sin el empleo de sensores externos [Analysis of three methods for detecting the rotation speed of a DC motor, without the use of external sensors]. *Revista Española de Electrónica (REE)*, (655), 72–79. URL: https://www.redeweb.com/_txt/655/72.pdf

8. Vasquez-Sanchez, E., et al. (2012). A new method for sensorless estimation of the speed and position in brushed DC motors using support vector machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59* (3), 1397–1408. https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161651

9. Chi, C.-T., & Yin, S.-A. (2012). Speed measurement of a general DC brushed motor based on sensorless method. *Proceedings of the 10th International Conference on Power and Energy (IPEC2012)*, 332–337. https://doi.org/10.1109/ASSCC.2012.6523288

10. Ramli, R. M., Mikami, N., & Takahashi, H. (2010). Adaptive filters for rotational speed estimation of a sensorless DC motor with brushes. *Proceedings of the 10th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA2010)*, 562–565. https://doi.org/10.1109/ISSPA.2010.5605587

11. Vidlak, M., et al. (2021). Sensorless speed control of a brushed DC motor based at new current ripple signal processing. *Energies*, *14* (17), Article 5359. https://doi.org/10.3390/ en14175359

12. Cheng, S., et al. (2024). Sensorless design and analysis of a brushed motor speed regulation system for branches saving. *Agriculture, 14* (11), Article 2078. https://doi.org/10.3390/agriculture14112078

13. Ertl, D., & Weber, L. (2020). A method for real-time sensorless speed control of brushed DC motors in cost constrained systems. *Proceedings of the 2020 IEEE 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 152–157. https://doi.org/10.1109/ GPECOM49333.2020.9248712

14. Chang, Y.-C., & Lee, C.-H. (1999). Robust tracking control for constrained robots actuated by DC motors without velocity measurements. *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, *146* (2), 147–156. https://doi.org/10.1049/ip-cta:19990517

15. Praesomboon, S., et al. (2009). Sensorless speed control of the DC servo motor using Kalman filter. *Proceedings of the 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS2009)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/ICICS.2009.5397682

16. Tripathi, R. P., et al. (2022). Sensorless speed control of the DC motor using EKF estimator and TSK fuzzy logic controller. *Automatika, 63* (2), 338–348. https://doi.org/10.1080/00051144.2022.2039990

17. Zhang, Q., Wen, B., & He, Y. (2021). Rotational speed monitoring of brushed DC motor via current signal. *Measurement*, *184*, Article 109890. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109890

18. Didukh, L. D. (2020). *Elektryka ta mahnetizm* [Electricity and magnetism]: Textbook (Series "General Physics"). Ternopil: Pidruchnyky i Posibnyky, 464. [in Ukrainian].

19. Panchenko, S. V., et al. (2023). Matematychna model protsesu rozpovsiudzhennia vysokochastotnykh syhnaliv u kolakh zhyvlennia dvyhuniv postiinoho strumu [Mathematical model of high-frequency signal propagation in DC motor power circuits]. *Informatsiino-Keruiuchi Systemy na Zaliznychnomu Transporti*, *28* (1), 3–10. https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276286 [in Ukrainian].

20. Kim, N.-S., Hwang, J.-S., & Choi, H.-G. (2025). Sensorless speed control of brushed DC motor using high-frequency signal injection. *IEEE Access*, *13*, Article 3646019. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3646019

21. Ostashevskyi, M. O., & Yurieva, O Yu. (2018). Elektrychni mashyny ta transformatory [Electrical machines and transformers]: Study Guide. Kyiv: Karavela. 454. [in Ukrainian].

22. White, D. C., & Woodson, H. H. (1959). Electromechanical energy conversion. Wiley. URL: https://archive.org/details/electromechanica000whit

23. Kamke, E. (1948). *Differentialgleichungen: Lösungsmethoden und Lösungen. Band 1: Gewöhnliche Differentialgleichungen* [Differential equations: Solution methods and solutions. Volume 1: Ordinary differential equations]. Akademische Verlagsanstalt Geest & Portig K.-G.

24. Kay, S. M. (1988). Modern spectral estimation: Theory and application. Prentice Hall. URL: https://course.ece.cmu.edu/~ece792/handouts/LO_Chap_SpectralEstimation.pdf

25. Van Trees, H. L., Bell, K. L., & Tian, Z. (2013). Detection, estimation and modulation theory. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/0471221082

Давиденко Михайло Георгійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.
E-mail: davdenk@kart.edu.ua. ID ORCID: htts://orcid.org/0000-0001-7255-3059.

Mykhailo Davidenko, PhD, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.
Email: davdenk@kart.edu.ua. ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7255-3059.

Дата надходження статті: 28.07.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 629.463.027.27-048.35

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

**Доктори техн. наук О. М. Сафронов, Ю. Є. Калабухін,
канд. техн. наук А. О. Бабенко**

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF BRAKE SHOES FOR PASSENGER RAILWAY VEHICLES

**Dr. Sc. (Tech.) O. M. Safronov, Dr. Sc. (Tech.) Yu. E. Kalabukhin,
PhD (Tech.) A. O. Babenko**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371396

Анотація. *У статті розглянуто питання підвищення ефективності гальмових систем залізничного рухомого складу на основі аналізу конструктивних, триботехнічних, теплотехнічних і техніко-економічних характеристик сучасних гальмових колодок. Проведено порівняльне оцінювання чавунних, фосфористих, композиційних і металокерамічних колодок, визначено їхні основні переваги, недоліки та сфери доцільного застосування.*

Результати дослідження показали, що використання композиційних гальмових колодок сприяє підвищенню коефіцієнта тертя, зменшенню необхідного натискання на 20–30 %, збільшенню ресурсу роботи у три-п'ять разів і зниженню експлуатаційних витрат порівняно з чавунними. Водночас нижча теплопровідність композиційних матеріалів зумовлює підвищення температури поверхні кочення колеса та збільшує ризик виникнення термомеханічних пошкоджень колісних пар. Показано, що застосування композиційних гальмових колодок є доцільним за умови врахування особливостей їх експлуатації і теплового навантаження на колісні пари.

Ключові слова: *залізничний транспорт, рухомий склад, пасажирські вагони, гальмова система, гальмові колодки, автоматичні гальма, безпека руху, транспортна механіка, система контролю, пневматичний циліндр, важільна передача, техніко-економічний аналіз.*

Abstract. *The paper addresses the problem of improving the efficiency of railway rolling stock braking systems through a comprehensive analysis of the design, tribological, thermal, operational, and economic characteristics of modern brake blocks. The performance of the braking system is largely determined by the frictional properties of brake blocks, which directly affect braking efficiency, braking distance, wheel wear, maintenance costs, and the overall operational safety of railway vehicles. The increasing axle loads, higher train speeds, and more demanding operating conditions require the development and application of friction materials capable of maintaining stable braking performance under a wide range of service conditions.*

A comparative analysis of cast iron, high-phosphorus cast iron, composite, and sintered metal brake blocks was carried out. Their structural features, frictional properties, thermal behavior, durability, advantages, disadvantages, and fields of practical application were evaluated. Particular attention was paid to the comparison of traditional cast iron brake blocks with modern composite

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Сафронов О. М., Калабухін Ю. Є., Бабенко А. О., 2026.

brake blocks, which have become widely used in freight and passenger rolling stock due to their improved wear resistance, lower weight, and higher friction coefficient.

A comprehensive approach for evaluating the operational efficiency of railway brake blocks is proposed. Unlike conventional methods, which mainly focus on separate tribological characteristics, the proposed approach simultaneously considers the coefficient of friction, wear resistance, thermal conductivity, required application force, brake cylinder pressure, loading of brake rigging components, compressed air consumption, service life, purchase cost, maintenance costs, and overall economic efficiency. Such an integrated assessment makes it possible to determine the rational application area of each brake block type depending on operating conditions and technical requirements.

The study has shown that composite brake blocks provide a friction coefficient approximately 20-40 % higher than that of conventional cast iron brake blocks, allowing the required braking force to be achieved with a 20-30 % lower application force. As a result, the load acting on the brake rigging, brake cylinder, and pneumatic braking equipment is reduced, while compressed air consumption and maintenance costs decrease. Furthermore, the service life of composite brake blocks exceeds that of cast iron blocks by approximately three to five times, leading to lower life-cycle operating costs despite their higher initial purchase price.

At the same time, the lower thermal conductivity of composite friction materials results in increased temperatures at the wheel-brake block contact interface. This phenomenon raises the probability of thermal defects, wheel tread damage, and thermomechanical deterioration of wheelsets during intensive braking. Therefore, when selecting brake block materials, both braking efficiency and thermal loading of wheelsets should be considered. The obtained results can serve as a scientific basis for selecting brake block materials during the design, modernization, and operation of railway braking systems and may contribute to improving operational reliability, reducing maintenance costs, and increasing traffic safety.

Keywords: *railway transport, rolling stock, passenger railway vehicles, braking system, brake shoes, automatic brakes, traffic safety, transport mechanics, control system, pneumatic cylinder, brake rigging, techno-economic analysis.*

Вступ. Ефективність функціонування гальмової системи є одним із визначальних чинників гарантування безпеки руху, надійності та економічності експлуатації залізничного рухомого складу [1-5]. Зростання швидкостей руху поїздів, збільшення осьових навантажень і підвищення інтенсивності перевезень зумовлюють необхідність постійного вдосконалення елементів гальмових систем, серед яких особливе місце займають гальмові колодки. Саме від їхньої конструкції, матеріалу виготовлення і триботехнічних властивостей залежать ефективність реалізації гальмового зусилля, довговічність колісних пар, надійність роботи гальмового обладнання та рівень експлуатаційних витрат [6-10].

Традиційно на залізничному транспорті застосовували чавунні гальмові колодки, для яких характерні висока теплопровідність, стабільна робота в різних кліматичних умовах і відносна простота виготовлення. Проте їхніми суттєвими недоліками є підвищене зношування, значна маса та зниження коефіцієнта тертя зі збільшенням швидкості руху. Для підвищення ефективності гальмування останнім часом широкого застосування набули композиційні гальмові колодки, що забезпечують вищий коефіцієнт тертя, більший ресурс роботи, меншу масу та зниження експлуатаційних витрат [7, 9, 11].

Разом із тим їх використання супроводжено підвищеним тепловим навантаженням на поверхню кочення коліс, що може призводити до утворення

термомеханічних дефектів і впливати на довговічність колісних пар.

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що більшість робіт присвячена вивченню триботехнічних властивостей фрикційних матеріалів, процесів тепловиділення, інтенсивності зношування гальмових колодок і коліс, а також удосконаленню конструкції фрикційних елементів. Водночас недостатньо дослідженим залишається комплексне оцінювання впливу типу гальмової колодки на параметри роботи гальмової системи, зокрема на величину необхідного натискання, тиск у гальмовому циліндрі, навантаження на елементи гальмової важільної передачі, витрати стисненого повітря і техніко-економічні показники експлуатації рухомого складу.

Через це актуальним є проведення комплексного порівняльного аналізу конструктивних, триботехнічних, теплотехнічних та економічних характеристик різних типів гальмових колодок, спрямованого на обґрунтування їх раціонального вибору з урахуванням вимог щодо ефективності гальмування, надійності та експлуатаційної ефективності залізничного рухомого складу [1, 3, 4, 9]. Результати такого аналізу можуть бути використані як науково обґрунтована основа для вибору раціонального типу гальмових колодок залежно від умов експлуатації, що сприятиме підвищенню безпеки руху, зменшенню експлуатаційних витрат і збільшенню ресурсу елементів гальмового обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі залізничного транспорту свідчать, що підвищення ефективності гальмових систем нерозривно пов’язане з удосконаленням фрикційних матеріалів гальмових колодок. У наукових працях розглянуто питання формування стабільного коефіцієнта тертя, підвищення ресурсу роботи колодок, зменшення інтенсивності зношування колісних пар, забезпечення теплової стійкості та зниження експлуатаційних витрат. Водночас результати окремих досліджень свідчать про необхідність комплексного оцінювання не лише триботехнічних характеристик колодок, а і їхнього впливу на роботу гальмової системи в цілому.

Експлуатаційні складові економіко-технологічних станів життєвого циклу пасажирських вагонів і їхній вплив на ефективність експлуатації і технічного обслуговування рухомого складу досліджено в роботі [12]. Автори дослідили закономірності формування експлуатаційних витрат, показників надійності та технічного стану рухомого складу на різних етапах життєвого циклу. Надано підхід для оцінювання економічної ефективності експлуатації вагонів із урахуванням витрат на технічне обслуговування, ремонт і модернізацію.

Результати роботи свідчать, що оптимізація технічного стану окремих вузлів і систем рухомого складу є одним із основних чинників зменшення експлуатаційних витрат і підвищення ефективності використання вагонного парку. Разом із тим дослідження має загальний характер і не містить аналізу впливу різних типів гальмових колодок на технічні та економічні показники роботи гальмової системи.

Особливості розподілу сили натискання між гальмовими колодками вантажних вагонів залежно від конструкції гальмової важільної передачі досліджено у праці [13]. Автори виконали математичне моделювання процесу передавання гальмового зусилля та визначили оптимальні параметри розподілу навантаження між окремими колодками з метою забезпечення рівномірного зношування і підвищення ефективності гальмування.

Результати дослідження свідчать, що раціональний розподіл сили натискання дає змогу підвищити рівномірність роботи гальмової системи, зменшити локальні перевантаження елементів важільної передачі та збільшити ресурс гальмових

колодок. Разом із тим у роботі не розглянуто вплив матеріалу гальмової колодки на величину необхідного натискання і техніко-економічні показники експлуатації, що обумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

У роботі [14] досліджено триботехнічні характеристики чавунних, композиційних і металокерамічних гальмових колодок під час експлуатації за різних температур навколишнього середовища. Автори виконали експериментальні випробування коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування і температурного режиму роботи колодок.

Встановлено, що композиційні матеріали мають більш стабільні фрикційні властивості порівняно з чавунними, однак їхня ефективність знижується за від'ємних температур через зміну властивостей поверхневого шару матеріалу. Робота присвячена дослідженню триботехнічних процесів і не розглядає вплив типу колодок на роботу пневматичної гальмової системи.

У роботі [15] досліджено експлуатаційні, триботехнічні і теплотехнічні характеристики чавунних і композиційних гальмових колодок із чавунними вставками, призначених для залізничного рухомого складу. Автори порівняли і проаналізували фізико-механічні властивості фрикційних матеріалів, особливості їхньої взаємодії з поверхнею кочення колеса, а також оцінили вплив матеріалу колодки на інтенсивність тепловиділення, зношування та довговічність елементів гальмової системи.

У результаті дослідження встановлено, що композиційні колодки забезпечують вищий коефіцієнт тертя, менший рівень шуму та значно більший ресурс роботи порівняно з чавунними. Водночас через нижчу теплопровідність композиційних матеріалів у зоні контакту «колодка–колесо» формується більш висока температура, що може спричиняти термічні пошкодження поверхні кочення коліс. Автори також зазначили, що застосування чавунних вставок покращує відведення теплоти, однак повністю не усуває зазначених недоліків композиційних матеріалів.

Разом із тим дослідження зосереджене переважно на матеріалознавчих і триботехнічних аспектах роботи гальмових колодок і не містить комплексного техніко-економічного оцінювання їх застосування з урахуванням вартості, ресурсу, необхідного натискання і впливу на експлуатаційні витрати рухомого складу. Саме ці питання розглянуто в цій статті.

У роботі [16] досліджено закономірності зношування гальмових колодок модернізованої гальмової системи вантажних вагонів. Для прогнозування інтенсивності зношування автори застосували моделі часових рядів ARIMA, що дало змогу визначити зміну технічного стану колодок залежно від умов експлуатації.

Отримані результати свідчать, що використання статистичних моделей забезпечує достатню точність прогнозування ресурсу гальмових колодок і допомагає своєчасно планувати їх заміну. Разом із тим у дослідженні основну увагу приділено прогнозуванню процесу зношування без комплексного врахування триботехнічних, теплотехнічних та економічних характеристик різних типів гальмових колодок, що і стало предметом дослідження в цій статті.

У роботі [17] комплексно проаналізовано сучасні конструкції колодкових гальм залізничного транспорту і досліджено вплив матеріалу колодок на рівень шуму, тепловий стан коліс і зношування поверхні кочення.

Автори показали, що використання композиційних колодок дає змогу суттєво зменшити шум під час гальмування, однак спостерігають підвищення температури колеса через низьку теплопровідність матеріалу. Дослідження має оглядовий характер і не містить математичного моделювання роботи гальмової системи.

У роботі [18] досліджено вплив нерівномірного навантаження гальмових колодок на напружено-деформований стан елементів візка вантажного вагона. Автори побудували математичну модель взаємодії гальмової колодки з колесом і визначили характер зміни напружень для різних схем прикладання гальмового зусилля.

Результати дослідження показали, що нерівномірне натискання колодок призводить до підвищення локальних напружень, нерівномірного зношування фрикційних елементів і погіршення ефективності роботи гальмової системи. Водночас дослідження зосереджене переважно на міцності конструкції візка і не містить порівняльної оцінки експлуатаційних властивостей різних матеріалів гальмових колодок.

У роботі [19] досліджено вплив обмерзання композиційних гальмових колодок на ефективність гальмування вантажних поїздів.

Автори встановили, що утворення льоду на поверхні композиційних колодок призводить до зменшення коефіцієнта тертя і збільшення гальмового шляху. Запропоновано рекомендації з періодичного службового пригальмовування для видалення льоду.

У роботі [20] проаналізовано експлуатаційні проблеми використання композиційних гальмових колодок на вантажних вагонах європейських залізниць.

Автори відзначають високу довговічність композиційних матеріалів, зниження шуму та експлуатаційних витрат, але звертають увагу на проблему перегрівання коліс і збільшення гальмового шляху за несприятливих погодних умов. Питання впливу матеріалу колодок на параметри роботи пневматичної гальмової системи залишилися поза межами дослідження.

Мета дослідження. Метою роботи є проведення комплексного аналізу конструкцій та експлуатаційних характеристик сучасних гальмових колодок залізничного рухомого складу, оцінювання їхніх триботехнічних, теплотехнічних і техніко-економічних показників, а також визначення впливу матеріалу гальмової колодки на ефективність реалізації гальмового зусилля, навантаження на елементи гальмової системи та експлуатаційні витрати рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– виконати порівняльний аналіз триботехнічних характеристик різних типів гальмових колодок, зокрема коефіцієнта тертя, зносостійкості, теплостійкості та впливу температурних режимів на ефективність процесу гальмування;

– оцінити вплив матеріалу гальмових колодок на величину необхідного натискання, тиск у гальмовому циліндрі, навантаження на елементи гальмової важільної передачі та витрати стисненого повітря під час гальмування;

– провести техніко-економічне порівняння чавунних і композиційних гальмових колодок з урахуванням їхньої вартості, ресурсу роботи, періодичності заміни та впливу на експлуатаційні витрати рухомого складу.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні методичного підходу щодо комплексного оцінювання ефективності застосування гальмових колодок залізничного рухомого складу, який, на відміну від існуючих, передбачає одночасне врахування триботехнічних, теплотехнічних, експлуатаційних і техніко-економічних показників, а також впливу матеріалу гальмової колодки на величину необхідного натискання, тиск у гальмовому циліндрі, навантаження на елементи гальмової важільної передачі та витрати стисненого повітря, щоб більш обґрунтовано вибирати тип гальмових колодок залежно від умов експлуатації рухомого складу.

Основна частина дослідження. Гальмові колодки є одним з основних елементів фрикційного вузла гальмової

системи рухомого складу. Вони забезпечують перетворення кінетичної енергії поїзда в теплову енергію через виникнення сил тертя між поверхнею колеса (або гальмового диска) і робочою поверхнею колодки. Від конструкції, матеріалу виготовлення та триботехнічних характеристик гальмових колодок значною мірою залежать ефективність реалізації гальмового зусилля, величина гальмового шляху, інтенсивність зношування елементів гальмової системи, експлуатаційна надійність залізничного рухомого складу та безпека руху поїздів.

Сучасні тенденції розвитку залізничного транспорту, пов'язані зі збільшенням швидкостей руху, осьових навантажень і маси поїздів, зумовлюють необхідність підвищення ефективності та надійності роботи гальмових систем, насамперед через удосконалення фрикційних матеріалів гальмових колодок. У процесі гальмування поверхня контакту між колодкою та колесом зазнає значних механічних і теплових навантажень, тому матеріал колодки має забезпечувати стабільні триботехнічні характеристики незалежно від режиму роботи та зовнішніх умов експлуатації [21].

До основних експлуатаційних вимог, які висувають щодо гальмових колодок, належать забезпечення стабільного коефіцієнта тертя в широкому діапазоні швидкостей руху та сил натискання, висока зносостійкість, здатність працювати за тривалих і повторних гальмувань без істотного погіршення фрикційних властивостей, ефективне відведення теплоти із зони контакту і мінімальний негативний вплив на поверхню кочення коліс або гальмових дисків. Водночас матеріал колодки має бути стійким до дії атмосферних чинників, зокрема вологи, снігу та низьких температур, не утворювати продуктів зношування, що погіршують умови контакту колеса з рейкою, не містити токсичних компонентів і забезпечувати простоту монтажу та заміни під час технічного обслуговування.

Вибір матеріалу гальмових колодок є результатом компромісу між високими фрикційними властивостями, теплостійкістю, довговічністю, технологічністю виготовлення та економічною доцільністю застосування. Підвищення коефіцієнта тертя зазвичай супроводжено збільшенням теплового навантаження на поверхню колеса, тоді як покращення теплопровідності матеріалу може призводити до погіршення інших експлуатаційних характеристик. Отже, удосконалення конструкції та експлуатаційних властивостей гальмових колодок є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасних гальмових систем залізничного рухомого складу [22].

Гальмові колодки, що використовують на залізничному транспорті, класифікують за матеріалом виготовлення на чавунні, чавунні з підвищеним вмістом фосфору, композиційні та металокерамічні. Крім того, залежно від конструктивного виконання використовують безгребеневі, гребеневі, секційні та комбіновані конструкції, а для дискових гальм застосовують спеціальні гальмові накладки. На пасажирських вагонах застосовують чавунні та композиційні колодки (рис. 1).

а б



Рис. 1. Чавунна (а) і композиційна (б) гальмова колодка

Кожен із зазначених типів має власні конструктивні особливості, переваги, недоліки та раціональну сферу використання, що визначено умовами експлуатації рухомого складу.

Чавунні гальмові колодки

Чавунні гальмові колодки є традиційним типом фрикційних елементів, які протягом тривалого часу застосовують на локомотивах і пасажирських вагонах із конструкційною швидкістю до 120 км/год [23]. Їх широке використання зумовлене відносною простотою виготовлення, високою теплопровідністю, ефективним відведенням теплоти із зони тертя і задовільною роботою за несприятливих погодних умов. На відміну від більшості композиційних матеріалів, коефіцієнт тертя чавуну не зазнає різких змін із дією вологи, що позитивно впливає на стабільність гальмування під час експлуатації в дощову або снігову погоду [24].

Разом із тим експлуатація чавунних колодок виявила низку суттєвих недоліків. Найбільш істотним із них є виражена залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання, унаслідок чого зі збільшенням швидкості руху ефективність реалізації гальмового зусилля поступово зменшується. Для компенсації цього явища на високошвидкісному рухомому складі виникає необхідність застосування автоматичних регуляторів сили натискання колодок, які забезпечують підтримання необхідної гальмової ефективності в широкому діапазоні швидкостей. Також на пасажирських вагонах 03-ВМ RIC встановлюють протиюзові пристрої, що запобігають заклиненню колісних пар, але ускладнюють гальмове обладнання пасажирського вагона та підвищують витрати стисненого повітря [25-27].

Ще одним недоліком чавунних колодок є відносно висока інтенсивність їх зношування. Це призводить до збільшення обсягів технічного обслуговування, частішої заміни колодок, необхідності регулювання важільної передачі та зростання експлуатаційних витрат. Крім економічних аспектів, інтенсивне зношування негативно впливає на стабільність гальмових характеристик протягом міжремонтного періоду.

Отже, незважаючи на високу надійність, добру теплопровідність і простоту конструкції, застосування чавунних гальмових колодок найбільш доцільне на рухомому складі із середніми швидкостями експлуатації. Для сучасних високошвидкісних поїздів їх використання є обмеженим через недостатню стабільність фрикційних характеристик, що обумовлює необхідність пошуку та впровадження більш ефективних фрикційних матеріалів.

Композиційні гальмові колодки

Перехід від традиційних чавунних до композиційних гальмових колодок став одним із найважливіших напрямів розвитку гальмових систем залізничного рухомого складу. Основною передумовою їх широкого впровадження стало зростання швидкостей руху поїздів, збільшення осьових навантажень і необхідність підвищення ефективності гальмування з одночасним зменшенням експлуатаційних витрат. На відміну від чавунних аналогів, композиційні матеріали мають більш стабільні триботехнічні властивості, підвищену зносостійкість і меншу масу, що забезпечує покращення техніко-економічних показників гальмових систем.

У сучасному вагонному господарстві композиційні колодки застосовують практично на всіх вантажних вагонах, а також на більшості пасажирських вагонів, конструкційна швидкість яких перевищує 120 км/год. Їх використання дало змогу значно підвищити стабільність реалізації гальмового зусилля в широкому діапазоні швидкостей руху та зменшити залежність коефіцієнта тертя від зміни експлуатаційних умов [23].

Основу композиційних колодок становить багатокомпонентний фрикційний матеріал, до складу якого входять каучукові або полімерні зв’язувальні компоненти,

мінеральні та органічні наповнювачі, армувальні волокна, графіт, технічний вуглець, баритовий концентрат, металеві порошки, модифікатори тертя, інші функціональні добавки. Поєднання компонентів забезпечує формування необхідного комплексу механічних, теплових і триботехнічних властивостей матеріалу залежно від умов експлуатації конкретного виду рухомого складу [24].

Технологічно композиційні колодки виготовляють методом гарячого пресування або вулканізації фрикційної суміші з її подальшим закріпленням на металевому чи сітчасто-дротяному каркасі. Така конструкція забезпечує необхідну механічну міцність, рівномірний розподіл контактних напружень і надійне з'єднання фрикційного матеріалу з несучим елементом.

Однією з основних переваг композиційних колодок є їхня висока зносостійкість. Порівняно з традиційними чавунними колодками строк експлуатації композиційних виробів залежно від умов роботи збільшується у три-п'ять разів. Це дає змогу істотно скоротити періодичність технічного обслуговування, зменшити кількість замін гальмових колодок і знизити витрати на утримання рухомого складу. Додатковою перевагою є значно менша маса композиційних виробів, що позитивно впливає на навантаження елементів гальмової важільної передачі та спрощує виконання ремонтних операцій.

Важливою особливістю композиційних матеріалів є забезпечення більш високого і стабільного коефіцієнта тертя порівняно з чавуном. Завдяки цьому необхідного гальмового зусилля досягають за менших сил натискання колодок, що допомагає зменшити навантаження на елементи важільної передачі, знизити тиск у гальмових циліндрах і скоротити витрати стисненого повітря під час службових та екстрених гальмувань [21]. Крім підвищення енергоефективності пневматичної гальмової системи, це сприяє покращенню керованості поїзда і підвищенню ефективності роботи автоматичних гальм для багаторазових циклів гальмування.

Суттєвою перевагою композиційних колодок також є нижчий рівень шуму та вібрацій, що виникають у процесі взаємодії колодки з поверхнею кочення колеса [17, 20]. Це покращує акустичний комфорт, зменшує динамічні навантаження на елементи екіпажної частини, сприяє зниженню інтенсивності розвитку втомних пошкоджень окремих деталей гальмової системи.

Під час гальмування кінетична енергія рухомого складу практично повністю перетворюється на теплову енергію, яка виділяється в зоні контакту між гальмовою колодкою та поверхнею кочення колеса. Кількість теплоти, що утворюється в процесі тертя, у першому наближенні може бути визначена за залежністю

$$Q=\mu \cdot N \cdot L, \qquad (1)$$

де Q – кількість теплоти, що виділяється в зоні контакту, Дж;

μ – коефіцієнт тертя між гальмовою колодкою та колесом;

N – сила натискання колодки на колесо, Н;

L – шлях фрикційного контакту колодки з колесом, м.

Із залежності (1) випливає, що кількість теплоти прямо пропорційна коефіцієнту тертя, силі натискання та довжині шляху ковзання. Оскільки композиційні гальмові колодки мають вищий коефіцієнт тертя порівняно з чавунними, то за однакових умов експлуатації в зоні контакту може бути генерована значна кількість теплової енергії. Водночас через нижчу теплопровідність композиційних матеріалів відведення теплоти відбувається менш інтенсивно, що сприяє підвищенню температури поверхні кочення колеса та збільшує ймовірність виникнення термомеханічних дефектів.

Під час вибору матеріалу гальмової колодки необхідно враховувати не лише величину коефіцієнта тертя і ефективність реалізації гальмового зусилля, а і теплові процеси, що виникають у фрикційному контакті, оскільки саме вони значною мірою визначають довговічність колісних пар і надійність роботи гальмової системи.

Крім численних переваг, композиційні колодки мають і певні конструктивні обмеження. Основним недоліком є нижча теплопровідність фрикційного матеріалу порівняно з чавуном. У процесі інтенсивного або тривалого гальмування це призводить до накопичення теплоти в зоні контакту та формування несприятливого температурного режиму на поверхні кочення колеса [22, 24]. Локальний перегрів може спричиняти структурні зміни металу, виникнення термічних напружень і появу характерних експлуатаційних дефектів, серед яких найбільш поширеними є навари металу, пластичні зрушення поверхневого шару, вищербини, термічні тріщини та інші пошкодження (рис. 2). Саме ця обставина обмежує використання композиційних колодок на локомотивах із бандажними колесами, де перегрів може викликати послаблення посадки або навіть сповзання бандажа.

а б



Рис. 2. Навар (а) і вищербина (б) на поверхні кочення колісних пар у разі роботи з композиційними колодками

Іншим недоліком композиційних матеріалів є підвищена чутливість до впливу атмосферної вологи. У зимовий період під час руху в умовах снігопаду або хуртовини на робочій поверхні колодок може утворюватися льодова кірка, яка тимчасово знижує коефіцієнт тертя і ефективність реалізації гальмового зусилля. Для відновлення нормальної роботи гальмової системи необхідне періодичне службове пригальмовування, яке забезпечує нагрівання та висушування поверхні тертя.

Конструктивне виконання композиційних колодок визначено умовами їх експлуатації. Найбільшого поширення набули колодки із сітчасто-дротяним каркасом, призначені переважно для вантажних вагонів, і колодки зі сталевим штампованим каркасом, які застосовують як на вантажному, так і пасажирському рухомому складі. Незважаючи на відмінності конструкції несучого елемента, обидва типи забезпечують роботу в широкому діапазоні температур навколишнього середовища (від –60 до +50 °С), витримують значні контактні навантаження та мають достатню механічну міцність за багаторазових циклів гальмування.

Порівняльний аналіз показує, що саме композиційні гальмові колодки нині забезпечують найбільш збалансоване поєднання експлуатаційних характеристик серед фрикційних матеріалів, які застосовують на колодкових гальмах пасажирських вагонів. Стабільність коефіцієнта тертя, значний ресурс роботи, невелика маса і можливість зниження експлуатаційних витрат зумовили їх домінуюче використання на вантажних вагонах і більшості сучасних пасажирських вагонів. Водночас проблема інтенсивного тепловиділення та пов'язаного з ним утворення термомеханічних пошкоджень колісних пар потребує подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення композиційних фрикційних матеріалів.

Порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик гальмових колодок

Ефективність застосування гальмових колодок визначена сукупністю триботехнічних, конструктивних, експлуатаційних та економічних показників. До основних критеріїв оцінювання належать коефіцієнт тертя, необхідна сила натискання, ресурс роботи, маса виробу, вартість, вплив на технічний стан колісних пар, а також експлуатаційні витрати протягом життєвого циклу рухомого складу. Комплексний аналіз зазначених характеристик дає змогу обґрунтувати доцільність застосування того чи іншого типу гальмових колодок залежно від умов експлуатації [15, 24].

Порівняння показує, що композиційні колодки мають вищий і більш стабільний коефіцієнт тертя порівняно з чавунними. Завдяки цьому необхідний рівень гальмового зусилля забезпечений за менших сил натискання з боку гальмової важільної передачі. Для чавунних колодок нормативне натискання, залежно від типу рухомого складу та режиму гальмування, становить 38–45 кН на одну колодку, тоді як для композиційних аналогічний гальмовий ефект може бути досягнутий за натискання 26–34 кН. Зменшення навантаження на 20–30 % сприяє підвищенню довговічності деталей важільної передачі, зниженню механічних втрат і скороченню витрат стисненого повітря за рахунок меншого тиску в гальмових циліндрах.

Важливою перевагою композиційних колодок є їхній значно більший ресурс експлуатації. Незважаючи на те, що їхня вартість приблизно в півтора-два рази перевищує вартість чавунних колодок, строк служби збільшується у три-п’ять разів (рис. 3). Це дає змогу скоротити кількість замін, зменшити трудомісткість технічного обслуговування, знизити питомі експлуатаційні витрати протягом усього періоду використання рухомого складу. Додатковим чинником є менша маса композиційних колодок, що зменшує інерційні навантаження на елементи гальмової важільної передачі та полегшує виконання ремонтних робіт.

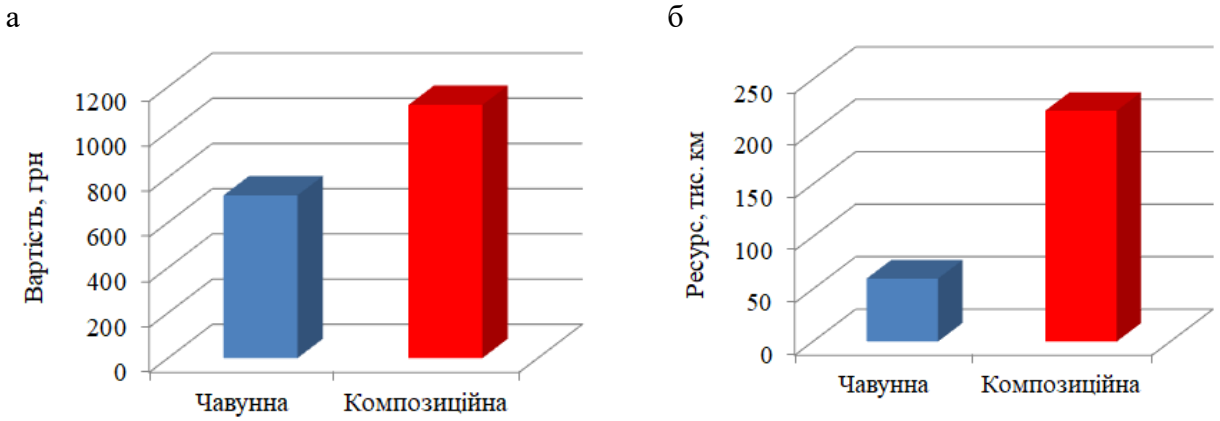


Рис. 3. Порівняльні гістограми вартості (а) і строку служби (б) чавунних і композиційних колодок

Крім наведених переваг, композиційні матеріали мають і певні експлуатаційні обмеження. Їхня нижча теплопровідність призводить до інтенсивнішого накопичення теплоти в зоні фрикційного контакту, унаслідок чого температура поверхні кочення колеса може досягати вищих значень, ніж у разі використання чавунних колодок. За умов тривалого або багаторазового гальмування це підвищує ризик виникнення термомеханічних пошкоджень колісних пар, що необхідно враховувати під час вибору типу фрикційного матеріалу для конкретних умов експлуатації.

Основні результати порівняльного аналізу наведено в таблиці.

Таблиця

Порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик чавунних і композиційних гальмових колодок

Показник	Чавунна колодка	Композиційна колодка	Перевага
Коефіцієнт тертя	0,20–0,28	0,30–0,42	
Необхідне натискання на одну колодку, кН	38–45	26–34	менше на 25–30 %
Тиск у гальмовому циліндрі для забезпечення однакового гальмового ефекту, МПа	0,36–0,40	0,24–0,30	менше на 20–30 %
Зусилля у важільній передачі, кН	75–90	55–70	менше на 20–25 %
Питомий тиск на поверхню тертя, МПа	1,6–2,0	1,2–1,5	менше на 15–25 %
Ресурс роботи	1	3–5	більше у три-п’ять разів
Маса однієї колодки, кг	14–15	8–10	менше на 30–40 %
Орієнтовна ринкова вартість однієї колодки, грн	650–800	1000–1400	більше у два рази
Вартість 1000 км пробігу	Вища	Нижча	
Частота заміни	Висока	Низька	
Витрати стисненого повітря	Більша	Менша	
Придатність до експлуатації на високих швидкостях	Обмежена	Висока	
Температура поверхні колеса	Нижча	Вища	
Імовірність термічних дефектів колеса	Менша	Більша	
Рівень шуму	Вищий	Нижчий	

Аналіз даних таблиці свідчить, що композиційні гальмові колодки переважають чавунні за більшістю експлуатаційних показників. Насамперед це стосується стабільності фрикційних властивостей, ресурсу роботи, маси виробу, необхідного натискання для реалізації заданого гальмового ефекту. Використання композиційних матеріалів дає змогу знизити навантаження на елементи гальмової важільної передачі, зменшити тиск у гальмових циліндрах і скоротити витрати

стисненого повітря, що позитивно впливає на ефективність функціонування пневматичної гальмової системи.

Водночас переваги композиційних колодок супроводжені збільшенням теплового навантаження на поверхню кочення коліс. Саме тому під час оцінювання їхньої ефективності необхідно враховувати не лише триботехнічні показники та ресурс роботи, а і вплив температурних процесів на довговічність колісних пар і витрати, пов'язані з їхнім ремонтом або відновленням. Для локомотивів із бандажними колесами та рухомого складу, що експлуатують в особливо важких режимах гальмування, застосування чавунних колодок залишається технічно обґрунтованим.

Для комплексного оцінювання різних типів гальмових колодок доцільно використовувати інтегральний показник ефективності, який одночасно враховує триботехнічні, експлуатаційні та економічні характеристики фрикційного матеріалу. На відміну від аналізу окремих показників, такий підхід дає змогу виконувати об'єктивно техніко-економічне порівняння різних конструкцій та обґрунтовувати їх раціональний вибір з урахуванням умов експлуатації [28-30].

Інтегральний показник ефективності можна визначити за залежністю

$$K_{еф} = \frac{\mu \cdot R}{C \cdot N}, \qquad (2)$$

де $K_{еф}$ – інтегральний показник ефективності гальмової колодки;

μ – коефіцієнт тертя;

R – ресурс роботи колодки, км;

C – вартість колодки, грн;

N – необхідне натискання для забезпечення заданого гальмового зусилля, Н.

Залежність (2) відображає взаємозв'язок між основними експлуатаційними характеристиками гальмових колодок. Зі збільшенням коефіцієнта тертя і ресурсу роботи значення інтегрального показника ефективності зростає, це вказує на підвищення ефективності використання колодок (рис. 4). Водночас збільшення їхньої вартості або необхідного натискання призводить до зменшення значення показника, оскільки супроводжено підвищенням експлуатаційних витрат і навантаження на елементи гальмової системи.

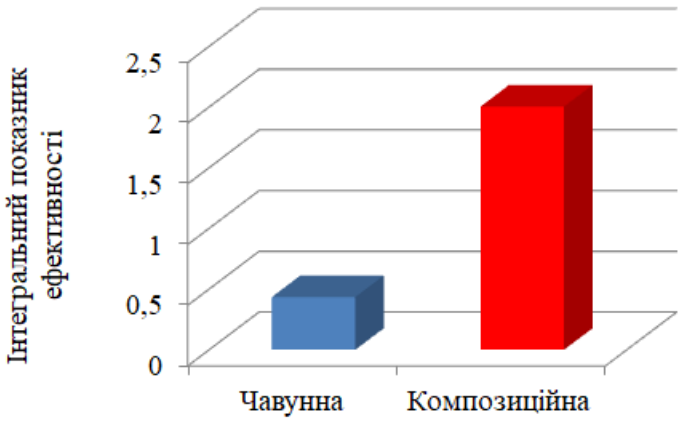


Рис. 4. Порівняння інтегрального показника ефективності чавунних і композиційних колодок

Як видно з рис. 4, інтегральний показник ефективності композиційної гальмової колодки приблизно в 4,6 раза перевищує аналогічний показник чавунної. Це пояснюють поєднанням вищого коефіцієнта тертя, значно більшого ресурсу роботи і меншого необхідного натискання, що компенсує її більшу закупівельну вартість і підтверджує техніко-економічну доцільність застосування композиційних гальмових колодок на сучасному залізничному рухомому складі. Отже, використання інтегрального показника дає змогу виконувати комплексне техніко-економічне порівняння різних типів гальмових колодок та обґрунтовувати їх раціональний вибір залежно від умов експлуатації рухомого складу.

Висновки

У результаті проведеного дослідження виконано порівняльний аналіз сучасних типів гальмових колодок та оцінено їхній вплив на технічні та економічні показники роботи гальмової системи. Отримано такі результати:

1. Виконано порівняльний аналіз триботехнічних характеристик різних типів гальмових колодок. Встановлено, що композиційні матеріали забезпечують коефіцієнт тертя на рівні 0,30–0,42, що перевищує аналогічний показник чавунних колодок (0,20–0,28). Це дає змогу підвищити стабільність реалізації гальмового зусилля та збільшити ресурс колодок у три-п’ять разів. Разом із тим нижча теплопровідність композиційних матеріалів сприяє підвищенню температури поверхні кочення колеса, що збільшує ризик виникнення термомеханічних пошкоджень.

2. Оцінено вплив матеріалу гальмових колодок на параметри роботи гальмової системи. Встановлено, що використання композиційних колодок допомагає зменшити необхідне натискання на одну колодку приблизно на 20–30 %, знизити тиск у гальмовому циліндрі та навантаження на елементи гальмової важільної передачі, а також скоротити витрати стисненого повітря під час гальмування. Отримані результати підтверджують, що вибір матеріалу колодки безпосередньо впливає не лише на ефективність процесу гальмування, а і режими роботи пневматичного гальмового обладнання.

3. Проведено техніко-економічне порівняння чавунних і композиційних гальмових колодок. Встановлено, що, незважаючи на вищу закупівельну вартість композиційних колодок (приблизно в півтора-два рази), їхній експлуатаційний ресурс перевищує ресурс чавунних у три-п’ять разів, що забезпечує зниження витрат на технічне обслуговування, скорочення кількості замін і зменшення експлуатаційних витрат протягом життєвого циклу рухомого складу.

Подальше підвищення ефективності гальмових систем доцільно здійснювати через розроблення композиційних матеріалів із покращеними теплопровідними властивостями, оптимізацію конструкції каркасів і фрикційного шару, а також комплексне врахування взаємозв’язку між характеристиками гальмових колодок і параметрами роботи пневматичної гальмової системи. Такий підхід дасть змогу одночасно підвищити гальмову ефективність, знизити експлуатаційні витрати і збільшити ресурс елементів гальмового обладнання.

Отримані результати можуть бути використані як науково обґрунтована основа для вибору типу гальмових колодок під час проєктування, модернізації та експлуатації гальмових систем залізничного рухомого складу. Комплексне врахування триботехнічних, теплотехнічних, експлуатаційних та економічних показників дає змогу підвищити ефективність функціонування гальмової системи, зменшити витрати на технічне обслуговування і забезпечити раціональне використання матеріальних ресурсів під час експлуатації вагонного парку.

Список використаних джерел

1. Dižo, J., Harušinec, J., & Blatnický, M. (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00010. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201713400010 (last access: 11.07.2026).

2. Ravlyuk, V. G. (2015). Determining the technical condition of rolling stock bushings by means of vibration diagnostics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2*, 7(74), 11–15. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39036 (last access: 11.07.2026).

3. Dižo, J., & Blatnický, M. (2019). Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology*, 19, 197–203. URL: https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/MT/19/2/197 (last access: 11.07.2026).

4. Ловська, А. О., & Равлюк, В. Г. (2022). Дослідження ненормативного зносу гальмових колодок і його вплив на ефективність гальмування вантажних поїздів. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»,* 25, 30-50.

5. Dižo, J., Steišunas, S., & Blatnický, M. (2017). Vibration analysis of a coach with the wheel-flat due to suspension parameters changes. *Procedia Engineering*, 192, 107–112. URL: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.019 (last access: 11.07.2026).

6. Сафронов, О. М. (2009). Дослідження дискової гальмівної системи пасажирського вагона. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології»,* 14, 51–67.

7. Равлюк, В., Равлюк, М., Фісіна, Я., & Нуруллаєв, Р. (2020). Уточнені розрахунки 2D схем-моделей гальмових важільних передач для збільшення ресурсу колодок вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»,* 35, 24-34.

8. Сафронов, О. М. (2018). Застосування комп'ютерного моделювання для уточненої оцінки гальмівної ефективності вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології,* 32 (2), 61–75.

9. Равлюк, В. Г., Нечволода, С. І. До вирішення проблеми зносу гальмових колодок у візках вантажних вагонів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.* 2017. Вип. 86. С. 140–143.

10. Ловська, А. О., & Равлюк, В. Г. (2022). Виявлення причин утворення поверхневих дефектів коліс вагонів, обладнаних композиційними колодками. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»,* 40, 102-120.

11. Равлюк, В. Г., Ловська, А. О., Скуріхін, Д. І., Рибін, А. В., & Равлюк, М. Г. (2025). Дослідження впливу конструктивних параметрів гальмової системи вантажного вагона на безпеку експлуатації залізничного рухомого складу. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»,* 30, 56–74. URL: https://doi.org/10.47675/2304-6309-2025-30-56-74 (дата звернення: 11.07.2026).

12. Калабухін, Ю. Є., Мартинов, І. Е., & Труфанова, А. В. (2022). Аналіз експлуатаційних складових економіко-технологічних станів життєвого циклу пасажирських вагонів. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»,* 24, 124–139. URL: https://doi.org/10.4675/2304-6309-2022-24-124-139 (дата звернення: 11.07.2026).

13. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Derevianchuk, Y., Bereznyi, V., & Bohutskyi, V. (2025). Optimal application force distribution between brake blocks of freight wagons. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 1638(1), 012100. URL: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1638/1/012100 (last access: 11.07.2026).

14. Lyu, Y., Bergseth, E., Wahlström, J., & Olofsson, U. (2019). Temperature dependence of friction characteristics of cast iron, organic and sintered brake block materials for railway applications. *Wear*, 432–433, 202942. URL: https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202942 (last access: 11.07.2026).

15. Мазур, В. Л., Найдек, В. Л., & Попов, Є. С. (2021). Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці. *Метал та лиття України*, 2 (325), 30 – 39.

16. Ravlyuk, V. G., Mykhalkiv, S. V., Rybin, A. V., Derevianchuk, Ia. V., Plakhtiy, O. A. (2020). Forecasting of wear of pads of modernized brake system devices of bogies of freight cars using ARIMA models. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu,* 6, 48–54. URL: https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/048 (last access: 11.07.2026).

17. Megna, G., & Bracciali, A. (2025). Block Brakes in Railway Systems: A Review. *Machines,* 13 (7), 579. URL: https://doi.org/10.3390/machines13070579 (last access: 11.07.2026).

18. Panchenko, S., Lovska, A., Ravlyuk, V., Babenko, A., Derevyanchuk, O., Zharova, O., & Derevianchuk, Y. (2023). Detecting the influence of uneven loading of the brake shoe in a freight car bogie on its strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 5, 7 (125), 6–13. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287791 (last access: 11.07.2026).

19. Zhang, Y., Wang, Y., et al. Effect of icing on braking performance of freight trains equipped with composite brake blocks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2023. URL: https://doi.org/10.1177/ 09544097231151474 (last access: 11.07.2026).

20. Nisiewicz, P., & Sawczuk, W. (2025). Composite brake blocks in railway freight wagons: operational problems. *Rail Vehicles / Pojazdy Szynowe*, 1–2, 9–17. URL: https://doi.org/10.53502/ RAIL-209083 (last access: 11.07.2026).

21. Ravlyuk, V., Derevianchuk, Y., & Pohorielov, S. (2021). Удосконалення механічної гальмової системи пасажирського вагона. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»,* 38, 272–284. URL: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38 (дата звернення: 11.07.2026).

22. Vakkalagadda, M., Thakare, H., Racherla, V., et al. (2015). Performance analyses of cast iron and composite brake blocks using full-scale inertia dynamometer for Indian Railways. *Wear,* 328–329, 64–76. URL: https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.006 (last access: 11.07.2026).

23. ЦТ–ЦВ–ЦЛ–0015. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України: затв. Наказом Укрзалізниці від 28.10.1997 р. № 264-Ц. Київ, 2004. 146 с.

24. Сіренко, К. А., & Мазур, В. Л. (2026). Ефективність застосування гальмових колодок на залізничному транспорті, виготовлених із чавуну і композиційної гумосуміші. *Метал та лиття України*, 1, 65–74. URL: https://doi.org/10.15407/steelcast2026.01.065 (дата звернення: 11.07.2026).

25. Zanelli, F., Castelli Dezza, F., Mauri, M., Debattisti, N., & Mazzucco, I. (2023). On the Development of a Diagnostic System for Condition Based Maintenance of Passenger Trains. *2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC),* 1–6. URL: https://doi.org/10.1109/ VPPC60535.2023.10403337 (last access: 11.07.2026).

26. Равлюк, В. Г., Ловська, А. О., Дерев'янчук, Я. В., & Стасів, Н. Л. (2026). Підвищення достовірності діагностування гальмового обладнання пасажирських вагонів на основі аналізу параметрів пневматичних процесів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.*, 216, 170–186. URL: https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362536 (дата звернення: 11.07.2026).

27. Ravlyuk, V., Derevianchuk, I., Afanasenko, I., & Ravlyuk, N. (2016). Development of electronic diagnostic system for improving the diagnosis reliability of passenger car brakes. *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies, 2, 9 (80), 35–41. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66007 (last access: 11.07.2026).

28. Калабухін, Ю. Є., Зоріна, О. І., Ловська, А. О., Каменева, Н. М., & Рукавішніков П. В. (2025). Оцінювання підвищення ефективності використання напіввагонів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 1 (160), 37–45. URL: https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i1.326789 (дата звернення: 11.07.2026).

29. Калабухін, Ю. Є., Мартинов, І. Е., Труфанова, А. В., & Литовченко, О. М. (2025). Обґрунтування доцільності модернізації буксових вузлів вантажних вагонів. *Комунальне господарство міст*, 6 (194), 399–405. URL: https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-399-405 (дата звернення: 11.07.2026).

30. Кравченко, О. О., & Андрєєва, О. В. (2012). Моделювання оцінки економічної ефективності інвестиційних проектів на залізничному транспорті в умовах економічної кризи. *Ефективна економіка*, 12. URL: https://www.ekonomy.nayka.com.ua

References

1. Dižo, J., Harušinec, J., & Blatnický, M. (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00010. https://doi.org/10.1051/matecconf/201713400010

2. Ravlyuk, V. G. (2015). Determining the technical condition of rolling stock bushings by means of vibration diagnostics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (74)), 11–15. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39036

3. Dižo, J., & Blatnický, M. (2019). Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology*, 19, 197–203. https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/MT/19/2/197

4. Lovska, A. O., & Ravlyuk, V. H. (2022). Doslidzhennia nenormatyvnoho znosu halmovykh kolodok i yoho vplyvu na efektyvnist halmuvannia vantazhnykh poizdiv [Study of abnormal wear of brake blocks and its influence on the braking efficiency of freight trains]. *Reikovyi Rukhomyi Sklad*, 25, 30–50 [in Ukrainian].

5. Dižo, J., Steišunas, S., & Blatnický, M. (2017). Vibration analysis of a coach with the wheel-flat due to suspension parameters changes. *Procedia Engineering*, 192, 107–112. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.019

6. Safronov, O. M. (2009). Doslidzhennia dyskovoi halmovoi systemy pasazhyrskoho vahoha [Investigation of the disc brake system of a passenger railway car]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnolohichnoho universytetu transportu. Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii»*, 14, 51–67 [in Ukrainian].

7. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Fisina, Ya., & Nurullaiev, R. (2020). Utochneni rozrakhunky 2D skhem-modelei halmovykh vazhilnykh peredach dlia zbilshennia resursu kolodok vantazhnykh vahoniv [Refined calculations of 2D models of brake rigging systems for increasing the service life of freight wagon brake blocks]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii»*, 35, 24–34 [in Ukrainian].

8. Safronov, O. M. (2018). Zastosuvannia kompiuternoho modeliuvannia dlia utochnenoi otsinky halmovoi efektyvnosti vantazhnykh vahoniv [Application of computer simulation for refined assessment of freight wagon braking efficiency]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii»*, 32 (2), 61–75 [in Ukrainian].

9. Ravlyuk, V. H., & Nechvoloda, S. I. (2017). Do vyrishennia problemy znosu halmovykh kolodok u vizkakh vantazhnykh vahoniv [Towards solving the problem of brake block wear in freight

wagon bogies]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia,* 86, 140–143 [in Ukrainian].

10. Lovska, A. O., & Ravlyuk, V. H. (2022). Vyiavlennia prychyn utvorennia poverkhnevykh defektiv kolis vahoniv, obladnanykh kompozytsiinymy kolodkamy [Identification of the causes of surface defects on railway wheels equipped with composite brake blocks]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii»,* 40, 102–120 [in Ukrainian].

11. Ravlyuk, V. H., Lovska, A. O., Skurikhin, D. I., Rybin, A. V., & Ravliuk, M. H. (2025). Doslidzhennia vplyvu konstruktyvnykh parametriv halmovoi systemy vantazhnoho vahoha na bezpeku ekspluatatsii zaliznychnoho rukhomoho skladu [Investigation of the influence of freight wagon brake system design parameters on the operational safety of railway rolling stock]. *Reikovyi Rukhomyi Sklad*, 30, 56–74. https://doi.org/10.47675/2304-6309-2025-30-56-74 [in Ukrainian].

12. Kalabukhin, Yu. Ye., Martynov, I. E., & Trufanova, A. V. (2022). Analiz ekspluatatsiinykh skladovykh ekonomiko-tekhnolohichnykh staniv zhyttievoho tsyklu pasazhyrskykh vahoniv [Analysis of operational components of the economic and technological states of the passenger car life cycle]. *Reikovyi Rukhomyi Sklad,* 24, 124–139. https://doi.org/10.4675/2304-6309-2022-24-124-139 [in Ukrainian].

13. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Derevianchuk, Y., Bereznyi, V., & Bohutskyi, V. (2025). Optimal application force distribution between brake blocks of freight wagons. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1638 (1), 012100. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1638/1/012100

14. Lyu, Y., Bergseth, E., Wahlström, J., & Olofsson, U. (2019). Temperature dependence of friction characteristics of cast iron, organic and sintered brake block materials for railway applications. *Wear*, 432–433, 202942. https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202942

15. Mazur, V. L., Naidek, V. L., & Popov, Ye. S. (2021). Porivniannia chavunnykh i kompozytsiinykh z chavunnymy vstavkamy halmovykh kolodok dlia rukhomoho skladu zaliznytsi [Comparison of cast iron and composite brake blocks with cast iron inserts for railway rolling stock]. *Metal ta Lyttia Ukrainy*, 2 (325), 30–39 [in Ukrainian].

16. Ravlyuk, V. G., Mykhalkiv, S. V., Rybin, A. V., Derevianchuk, Ia. V., & Plakhtii, O. A. (2020). Forecasting of wear of pads of modernized brake system devices of bogies of freight cars using ARIMA models. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu,* 6, 48–54. https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/048

17. Megna, G., & Bracciali, A. (2025). Block brakes in railway systems: A review. *Machines*, 13 (7), 579. https://doi.org/10.3390/machines13070579

18. Panchenko, S., Lovska, A., Ravlyuk, V., Babenko, A., Derevyanchuk, O., Zharova, O., & Derevianchuk, Y. (2023). Detecting the influence of uneven loading of the brake shoe in a freight car bogie on its strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (125)), 6–13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287791

19. Zhang, Y., Wang, Y., et al. (2023). Effect of icing on braking performance of freight trains equipped with composite brake blocks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. https://doi.org/10.1177/09544097231151474

20. Nisiewicz, P., & Sawczuk, W. (2025). Composite brake blocks in railway freight wagons: Operational problems. *Rail Vehicles / Pojazdy Szynowe*, 1–2, 9–17. https://doi.org/10.53502/RAIL-209083

21. Ravliuk, V., Derevianchuk, Y., & Pohorielov, S. (2021). Udoskonalennia mekhanichnoi halmovoi systemy pasazhyrskoho vahoha [Improvement of the mechanical brake system of a passenger railway car]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta*

tekhnolohii. Seriia «Transportni systemy i tekhnolohii», 38. https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38 [in Ukrainian].

22. Vakkalagadda, M., Thakare, H., Racherla, V., et al. (2015). Performance analyses of cast iron and composite brake blocks using full-scale inertia dynamometer for Indian Railways. *Wear*, 328–329, 64–76. https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.006

23. Instruktsiia (2004). Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu [Instruction for operation of railway brakes]. Kyiv: Ukrzaliznytsia, 146 [in Ukrainian].

24. Sirenko, K. A., & Mazur, V. L. (2026). Efektyvnist zastosuvannia halmovykh kolodok na zaliznychnomu transporti, vyhotovlenykh iz chavunu i kompozytsiinoi humosumishi [Efficiency of using cast iron and composite rubber brake blocks in railway transport]. *Metal ta Lyttia Ukrainy*, 1, 65–74. https://doi.org/10.15407/steelcast2026.01.065 [in Ukrainian].

25. Zanelli, F., Castelli Dezza, F., Mauri, M., Debattisti, N., & Mazzucco, I. (2023). On the development of a diagnostic system for condition based maintenance of passenger trains. *In 2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (p. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/VPPC60535.2023.10403337

26. Ravlyuk, V. H., Lovska, A. O., Derevianchuk, Ya. V., & Stasiv, N. L. (2026). Pidvyshchennia dostovirnosti diahnostuvannia halmovoho obladnannia pasazhyrskykh vahoniv na osnovi analizu parametriv pnevmatychnykh protsesiv [Improving the reliability of diagnostics of passenger railway car brake equipment based on the analysis of pneumatic process parameters]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 216, 170–186. https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362536 [in Ukrainian].

27. Ravlyuk, V., Derevianchuk, I., Afanasenko, I., & Ravliuk, N. (2016). Development of electronic diagnostic system for improving the diagnosis reliability of passenger car brakes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (80)), 35–41. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66007

28. Kalabukhin, Yu. Ye., Zorina, O. I., Lovska, A. O., Kameneva, N. M., & Rukavishnikov, P. V. (2025). Otsiniuvannia pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia napivvahoniv [Assessment of improving the efficiency of open freight wagon utilization]. *Informatsiino-keruiuchi Systemy na Zaliznychnomu Transporti*, 1 (160), 37–45. https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i1.326789 [in Ukrainian].

29. Kalabukhin, Yu. Ye., Martynov, I. E., Trufanova, A. V., & Lytovchenko, O. M. (2025). Obgruntuvannia dotsilnosti modernizatsii buksovykh vuzliv vantazhnykh vahoniv [Substantiation of the feasibility of modernization of freight wagon axle box assemblies]. *Komunalne Hospodarstvo Mist*, 6 (194), 399–405. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-399-405 [in Ukrainian].

30. Kravchenko, O. O., & Andrieieva, O. V. (2012). Modeliuvannia otsinky ekonomichnoi efektyvnosti investytsiinykh proektiv na zaliznychnomu transporti v umovakh ekonomichnoi kryzy [Modeling the assessment of the economic efficiency of investment projects in railway transport under conditions of economic crisis]. Efektyvna Ekonomika, 12 https://www.ekonomy.nayka.com.ua [in Ukrainian].

Сафронов Олександр Михайлович, доктор технічних наук, старший дослідник, Директор ДП «Український науково-дослідний інститут вагонобудування». ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-5865-7756.
E-mail: safronov@ukrndiv.com.ua

Калабухін Юрій Євгенович, доктор технічних наук, професор кафедри маркетингу, комерційної діяльності та економічної теорії, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-3693-7607. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.

Бабенко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X.
E-mail: babenko_ngkg@kart.edu.ua.

Safronov Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher, Director of the State Enterprise "Ukrainian Research Institute of Carriage Building". ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-5865-7756. E-mail: safronov@ukrndiv.com.ua
Kalabukhin Yuri, Dr. Sc. (Tech.), Professor Department of Marketing, commercial activities and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.
Babenko Andrii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X.
E-mail: babenko_ngkg@kart.edu.ua.

Дата надходження статті: 23.07.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 07.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 621.311:621.331

СТРУКТУРА І МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЕНИХ МЕРЕЖАХ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Канд. техн. наук Ю. О. Семененко, д-р техн. наук Б. Г. Любарський, канд. техн. наук О. І. Семененко

STRUCTURE AND METHODS OF CALCULATING ELECTRICAL ENERGY LOSSES IN DISTRIBUTED EXTERNAL POWER SUPPLY NETWORKS

PhD (Tech.) Y. O. Semenenko, Dr. Sc. (Tech.) B. H. Liubarskyi, PhD (Tech.) O. I. Semenenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371464

Анотація. *У статті наведено структури втрат електричної енергії в розподілених мережах зовнішнього електропостачання різних країн світу і розглянуто основні методи їх розрахунку. Проаналізовано технічні та нетехнічні складові втрат, визначено основні чинники, що впливають на їхню величину, зокрема параметри мережевих елементів, рівень і характер навантаження, конфігурацію електричної мережі, режим її роботи, температурні та кліматичні умови. Розглянуто особливості формування втрат у розподілених мережах різних рівнів напруги та в умовах зміни структури електропостачання. Систематизовано основні методи розрахунку втрат електричної енергії, що використовують для оцінювання режимів роботи розподілених мереж, зокрема методи, засновані на параметрах навантаження, розрахунку усталених режимів, визначенні потокорозподілу, використанні фактичних даних вимірювань та еквівалентних параметрів мережі. Проаналізовано переваги, обмеження та умови застосування зазначених методів. Окремо розглянуто особливості визначення втрат в електричних мережах України в умовах воєнних пошкоджень енергетичної інфраструктури, зміни конфігурації мереж і перерозподілу потоків*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Семененко Ю. О., Любарський Б. Г., Семененко О. І., 2026.

потужності. На основі проведеного аналізу розглянуто узагальнений підхід щодо вибору найбільш оптимального методу розрахунку втрат електричної енергії залежно від структури мережі, режиму її роботи, доступності вихідних даних і необхідної точності розрахунків. Отримані результати допомагають систематизувати сучасні підходи щодо визначення втрат електричної енергії та можуть бути використані під час аналізу, оцінювання енергоефективності, експлуатації, реконструкції та модернізації розподілених мереж зовнішнього електропостачання.

Ключові сова: *енергосистема, режими роботи, транспортування, передавання та розподіл електроенергії, тягове навантаження.*

Abstract. *The relevance of accurate assessment of electrical energy losses is determined by their significant impact on the efficiency, reliability, and economic performance of external power supply networks. The problem is becoming increasingly important due to the development of distributed generation, renewable energy sources, Smart Grid technologies, changes in load patterns, and the need to improve energy efficiency. For Ukraine, this issue is particularly relevant under wartime conditions, when damage to power lines, substations, and generating facilities causes changes in network configuration, redistribution of power flows, increased loading of individual elements, and operation under non-standard conditions. The purpose of this study is to analyze the structure of electrical energy losses and existing methods for their calculation in distributed external power supply networks, as well as to develop a generalized approach to selecting the most appropriate calculation method depending on network configuration, operating conditions, available input data, and required accuracy. The study uses methods of analysis, comparison, and systematization of scientific publications, technical standards, and methodological approaches to electrical energy loss assessment. The structure of losses is analyzed with consideration of technical and non-technical components. The main factors affecting the magnitude of losses are identified, including the parameters and length of power lines, transformer characteristics, voltage level, load magnitude and profile, network configuration, conductor temperature, environmental conditions, and the presence of distributed generation. The main approaches to loss calculation are systematized, including methods based on steady-state calculations, power flow analysis, load parameters, actual measurement data, equivalent network parameters, and statistical approaches. Their advantages and limitations are considered. It is established that simplified methods can be effectively applied for preliminary assessments, while detailed power flow calculations provide higher accuracy for complex networks and variable operating conditions. The use of actual measurement data makes it possible to improve the reliability of loss estimation and account for changes in network operating conditions. A generalized approach to selecting the most appropriate calculation method is proposed, taking into account the complexity and configuration of the network, operating conditions, availability and quality of input data, and the required accuracy of the results. The obtained results can be used to assess the energy efficiency of distribution networks, optimize operating modes, justify modernization and reconstruction measures, and improve the reliability and resilience of external power supply systems, particularly under conditions of infrastructure damage and transformation of the Ukrainian power system.*

Keywords: *power system, operating modes, transportation, transmission and distribution of electricity, traction load.*

Вступ. Підвищення ефективності функціонування енергетичних систем є однією з головних умов гарантування енергетичної безпеки, зниження собівартості електричної енергії та мінімізації негативного впливу на довкілля. Значна частина втрат електричної енергії в сучасних енергосистемах припадає на

мережі передавання та розподілу електроенергії, причому їхня величина залежить від структури мережі, рівня напруги, технічного стану обладнання, характеру навантаження та режимів експлуатації. У роботі [1] наведено аналіз рівнів технічних і нетехнічних втрат у розподілених мережах різних країн і зазначено про значну варіативність їхньої величини залежно від технічних і експлуатаційних умов.

Актуальність точного визначення структури та величини втрат електричної енергії зумовлена низкою чинників. По-перше, втрати безпосередньо впливають на економічні показники роботи операторів систем розподілу та кінцеву вартість електричної енергії для споживачів. По-друге, сучасна трансформація електроенергетичних систем супроводжена активним розвитком відновлюваних джерел енергії, розподіленої генерації, систем накопичення енергії та цифрових технологій Smart Grid. У результаті традиційні пасивні розподілені мережі поступово перетворюються на активні мережі з двонапрямленими потоками потужності та змінними режимами роботи.

У роботі [1] також зазначено, що методики визначення технічних і нетехнічних втрат можуть суттєво відрізнятися залежно від країни, структури електричної мережі, доступності вимірювальної інформації. Одні методи ґрунтовані на безпосередньому використанні результатів вимірювання електричних параметрів, тоді як інші передбачають математичне моделювання режимів мережі та визначення втрат у її окремих елементах. Це свідчить про відсутність єдиного універсального методу, який міг би забезпечити однакову точність для всіх типів розподілених мереж.

Важливим чинником під час розрахунку втрат у повітряних лініях є вплив температури провідників на їхній електричний опір. У науковій публікації [2], яка ґрунтована на положеннях стандарту IEEE Std 738, розглянуто взаємозв’язок між струмовим навантаженням, температурою неізольованого провідника та параметрами навколишнього середовища. Встановлено, що зміна температури провідника призводить до зміни його електричного опору, а отже, і зміни активних втрат електричної енергії. Тому для підвищення точності розрахунків у відповідних випадках доцільно враховувати температурні та кліматичні умови експлуатації мережі.

Окремим напрямом сучасних досліджень є оцінювання втрат в умовах розвитку розподіленої генерації та активних розподілених мереж. У роботі [3] розглянуто особливості функціонування мереж із розподіленими енергетичними ресурсами, за яких напрямок потоків активної та реактивної потужності може змінюватися залежно від режиму роботи джерел генерації та навантаження. За таких умов величина втрат не є сталою характеристикою мережі, а залежить від поточного стану системи. Це підвищує вимоги щодо методів розрахунку втрат і обумовлює необхідність використання методів аналізу усталених режимів, статистичного моделювання та фактичних експлуатаційних даних. Додаткової актуальності проблема визначення втрат електричної енергії набуває для України в умовах життя під час бойових дій і пошкодження енергетичної інфраструктури. Руйнування та виведення з експлуатації окремих генеруючих об’єктів, розподільних підстанцій, повітряних і кабельних ліній електропередачі призводять до зміни конфігурації електричних мереж, перерозподілу потоків потужності та зміни навантаження окремих елементів системи. Сучасний стан і проблеми функціонування енергетичної системи України в умовах суттєвих воєнних пошкоджень, свідчать про необхідність її відновлення та модернізації після закінчення бойових дій у післявоєнний період. В умовах виведення з ладу окремих елементів мережі

електропостачання можна здійснювати за резервними або тимчасовими схемами, які відрізняються від нормальної конфігурації. Тому використання методів, що ґрунтовані виключно на номінальній схемі мережі та усереднених значеннях навантаження, може не забезпечувати необхідної точності визначення втрат. У таких умовах особливого значення набувають методи, здатні враховувати фактичну конфігурацію мережі та поточні режими її роботи. Відновлення та модернізація енергетичної інфраструктури України також створюють передумови для впровадження сучасних принципів побудови та експлуатації розподілених мереж. Використання таких технологій Smart Grid забезпечує отримання більшої кількості оперативної інформації про параметри мережі, створює можливості для підвищення точності визначення втрат електричної енергії.

Аналіз літературних джерел показує, що відомі методи визначення втрат електричної енергії відрізняються за складністю, необхідним обсягом вихідної інформації, точністю і сферою застосування. Спрощені методи, що використовують усереднені значення навантаження та питомі показники, можуть бути ефективними для попереднього оцінювання втрат. Методи, засновані на розрахунку усталених режимів і потокорозподілу, забезпечують більш детальне визначення втрат в окремих елементах мережі.

Незважаючи на значну кількість проведених досліджень і наявність міжнародних стандартів і рекомендацій, універсального підходу щодо вибору методу розрахунку втрат електричної енергії, який однаково ефективно враховував би структуру мережі, рівень напруги, характер навантаження, наявність розподіленої генерації, кліматичні умови та доступність експлуатаційної інформації, не сформовано. Саме тому актуальним є систематизований аналіз структури втрат електричної енергії та відомих методів їх розрахунку з подальшим формуванням узагальненого підходу щодо вибору найбільш доцільної методики залежно від конкретних умов експлуатації розподілених мереж зовнішнього електропостачання.

Розв’язання зазначених задач допоможе систематизувати існуючі підходи щодо визначення втрат електричної енергії, оцінити їхні переваги та обмеження в різних умовах експлуатації мереж і сформувати основу для обґрунтованого вибору методів розрахунку з урахуванням сучасних вимог щодо енергоефективності, надійності та стійкості електропостачання.

Визначення мети та задач дослідження. Метою роботи є ретельний аналіз структури та методів розрахунку втрат електроенергії розподілених зовнішніх електромереж України та світу в цілому.

Основні завдання дослідження:

- проаналізувати структуру втрат електричної енергії розподілених мереж світу;
- розглянути узагальнений підхід щодо найбільш оптимального вибору методів розрахунку втрат електроенергії зовнішнього електропостачання.

Основна частина дослідження. Втрати електричної енергії відіграють визначальну роль у техніко-економічних характеристиках будь-якої енергосистеми. Їхнє грошове вираження безпосередньо враховано для розрахунку таких важливих показників, як приведені витрати, річні експлуатаційні витрати, собівартість передавання електроенергії та загальна ефективність функціонування мережі. Можна прослідкувати чіткий взаємозв’язок між капіталовкладеннями в побудову сучасної високотехнологічної електричної мережі та рівнем втрат у ній: збільшення капітальних вкладень у будівництво більш потужних і надійних ліній, сучасних перетворювачів, розподільних установок та іншого електричного обладнання в підсумку призводить до зниження технічних втрат, однак підвищує початкові

інвестиції та амортизаційні відрахування [2, 4, 8-12].

Проєктуючи енергосистеми, зазвичай вибирають таку конфігурацію мережі, за якої співвідношення між капітальним вкладенням і рівнем втрат мережі є оптимальним для мінімізації приведених витрат. Проте в процесі експлуатації електрична мережа та характеристики навантаження зазнають постійних змін: зростає споживання, змінюється склад обладнання, з'являються нові приєднання ліній, відбуваються реконструкції та аварійні відключення. Усі ці чинники призводять до збільшення втрат енергії та погіршення ефективності всієї системи електропостачання.

Окрім того, важливим також є те, що для кінцевих споживачів втрати електричної енергії також мають важливе значення. Збільшення втрат веде до зростання витрат на передавання та розподіл електроенергії по мережах, що, зокрема, позначається на тарифах компаній постачальників. Водночас є інша категорія втрат, викликана неефективними режимами роботи електромережі, недоліками в організації її експлуатації, похибками обліку електроенергії, асинхронністю зняття показів приладів обліку, несанкціонованим споживанням та іншими організаційно-технічними чинниками. Ці втрати не можуть бути повністю перекладені на споживачів і переважно лягають на фінансові витрати енергопостачальних і розподільних компаній.

У різних країнах світу підходи щодо нормування, обліку та розрахунку втрат суттєво відрізняються. В Україні Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), встановлює нормативи технологічних витрат електроенергії та затверджує методики їх розрахунку (рис. 1). У країнах Європейського Союзу діють директиви з енергоефективності, а також вимоги ENTSO-E щодо прозорості даних про втрати в магістральних і розподілених мережах. У США регулювання здійснюване переважно на рівні штатів за участю Федеральної комісії з регулювання енергетики (FERC), де акцентують на ринковій звітності utilities і стимулюванні зниження втрат через тарифоутворення. У багатьох країнах Азії особливо гостро стоїть проблема високих комерційних і некомерційних втрат, тому така політика зосереджена на масовому впровадженні систем smart metering (розумний облік) і боротьбі з несанкціонованим споживанням та цифровізації обліку.

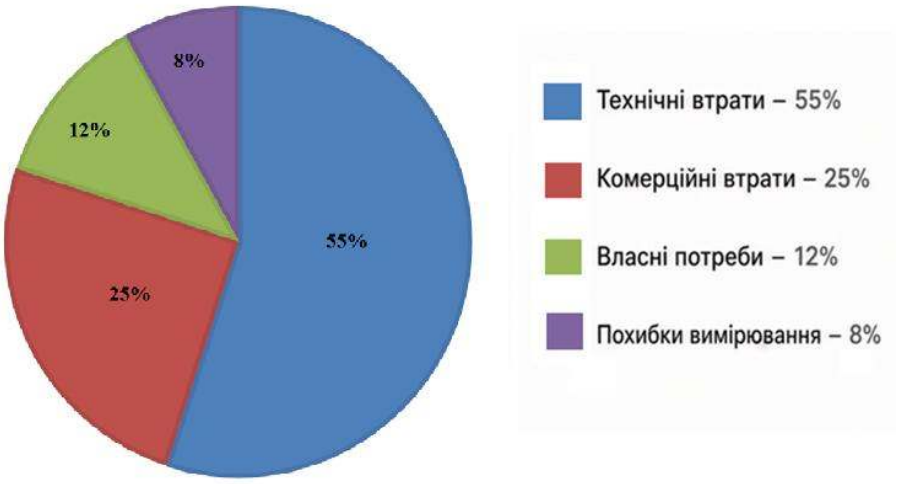


Рис. 1. Типова структура втрат розподілених мереж України [3-5]

У загальному метою розрахунків і комплексного аналізу втрат є розроблення економічно обґрунтованих заходів, спрямованих на їх зниження, підвищення енергоефективності мереж та оптимізацію фінансових результатів енергокомпаній.

Під час експлуатації систем зовнішнього електропостачання для оцінювання ефективності передавання електричної енергії доцільно використовувати показник звітних втрат ΔW. Він характеризує різницю між обсягом електроенергії, що надходить до досліджуваної ділянки мережі, $W_м$ і кількістю електроенергії W_e, яка передана споживачам і врахована відповідними системами обліку (рис. 2).



Рис. 2. Структура втрат електричної енергії (узагальнена класифікація)

Для залізничного електропостачання межі такого енергетичного балансу можуть бути визначені між точкою приєднання системи зовнішнього електропостачання до енергосистеми та шинами тягової підстанції або іншою визначеною точкою відпускання електроенергії.

Загальна величина звітних втрат не характеризує виключно фізичні процеси в елементах електричної мережі. Вона може містити складові, зумовлені технічними втратами в лініях електропередачі та силових трансформаторах, витратами електроенергії на власні потреби тягових підстанцій, похибками вимірювальних приладів і вимірювальних трансформаторів, а також іншими особливостями організації обліку електроенергії. Тому для об'єктивного оцінювання енергоефективності зовнішнього електропостачання залізниць загальний показник необхідно розглядати у взаємозв'язку з його окремими складовими.

Залежно від поставленого завдання структуру втрат можна розглядати на узагальненому або деталізованому рівні. Узагальнений підхід дає змогу визначити співвідношення основних складових

енергетичних втрат, тоді як деталізований аналіз – встановити конкретні елементи мережі та режими їхньої роботи, які формують найбільшу частину втрат. Для систем зовнішнього електропостачання залізниць такий підхід є особливо важливим під час оцінювання технічного стану ліній електропередачі, силових трансформаторів та іншого обладнання тягових підстанцій [4, 5, 7].

До основних складових звітних втрат електричної енергії можна віднести технічні втрати, витрати електроенергії на власні потреби підстанцій, складову, пов'язану з похибками вимірювання та обліку, а також інші нетехнічні втрати.

Технічні втрати електричної енергії ΔW_T виникають безпосередньо внаслідок фізичних процесів під час передавання та перетворення електроенергії [3-7]. У системі зовнішнього електропостачання залізниць вони формуються переважно в лініях електропередачі, силових трансформаторах, реакторах, трансформаторах струму та напруги, комутаційному обладнанні та інших елементах електричної мережі. Їхня величина залежить від параметрів обладнання, рівня напруги, величини та характеру навантаження, тривалості роботи і фактичного режиму електропостачання.

Особливістю залізничних систем є значна нерівномірність тягового навантаження, обумовлена графіком руху поїздів і зміною потужності електрорухомого складу. Унаслідок цього струмові навантаження ліній зовнішнього електропостачання та трансформаторів тягових підстанцій можуть істотно змінюватися протягом доби. Відповідно, змінюється і величина навантажувальної складової технічних втрат.

Витрати електричної енергії на власні потреби підстанцій $W_{вп}$ пов'язані із забезпеченням нормальної роботи обладнання системи зовнішнього і тягового електропостачання. До них належать витрати на функціонування систем керування, релейного захисту і автоматики, освітлення, вентиляції, опалення, зв'язку та інших допоміжних пристроїв. Для визначення фактичного обсягу цієї складової на тягових підстанціях використовують відповідні засоби вимірювання.

Втрати, пов`язані з похибками вимірювання, $W_{вим}$ виникають унаслідок неточності роботи приладів обліку, вимірювальних трансформаторів струму та напруги, а також через відхилення умов експлуатації від нормованих режимів. Для систем зовнішнього електропостачання залізниць ця складова має суттєве значення, оскільки достовірність вимірювання електроенергії безпосередньо впливає на визначення енергетичного балансу між зовнішньою електричною мережею і тяговими підстанціями.

Комерційні втрати $\Delta W_к$ у класичному розумінні пов'язані з невідповідністю між фактичним обсягом споживання та даними його обліку, організаційними недоліками контролю енергоспоживання та іншими нетехнічними чинниками. У випадку зовнішнього електропостачання залізниць їх доцільно розглядати насамперед у контексті правильності організації комерційного обліку, синхронізації показань вимірювальних систем і достовірності визначення обсягів електроенергії на межі балансової належності.

Для систем зовнішнього електропостачання залізниць України розподіл втрат на окремі складові дає змогу перейти від загального визначення їхньої величини до встановлення конкретних причин виникнення. Це створює основу для подальшого аналізу режимів роботи ліній електропередачі, тягових підстанцій і силового обладнання, визначення технічно й економічно обґрунтованих заходів зі зменшення втрат електричної енергії [8-18].

Методи розрахунку втрат електроенергії. Для розрахунку навантажувальних втрат електроенергії за певний період часу (наприклад місяць, рік

тощо) застосовують різні методи. Вибір конкретного методу залежить від доступності даних про схеми мереж і навантаження їхніх елементів, а також від необхідної точності результатів та оперативності оновлення інформації.

Методи розрахунку втрат (у порядку зменшення точності отримуваних результатів) такі:

1. *Метод оперативних розрахунків* є найбільш точним методом розрахунку втрат. Він базований на використанні актуальних даних телевимірювань і телесигналізації в режимі, близькому до реального часу. Допомагає враховувати фактичні схеми мережі, поточні навантаження та режими роботи обладнання. Застосовуваний у сучасних системах SCADA/EMS і автоматизованих системах управління розподіленими мережами:

$$\Delta W = 3\sum_{i=1}^{n} R_i \sum_{j=1}^{m} I_{ij}^2 \Delta t_{ij}, \qquad (1)$$

де n – кількість елементів мережі;

I_{ij} – струмове навантаження і-го елемента з опором R_i на інтервалі часу t_{ij};

Δt_{ij} – інтервал часу між опитуваннями датчиків, що фіксують струмові навантаження елементів;

m – кількість інтервалів часу.

2. *Метод розрахункових діб* використовує характерні добові графіки навантаження (робочий день, вихідний, максимум зимового та літнього періодів). На основі цих графіків розраховують втрати за добу, а потім масштабують на розрахунковий місяць або рік:

$$\Delta W = k_л k_ф^2 \Delta W_д Д_{екв j}, \qquad (2)$$

де $k_л$ – коефіцієнт, що враховує вплив втрат в арматурі повітряних ліній електропередачі, приймають рівним 1,02 для ліній напругою 110 кВ і вище, 1,0 – для ліній нижчих класів напруги;

$k_ф^2$ – квадрат коефіцієнта форми графіка добових відпусків електроенергії в мережу (графіка з кількістю значень, що відповідає кількості днів у місяці контрольних вимірювань);

$\Delta W_д$ – втрати електроенергії за добу розрахункового місяця із середньодобовим відпусканням електроенергії в мережу;

$Д_{екв j}$ – еквівалентна кількість днів у j-му розрахунковому інтервалі.

Метод забезпечує хорошу точність за наявності якісних графіків навантаження.

3. *Метод середніх навантажень.* Базований на використанні середніх значень активної та реактивної потужності за розрахунковий період. Втрати визначають через середній струм або середню потужність з урахуванням коефіцієнта форми графіка. Метод простіший у реалізації, однак є суттєвий недолік, він менш точний порівняно з попередніми:

$$\Delta W = k_л k_к \Delta P_{ср} T_j k_ф^2, \qquad (3)$$

де $k_к$ – коефіцієнт, що враховує відмінність конфігурацій графіків активного та реактивного навантаження різних гілок мережі;

$\Delta P_{ср}$ – втрати потужності в мережі за середніх за розрахунковий інтервал навантажень;

T_j – тривалість j-го розрахункового інтервалу;

$k_ф^2$ – квадрат коефіцієнта форми графіка сумарного навантаження мережі за розрахунковий інтервал.

4. *Метод кількості годин найбільших втрат потужності* є класичним інженерним методом розрахунку, що використовує максимальну потужність втрат і кількість годин найбільших втрат. Допомагає швидко оцінити річні втрати за відомою максимальною потужністю і характеристиками графіка навантаження:

$$\Delta W = k_л k_o \Delta P_{max} T_j \tau_o, \qquad (4)$$

де ΔP_{max} – втрати потужності в режимі найбільшого навантаження мережі;

τ_o – відносна кількість годин найбільших втрат потужності, визначена за графіком сумарного навантаження мережі за розрахунковий інтервал.

5. *Метод оцінювання втрат за узагальненою інформацією* про схеми та навантаження мережі. Ґрунтований на встановленні регресійної залежності між втратами електричної енергії та узагальненими параметрами схем і режимів роботи електричних мереж. Регресійні моделі дають змогу прогнозувати втрати електроенергії на основі даних про структуру мережі, її елементи, а також типові режими роботи без необхідності детального врахування кожного конкретного навантаження або зміни схеми. Це допомагає отримувати достатньо точні оцінки втрат за умов обмеженої або узагальненої інформації про мережу та її характеристики.

Для розрахунків за методами 1–4 використовують дані про схеми мережі та навантаження її елементів, які визначають відповідно до законів електротехніки або на основі вимірювань. Розрахунки зазвичай виконують щомісяця за схемою, актуальною для розрахункового місяця (рис. 3). Якщо схеми мереж залишаються незмінними протягом певного періоду, розрахунок може бути виконаний одразу за кілька місяців із подальшим підсумовуванням результатів.

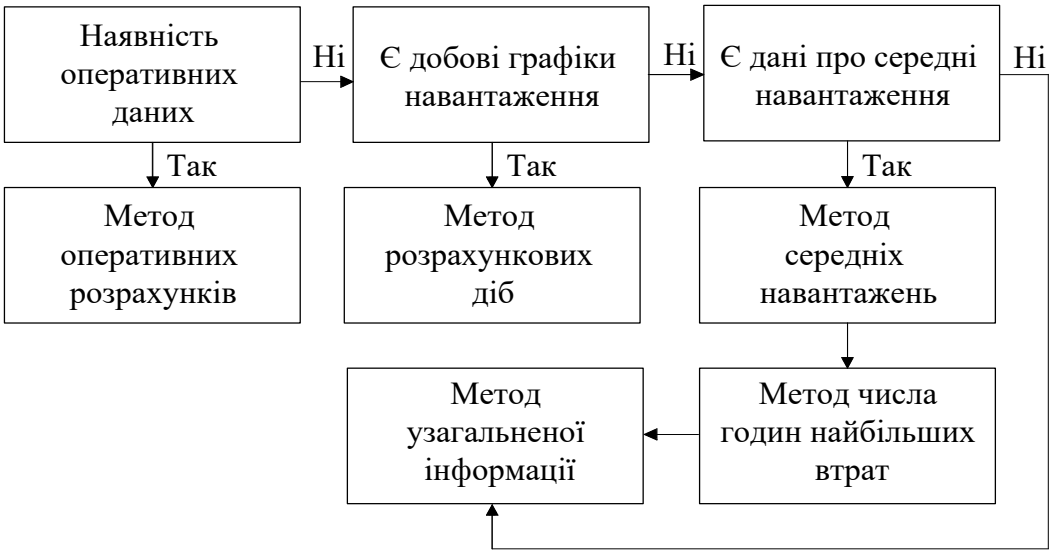


Рис. 3. Вибір методу розрахунку втрат електроенергії

Рівень втрат електроенергії істотно відрізняється залежно від технічного стану мереж, якості обліку, кліматичних умов, щільності навантаження та ефективності організаційних заходів.

Методи розрахунку втрат електричної енергії з урахуванням температурного режиму проводів. Температурна залежність активного опору проводів повітряних ліній електропередачі є одним із визначальних чинників, що впливають на точність розрахунку втрат електроенергії в розподілених мережах зовнішнього електропостачання. Неврахування цієї залежності призводить до систематичних похибок, величина яких зростає зі збільшенням струмового навантаження та амплітуди коливань

температури навколишнього середовища [8-18].

Лінійна модель температурної залежності активного опору має такий вигляд:

$$R_\Theta = R_{20}[1+\alpha(\Theta_{пр}-20)], \qquad (5)$$

де R_Θ – активний опір проводу за температури Θ, °С,

R_{20} – активний опір за температури 20 °С, Ом;

α – температурний коефіцієнт активного опору, °С$^{-1}$.

У вигляді погонного активного опору:

$$r_{0(T_{пр})} = r_{0(20)}[1+\alpha_T(\Theta_{пр}-20)], \qquad (6)$$

де $r_{0(20)}$ – погонний активний опір проводу за температури $\Theta_{пр}$ = 20 °С, Ом/км;

α_T – температурний коефіцієнт активного опору, 1/°С.

Для проводів підвищеної пропускної спроможності, згідно з рекомендаціями International Council on Large Electric Systems «CIGRE Technical Brochure 601» (Міжнародна рада з великих електричних систем високої напруги), використовують квадратичну апроксимацію питомого опору:

$$g = g_{20}\left\{1+\alpha(\Theta_{ср}-20)+\zeta(\Theta_{ср}-20)^2\right\}, \qquad (7)$$

де $\Theta_{ср}$ – середня температура проводу, °С;

ζ – квадратичний температурний коефіцієнт активного опору проводу, 1/°С^2.

Точність визначення температури струмопровідної частини безпосередньо впливає на достовірність подальших розрахунків втрат. Сучасні методики базовані на розв'язанні рівняння теплового балансу з урахуванням нагріву, теплообміну, сонячної радіації, тиску вітру, вологості повітря.

У нормативно-технічній практиці США основним документом є стандарт IEEE 738, що регламентує статичні та динамічні моделі теплового режиму. У країнах Європи діють рекомендації CIGRE. В Азії застосовують національні стандарти, адаптовані до умов високих температур і вологості, а також чисельні методи моделювання. В Україні чинна нормативна база [15] орієнтована переважно на використання середньорічних або середньо-місячних значень температури повітря.

Методи визначення температури проводу поділяють на прямі та непрямі. Прямі методи ґрунтовані на безпосередньому вимірюванні температури або параметрів, що є однозначно з нею пов'язаними (механічне навантаження, електричний опір тощо). Непрямі методи реалізовані через розв'язання рівняння теплового балансу за відомими значеннями струму та метеорологічних параметрів.

Аналітичні розв'язки рівняння теплового балансу забезпечують достатню точність за відносно невеликих обчислювальних витрат. Чисельні методи (метод скінченних елементів, метод скінченних об'ємів), реалізовані в пакетах ANSYS, ELCUT, COMSOL Multiphysics, дають змогу враховувати геометрію багатожильних проводів і нестаціонарність теплових процесів.

Статистичний аналіз втрат електроенергії розподілених мереж зовнішнього електропостачання країн світу

На рис. 4 наведено динаміку втрат електричної енергії під час її передавання та розподілу в електричних мережах країн Азії: Індії, Індонезії, Таїланду, Китаю та Японії у 2015–2023 рр., за відкритими даними Світового банку (World Bank Open Data) [4]. Аналізуючи отримані залежності, було виявлено суттєву диференціацію рівнів втрат між досліджуваними країнами, що зумовлено відмінностями у структурі електроенергетичних систем, стані мереж щодо їх старіння, модернізації, протяжності та кількості навантаження.

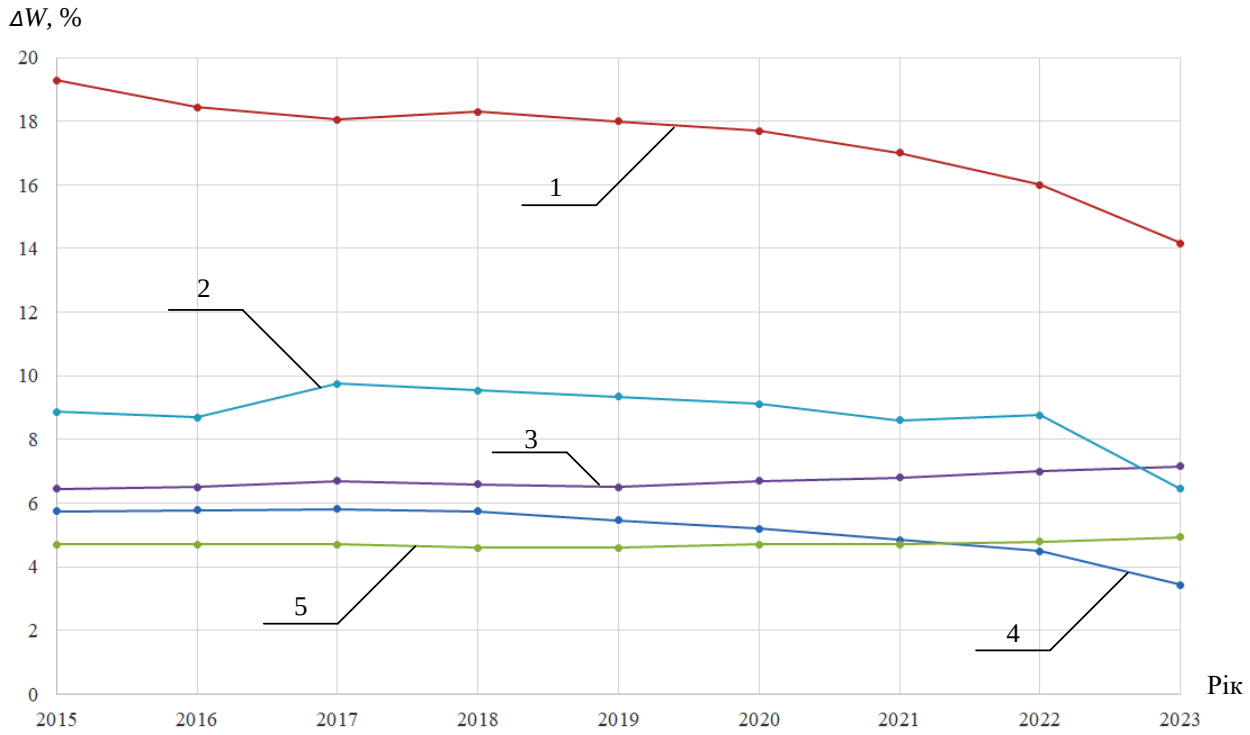


Рис. 4. Графік залежності втрат електроенергії під час передавання та розподілу (% обсягу виробництва) мереж зовнішнього електропостачання основних країн Азії за спожитою потужністю в період 2015-2023 рр.:
1 – Індія; 2 – Індонезія; 3 – Таїланд; 4 – Китай; 5 – Японія

Найбільші значення втрат протягом усього досліджуваного періоду характерні для Індії від 19,2 % у 2015 р. до 14,2 % відповідно у 2023 р. При цьому незначне локальне підвищення у 2018 р. не змінило загального характеру залежності. Така динаміка свідчить про поступове підвищення ефективності функціонування електричних мереж Індії. Водночас їхній рівень залишається суттєво вищим порівняно з іншими країнами, поданими на графіку.

Для Індонезії характерна більш виражена нестабільність показника. У 2015–2016 рр. втрати становили близько 8,6–8,8 %, у 2017 р. спостерігали їх підвищення приблизно до 9,7 %, після чого сформувалася тенденція до поступового зниження. У 2021–2022 рр. рівень втрат становив близько 8,6–8,8 %, а у 2023 р. відбулося найбільш суттєве зниження до 6,4 %.

Таїланд, навпаки, має відносно стабільний рівень втрат із незначною тенденцією до зростання. У 2015 р. показник становив близько 6,4 %, а до 2023 р. збільшився приблизно до 7,1 %. При цьому протягом 2015–2021 рр. зміни були незначними, що свідчить про відносну стабільність технічних характеристик електричної мережі. Поступове зростання втрат у 2021–2023 рр. може свідчити про збільшення навантаження на мережеву інфраструктуру або недостатні темпи її оновлення порівняно з темпами зміни електроспоживання.

Для Китаю спостерігають одну з найбільш виражених позитивних тенденцій. Якщо у 2015 р. втрати становили приблизно 5,8 %, то у 2023 р. вони знизилися до близько 3,4 %. Тенденція характеризує підвищення ефективності передавання та розподілу електроенергії та може бути пов’язана з масштабною модернізацією

електричних мереж, підвищенням рівня автоматизації та впровадженням сучасних технологій керування потоками потужності.

Японія демонструє найстабільнішу залежність серед усіх досліджуваних країн Азії. Протягом 2015–2022 рр. втрати були приблизно на рівні 4,6–4,8 %, а у 2023 р. спостерігали незначне підвищення до 4,9 %. Відсутність істотних коливань свідчить про високий рівень технічної досконалості і стабільність експлуатаційних характеристик електричної мережі.

На рис. 5 наведено динаміку втрат електричної енергії під час її передавання та розподілу в мережах зовнішнього електропостачання України та країн Європи у 2015–2024 рр. (інформація також взята з джерела [4]). Показник характеризує частку електроенергії, яку втрачають на етапах передавання та розподілу, від загального обсягу її виробництва, і використовуваний як узагальнений індикатор ефективності функціонування електричних мереж.

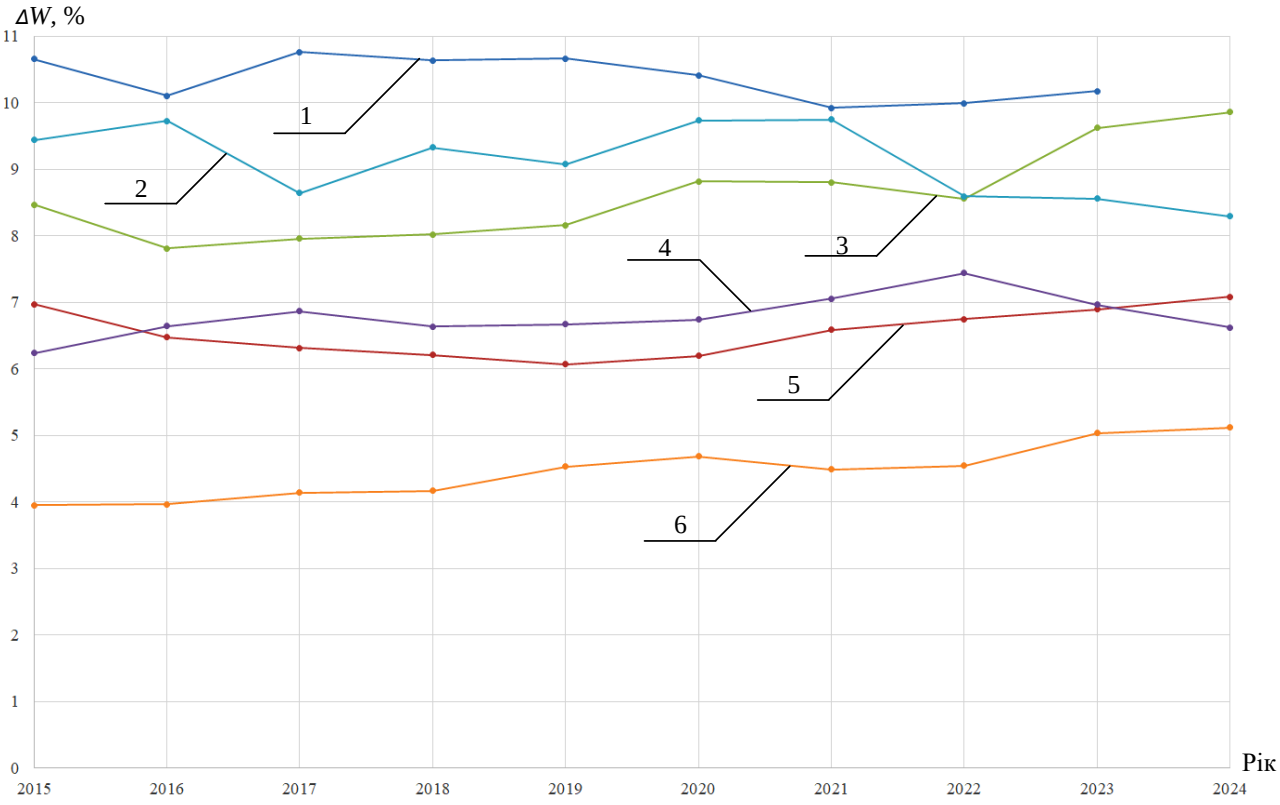


Рис. 5. Графік залежності втрат електроенергії під час передавання та розподілу (% обсягу виробництва) мереж зовнішнього електропостачання основних країн Європи за спожитою потужністю в період 2015-2024 рр.:
1 – Україна; 2 – Іспанія; 3 – Велика Британія; 4 – Франція; 5 – Італія; 6 – Німеччина

Проаналізувавши рис. 5, можна зазначити, що найвищі значення показника протягом досліджуваного періоду характерні для України, де втрати стабільно знаходяться в межах 10–11 %.

Для Іспанії характерна загальна тенденція до зменшення втрат у першій половині досліджуваного періоду з подальшим відносним вирівнюванням показника в межах 9,74–8,56 %. Для Великої

Британії, навпаки, характерне поступове підвищення втрат у 2020–2024 рр. 7,8–9,6 %, що свідчить про застарілий підхід щодо підвищення ефективності інфраструктури розподілених мереж і неминучу майбутню їх модернізацію.

Франція та Італія демонструють відносно стабільні значення втрат у межах 6–7 % із помірною тенденцією до їх збільшення наприкінці досліджуваного періоду. Для Німеччини характерний найнижчий початковий рівень втрат 4 % серед розглянутих країн Європи, однак у 2015–2024 рр. спостерігали поступове його підвищення до 5 %, що потребує врахування під час оцінювання довгострокової енергоефективності електричних мереж.

На рис. 6 наведено динаміку втрат електричної енергії під час її передавання та розподілу в мережах зовнішнього електропостачання країн Північної та Південної Америки у 2015–2024 рр. [4].

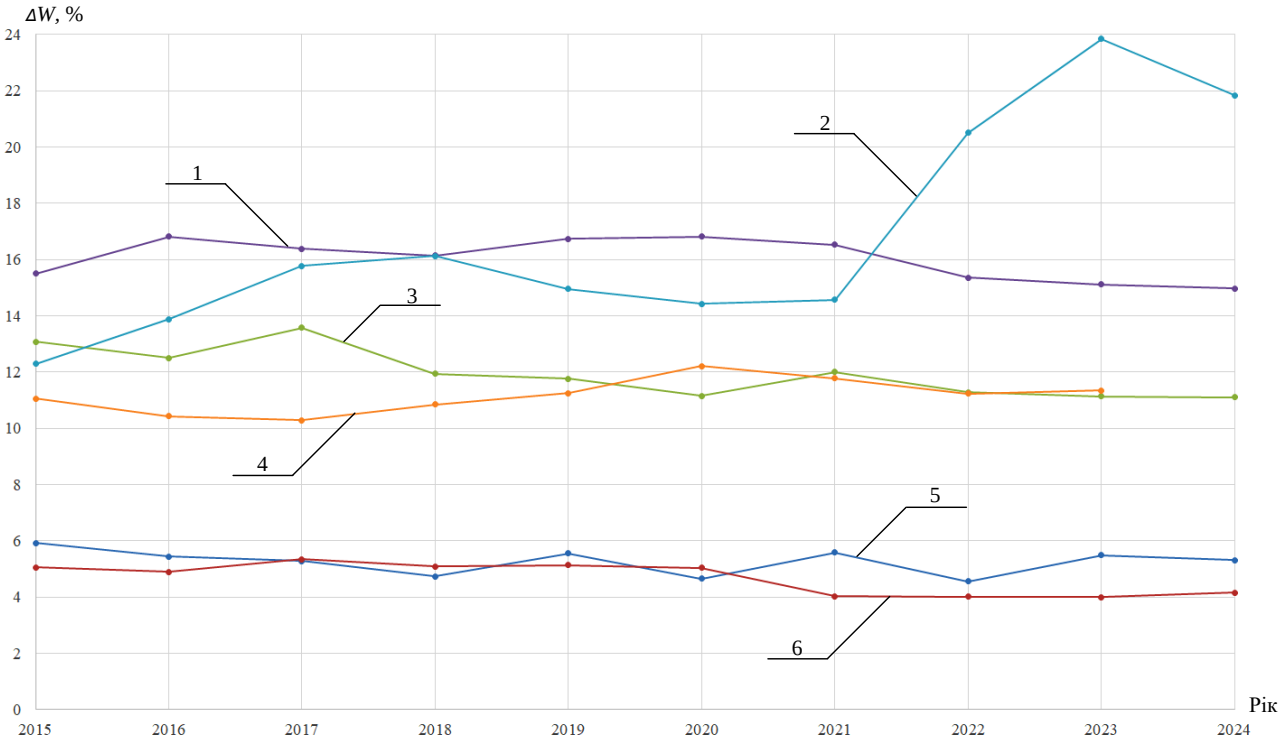


Рис. 6. Графік залежності втрат електроенергії під час передавання та розподілу (% обсягу виробництва) мереж зовнішнього електропостачання основних країн Північної та Південної Америки за спожитою потужністю в період 2015-2024 рр.: 1 – Бразилія; 2 – Аргентина; 3 – Мексика; 4 – Перу; 5 – США; 6 – Канада

Аналіз залежностей дає змогу встановити, що найвищі значення втрат протягом досліджуваного періоду характерні для Бразилії та Аргентини. Для Бразилії показник у 2015–2021 рр. тримався переважно на рівні 15–17 %, після чого спостерігали поступове його зниження до 14,97 % у 2024 р. Отже, для електричної мережі Бразилії характерна помірна позитивна тенденція до скорочення втрат у другій половині досліджуваного періоду, однак для Аргентини, навпаки, у 2022–2023 рр. відбувається різке їх збільшення – до 20,51 і 23,85 % відповідно, що свідчить про значне погіршення енергоефективності мереж у цей період.

Для Мексики та Перу характерні середні рівні втрат електроенергії – приблизно 10–13 %. Найнижчі значення втрат спостерігають у США та Канаді, де протягом усього досліджуваного періоду показник переважно не перевищує 6 %. Для Канади характерний відносно стабільний рівень втрат із тенденцією до їх зниження у 2021–2023 рр., тоді як у США спостерігають більш виражені міжрічні коливання.

На рис. 7 наведено динаміку втрат електричної енергії під час її передавання та розподілу в мережах зовнішнього електропостачання країн Африки та материка Австралія за період 2015–2024 рр. [4]. Аналіз отриманих залежностей свідчить про значну диференціацію країн як за абсолютним рівнем втрат, так і характером їхньої часової зміни.

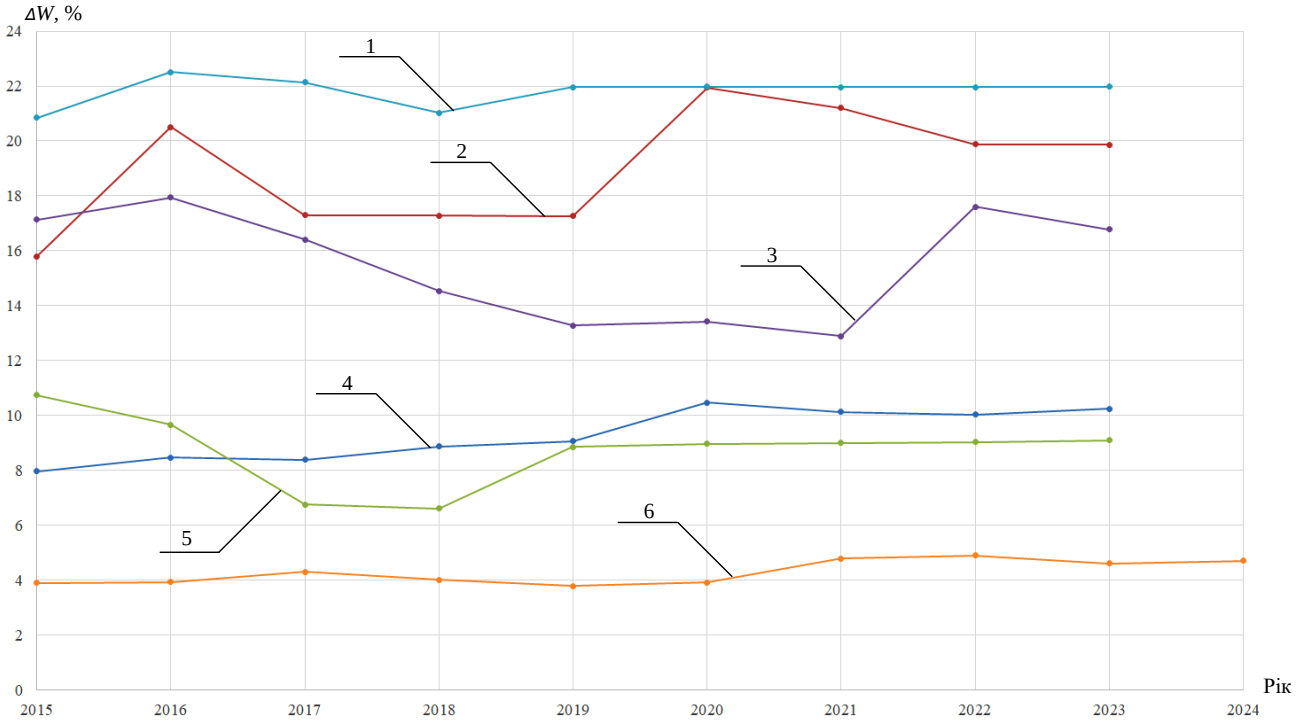


Рис. 7. Графік залежності втрат електроенергії під час передавання та розподілу (% обсягу виробництва) мереж зовнішнього електропостачання основних країн Африки та Австралії за спожитою потужністю в період 2015-2024 рр.:
1 – Камерун; 2 – Єгипет; 3 – Танзанія; 4 – ДРК; 5 – ПАР; 6 – Австралія

Найвищий рівень втрат характерний для Камеруну, де протягом досліджуваного періоду показник переважно знаходиться в межах 21–23 %. Єгипет також має високий рівень втрат, причому динаміка має більш виражений коливальний характер: після зростання у 2016 р. спостерігали зниження, а у 2020 р. показник знову досягає близько 22 % із подальшим поступовим зменшенням.

Для Танзанії характерною є нестабільна динаміка 17,1–13,3 % протягом досліджуваного періоду. Демократична Республіка Конго демонструє більш помірний рівень втрат із поступовим зниженням у 2015–2018 рр. і подальшим стабілізуванням на рівні близько 9 %, що вказує на відносну стабільність функціонування мережевої інфраструктури в останній частині досліджуваного періоду, хоча рівень

втрат залишається вищим порівняно з розвиненими енергетичними системами.

Найнижчі значення серед перелічених країн характерні для Південної Африки та Австралії. Для Південно-Африканської Республіки втрати протягом 2015–2023 рр. становлять близько 4–5 %. Австралія також має низький рівень втрат, однак у 2015–2018 рр. спостерігали їхнє поступове зниження, після чого показник стабілізувався на рівні близько 5 %. Це свідчить про високий рівень розвитку енергетичної інфраструктури та більш стабільні параметри функціонування електричних мереж.

У таблиці наведено результати порівняльного аналізу втрат електричної енергії під час її передавання та розподілу в мережах зовнішнього електропостачання 23 країн за період 2015–2024 рр. Величина втрат подана у відсотках обсягу виробленої електроенергії, що дає змогу коректно порівняти ефективність функціонування електричних мереж незалежно від масштабів енергетичної системи окремої країни та регіону. Для деяких країн з об’єктивних причин дані за 2024 р. відсутні, за відкритими даними World Bank Open Data.

Таблиця

Втрати електроенергії мереж зовнішнього електропостачання під час передавання та розподілу, % обсягу виробництва [6]

Номер	Країна	Рік									
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Китай	5,74	5,78	5,81	5,74	5,47	5,2	4,85	4,5	3,43	–
2	Канада	5,052	4,89	5,34	5,088	5,14	5,04	4,02	4,007	4	4,152
3	Австралія	3,904	3,938	4,3	4,025	3,8	3,92	4,79	4,911	4,619	4,711
4	Японія	4,7	4,7	4,7	4,6	4,6	4,7	4,7	4,8	4,93	–
5	Німеччина	3,95	3,96	4,13	4,163	4,53	4,68	4,48	4,546	5,035	5,116
6	США	5,914	5,433	5,28	4,739	5,56	4,65	5,58	4,56	5,483	5,312
7	Індонезія	8,87	8,7	9,75	9,55	9,35	9,12	8,61	8,76	6,45	–
8	Італія	6,967	6,472	6,31	6,209	6,06	6,19	6,58	6,744	6,893	7,079
9	Франція	6,232	6,639	6,86	6,633	6,67	6,74	7,05	7,438	6,958	6,618
10	Таїланд	6,46	6,5	6,7	6,6	6,5	6,7	6,8	7	7,16	–
11	Іспанія	9,437	9,724	8,64	9,326	9,07	9,73	9,74	8,593	8,557	8,288
12	ДРК	10,74	9,673	6,76	6,612	8,86	8,97	9	9,042	9,098	–
13	Велика Британія	8,463	7,807	7,95	8,019	8,15	8,81	8,8	8,558	9,617	9,854
14	Україна	10,66	10,1	10,8	10,63	10,7	10,4	9,92	9,991	10,17	–
15	ПАР	7,969	8,467	8,4	8,868	9,07	10,5	10,1	10,04	10,25	–
16	Мексика	13,08	12,5	13,6	11,95	11,8	11,2	12	11,28	11,13	11,11

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
17	Перу	11,06	10,43	10,3	10,85	11,2	12,2	11,8	11,23	11,34	–
18	Індія	19,28	18,44	18,1	18,3	18	17,7	17	16	14,16	–
19	Бразилія	15,5	16,82	16,4	16,13	16,7	16,8	16,5	15,35	15,11	14,97
20	Танзанія	17,13	17,93	16,4	14,54	13,3	13,4	12,9	17,6	16,78	–
21	Єгипет	15,8	20,5	17,3	17,28	17,3	21,9	21,2	19,87	19,87	–
22	Камерун	20,85	22,5	22,1	21,02	22	22	22	21,97	21,97	–
23	Аргентина	12,29	13,88	15,8	16,13	15	14,4	14,6	20,51	23,85	21,84

Найнижчі рівні втрат протягом більшої частини досліджуваного періоду характерні для Австралії, Німеччини, Канади та Японії. Для цих країн показник переважно знаходиться в межах 4–5 %. Такий рівень можна розглядати як ознаку відносно високої ефективності передавання та розподілу електричної енергії.

Китай має одну з найбільш виражених позитивних тенденцій. Якщо у 2015 р. втрати становили 5,74 %, то у 2023 р. їхній рівень зменшився до 3,43 %. Отже, за дев'ять років відбулося скорочення показника приблизно на 40 % від початкового рівня. Подібна тенденція свідчить про послідовне підвищення ефективності функціонування електричних мереж і є показовою з позиції довгострокового розвитку мережевої інфраструктури.

Для США характерна більш нестабільна динаміка. Показник втрат зменшився з 5,91 % у 2015 р. до 4,56 % у 2022 р., однак у 2023 р. знову підвищився до 5,48 %. Незважаючи на відносно невисокий рівень втрат, їхній часовий ряд має коливання, що не дає змогу однозначно визначити стійку тенденцію до подальшого зниження.

Для країн із середнім рівнем втрат, а їх більшість, характерні значення переважно в діапазоні 6–10 %, що може свідчити про необхідність подальшого підвищення ефективності мережевої інфраструктури.

Україна протягом усього досліджуваного періоду належить до групи країн із підвищеним рівнем втрат. Значення показника змінюється в межах 9,92–10,8 %, а середній рівень за 2015–2023 рр. становить близько 10,37 %. При цьому мінімальне значення зафіксовано у 2021 р. – 9,92 %, після чого спостерігають незначне повторне збільшення, зумовлене бойовими діями на території країни.

Для країн із високим рівнем втрат – Індії, Бразилії, Танзанії, Єгипту, Камеруну та Аргентини, характерні значно більші значення показника – 14,1–23,85 %. Найбільш позитивну динаміку серед них спостерігають в Індії: втрати зменшилися з 19,28 % у 2015 р. до 14,16 % у 2023 р. А найгірша ситуація склалася в Аргентини, де спостерігають найбільш несприятливу тенденцію — зростання з 12,29 % у 2015 р. до 23,85 % у 2023 р.

Із позицій дослідження зовнішнього електропостачання електрифікованого транспорту отримані результати мають особливе значення. Втрати електроенергії в мережах визначають додаткову потребу у виробництві та передаванні електричної енергії, а отже, безпосередньо впливають на енергетичну ефективність системи електропостачання. Для тягових електричних мереж це особливо актуально через значні та динамічно змінні навантаження, обумовлені режимами руху поїздів, концентрацією тягових підстанцій і нерівномірністю споживання електроенергії.

Порівняльний аналіз таблиці показує, що низький рівень втрат є однією з характерних ознак ефективної роботи електричних мереж, проте сам по собі не може бути достатнім критерієм оцінювання надійності електропостачання. Для комплексного оцінювання мереж зовнішнього електропостачання доцільно додатково враховувати показники аварійності, надійності, завантаження мережевих елементів, якості електроенергії та сезонної нерівномірності навантаження.

Важливо зазначити, що низький рівень втрат сам по собі не характеризує надійність електропостачання, оскільки показник не враховує тривалість перерв, частоту аварій, якість напруги та інші показники надійності електропостачання. World Bank безпосередньо зазначає це обмеження для відповідного міжнародного індикатора.

Аналіз структури та методів розрахунку втрат електроенергії показує, що в умовах України найбільший резерв зниження втрат зосереджений у двох напрямах: зменшення комерційних втрат та оптимізація технічних втрат (реконструкція застарілого обладнання, компенсація реактивної потужності, оптимізація схем і режимів роботи розподілених електричних мереж). Міжнародний досвід підтверджує ефективність комплексного підходу. Країни ЄС і США досягли відносно низьких рівнів втрат завдяки поєднанню сучасного обладнання, цифрових систем управління та жорсткого регулювання. У країнах Азії з високими втратами найбільший ефект дають програми масової заміни лічильників і боротьби з несанкціонованим споживанням.

Висновки. Системний розрахунок і аналіз втрат за деталізованою структурою з використанням адекватних методів є необхідною умовою для розроблення та реалізації ефективної програми зниження втрат електричної енергії в розподілених мережах зовнішнього електропостачання.

Урахування температурного режиму проводів є обов'язковою умовою підвищення точності розрахунку втрат електроенергії. Для умов України найбільш доцільною є адаптація підходів, регламентованих стандартами IEEE 738 і рекомендаціями CIGRE, у поєднанні з впровадженням систем динамічного рейтингу ліній і застосуванням чисельних методів моделювання.

Із позицій електротранспорту отримані результати аналізу в роботі мають принципове значення, оскільки втрати в мережах зовнішнього електропостачання безпосередньо впливають на загальну енергетичну ефективність систем електропостачання тягових підстанцій. Однак для порівняльного оцінювання систем електропостачання електрифікованого транспорту доцільно враховувати не лише рівень втрат електроенергії, а й тенденцію їх зміни, технічний стан мереж і відповідність мережевої інфраструктури характеру електричних навантажень.

Список використаних джерел

1. CIRED Working Group. (2015). Reduction of Technical and Non-Technical Losses in Distribution Networks. URL: https://www.cired.net/wp-content/uploads/2024/12/cired-wg-2015-2-losses-final-report.pdf

2. Manito, A., et al. (2019). Technical and non-technical losses calculation in distribution grids using a defined equivalent operational impedance. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Vol. 13, Iss. 8. P. 1315-1323. DOI: http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5334

3. IEEE Std 738-2023. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. https://standards.ieee.org/ieee/738/10207/

4. Семененко, О. І., Супрун, О. Д., Семененко, Ю. О., & Одєгов, М. М. (2018). Застосування активних фільтрів-стабілізаторів у розподіленій системі електропостачання. *Електрифікація транспорту*. 15, 61-67. DOI: https://doi.org/10.15802/etr.v0i15.155678

5. Семененко, О. І., Супрун, О. Д., Семененко, Ю. О., & Рудник, М. В. (2019). Електротехнічний комплекс з вітро-дизельною установкою гарантованого живлення для тягових підстанцій залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2 (135). 7-17. DOI: https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i2.164779

6. Відкриті дані Світового банку, що є цифровим інструментом для аналізу та візуалізації даних з різних аспектів глобального розвитку. URL: https://databank.worldbank.org/

7. Shcherbak, Y., Semenenko ,Y., Semenenko, O., Karpenko, N., Suprun, O., Plakhtii, O., & Nerubatskyi, V. (2021). Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, № 2 (110). 71-77. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229827

8. Eldeeb, H. H., Elsayed, A. T., Lashway, C. R., & Mohammed, O. (2019). Hybrid Energy Storage Sizing and Power Splitting Optimization for Plug-In Electric Vehicles, *IEEE Trans. Ind. Appl*. Vol. 55, No. 3. 2252-2262. URL: https://discovery.fiu.edu/display/pub87448

9. Wang, K., Hu, H., Chen, J., Zhu, J., Zhong, X., & He, Z. (2019). System-Level Dynamic Energy Consumption Evaluation for High-Speed Railway. *IEEE Trans. Transp. Electrif*. Vol. 5, No. 3. 745-757. DOI: http://doi.org/10.1109/TTE.2019.2934942

10. Міністерства енергетики та вугільної промисловості України (2012). *Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів* (Наказ № 91), 145. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0350-12#n11

11. Three Decades and Counting: A Historical Review and Current Assessment of Electric Utility Energy Efficiency Activity in the States. URL: http://www.aceee.org/research-report/u123

12. Міненерговугілля України. (2017). *Правила улаштування електроустановок*. Офіційне видання. 617. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf

13. IEEE Std 738-2023. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. URL: https://standards.ieee.org/ieee/738/10207/

14. СОУ МЕВ ЕЕ 40.1-00100227-01:2016. Стандарт операційної безпеки функціонування Об'єднаної енергетичної системи України. Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика. Ч. 1. Технічна політика у сфері побудови та експлуатації магістральних і міждержавних електричних мереж. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67243

15. СОУ-Н ЕЕ 05.839:2007. Норми часу на ремонт і технічне обслуговування електричних мереж. Т. 10. Пристрої релейного захисту і автоматики типових схем приєднань (ред. 2019 р.). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=87263

16. Державна адміністрація залізничного транспорту України (2013). *ЦЕ-0038. Інструкція про порядок відбудови пошкодженої контактної мережі електрифікованих залізниць*. (Наказ № 071-Ц/од).

17. American Council for an Energy-Efficient Economy. (2012). *ACEEE State Energy Policy Database*. URL: http://www.aceee.org/sector/state-policy

18. Three Decades and Counting: A Historical Review and Current Assessment of Electric Utility Energy Efficiency Activity in the States. (2012). URL: http://www.aceee.org/research-report/u123

References

1. CIRED Working Group. (2015). Reduction of Technical and Non-Technical Losses in Distribution Networks. https://www.cired.net/wp-content/uploads/2024/12/cired-wg-2015-2-losses-final-report.pdf [in English].

2. Manito, A., et al. (2019). Technical and non-technical losses calculation in distribution grids using a defined equivalent operational impedance. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13, 8, 1315-1323. http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5334 [in English].

3. IEEE Std 738-2023. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. https://standards.ieee.org/ieee/738/10207/ [in English].

4. Semenenko, O. I., Suprun, O. D., Semenenko, Y. O., Odegov, M. M. (2018). Application of active filter stabilizers in a distributed power supply system. *Electrification of transport*, 15, 61-67. https://doi.org/10.15802/etr.v0i15.155678 [in Ukrainian].

5. Semenenko, O. I., Suprun, O. D., Semenenko, Y. O., Rudnyk, M. V. (2019). Electrical complex with a wind-diesel installation of guaranteed power supply for railway traction substations. *Information and control systems in railway transport*, 2 (135), 7-17. https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i2.164779 [in Ukrainian].

6. World Bank open data, which is a digital tool for analyzing and visualizing data on various aspects of global development https://databank.worldbank.org/ [in English].

7. Shcherbak, Y., Semenenko, Y., Semenenko, O., Karpenko, N., Suprun, O., Plakhtii, O., Nerubatskyi, V. (2021). Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 2 (110), 71-77. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229827 [in English].

8. Eldeeb, H. H., Elsayed, A. T., Lashway, C. R., and Mohammed, O. (2019). Hybrid Energy Storage Sizing and Power Splitting Optimization for Plug-In Electric Vehicles, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 55, 3, 2252-2262. https://discovery.fiu.edu/display/pub87448 [in English].

9. Wang, K., Hu, H., Chen, J., Zhu, J., Zhong, X., and He, Z. (2019). System-Level Dynamic Energy Consumption Evaluation for High-Speed Railway. *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, 5, 3, 745-757. http://doi.org/10.1109/TTE.2019.2934942 [in English].

10. Approved by order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine (2012). *Pravyla tehnichnoi ekspluatazii elektroustanovok spojyvachiv* (Order No. 91), 145. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0350-12#n11 [in Ukrainian].

11. Three Decades and Counting: A Historical Review and Current Assessment of Electric Utility Energy Efficiency Activity in the States. http://www.aceee.org/research-report/u123 [in English].

12. Minenerhovuhillia Ukrainy (2017). *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok* [*Rules for the arrangement of electrical installations*]. Official publication. 617. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf [in Ukrainian].

13. IEEE Std 738-2023. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. https://standards.ieee.org/ieee/738/10207/ [in English].

14. SOU MEV EE 40.1-00100227-01:2016. Standart operaziynoi bespeky funkzionuvannya Ob`ednanoi energetychnoi systemy Ukrainy. Pobudova ta ekspluatazia elektrychnyh merej. Tehnichna polityka. Ch. 1. Tehnichna polityka u sferi pobudovy ta ekspluatazii magistralnyh i

mijderjavnyh elektrychnyh merej. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67243 [in Ukrainian].

15. SOU-N EE 05.839:2007. Normy chasu na remont i tehnichne obslugovuvannya elektrychnyh merej. T. 10. Prystroi releynogo zahystu i avtomatyky typovyh shem pryednan`. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=87263 [in Ukrainian].

16. Derjavna administratsiya zaliznychnogo transportu Ukrainy. CE-0038. *Instrukziya pro poryadok vidbudovy poschkodjenoi kontaktnoi mereji elektryfikovanyh zaliznyts*, (Order No. 071-Z/od) [in Ukrainian].

17. American Council for an Energy-Efficient Economy (2012). *ACEEE State Energy Policy Database*. http://www.aceee.org/sector/state-policy [in English].

18. Three Decades and Counting: A Historical Review and Current Assessment of Electric Utility Energy Efficiency Activity in the States. (2012) http://www.aceee.org/research-report/u123 [in English].

Семененко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-9422-3528. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua. Тел.: (057) 730-10-74.
Любарський Борис Григорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-2985-7345. E-mail: lboris1911@ukr.net.
Семененко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-8885-6783. E-mail: semenoi@i.ua.

Semenenko Yurii, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-9422-3528. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua. Tel.: (057) 730-10-74.
Liubarskyi Borys, Doctor of Technical Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Kharkiv, Ukraine.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2985-7345. E-mail: lboris1911@ukr.net.
Semenenko Oleksandr, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-8885-6783. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua.

Дата надходження статті: 28.07.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 07.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 629.42

УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ З ОРГАНІЗАЦІЇ СКЛАДСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, кандидати техн. наук О. О. Шапатіна, С. В. Михалків, асп. К. С. Бондаренко

DECISION MAKING ON THE ORGANIZATION OF LOCOMOTIVE DEPOT WAREHOUSE MANAGEMENT UNDER LIMITED INFORMATION

D. Sc. (Tech.) O. Krasheninin, PhD (Tech.) O. Shapatina, PhD (Tech.) S. Mykhalkiv, PhD student K. Bondarenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.372815

Анотація. *Статтю присвячено розв'язанню проблеми оптимізації управління складським господарством локомотивних депо в умовах дефіциту інформації та невизначеності щодо технічного стану рухомого складу. Для формалізації логістичних рішень про формування запасів агрегатів розроблено математичну модель, яка базована на методології теорії ігор і статистичних рішень. Оптимальний розмір оборотного фонду визначено за допомогою багатокритеріального аналізу, зокрема максимінного критерію, критерію мінімаксного ризику та критерію песимізму-оптимізму. Обґрунтовано алгоритм корегування стратегій постачання на основі теореми Байєса, який дає змогу перераховувати апостеріорні ймовірності виходу агрегатів із ладу після отримання додаткової інформації. Доведено економічну доцільність збору такої інформації за умови, що витрати на неї не перевищують розрахованого маржинального виграшу. Показано, що запропонований підхід має високий потенціал до інтеграції з технологіями цифрових двійників і системами предиктивної діагностики рухомого складу, що дає змогу в режимі реального часу автоматизувати ухвалення рішень про поповнення запасів локомотивного депо.*

Ключові слова: *депо, діагностування, запаси, імовірність, логістика, невизначеність, ризик, рішення, стратегія.*

Abstract. *This paper addresses the problem of optimizing inventory management and warehousing logistics for locomotive depots under conditions of information deficiency and uncertainty regarding the condition of rolling stock. As traditional planned-preventive maintenance strategies have exhausted their efficiency, organizing an effective repair infrastructure requires rational resource allocation and optimal stocking of critical units. To structure logistics decision-making processes for inventory formation, a mathematical model based on game theory and statistical decision-making has been developed. Determining the optimal size of the circulating stock for locomotive components is carried out using a multi-criteria analysis framework. The study employs the maximin criterion to guarantee a minimum payoff under worst-case scenarios, the minimax risk criterion to minimize maximum opportunity loss, and the pessimism-optimism criterion to formulate a balanced strategy. A significant contribution is the justification of an algorithm for dynamically adjusting supply strategies based on Bayes' theorem. This approach allows recalculating*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Крашенінін О. С., Шапатіна О. О.,
Михалків С. В., Бондаренко К. С., 2026.

a posteriori probabilities of component failures after receiving additional diagnostic information, treated as a new experiment. The economic feasibility of acquiring such information is proven, provided data collection costs do not exceed calculated marginal operational gains. The study emphasizes that despite the fundamental nature of classical mathematical optimization, global trends dictate a shift towards data-driven models and predictive maintenance. The proposed approach exhibits high potential for integration with digital twin technologies and predictive diagnostic systems. By linking game-theory matrices with real-time diagnostic data streams from digital twins, operators can dynamically update equipment probability states and automate operational decision-making for replenishing depot inventories. This integration mitigates part shortage risks, eliminates unnecessary stockpiling, and significantly enhances the economic efficiency and sustainability of the railway repair infrastructure.

Keywords: *decisions, depot, diagnostics, inventory, logistics, probability, risk, strategy, uncertainty.*

Вступ. Залізнична галузь функціонує в надзвичайно складних умовах втрати інфраструктурних ресурсів, неможливості повноцінної заміни тягового рухомого складу (ТРС), катастрофічного стану ремонтної бази і втрати людського ресурсу [1 – 3]. Стратегія планово-попереджувального підходу щодо організації ТО, ПР ТРС практично себе вичерпала, а запровадження стратегії утримання ТРС за технічним станом обмежене сучасною діагностичною базою як у ремонті, так і експлуатації [4]. Отже, експлуатація ТРС, який досяг або перевищив нормативний термін використання, потребує його модернізації і запровадження сервісу для ТО, ПР.

За таких умов пошук дієвих рішень про забезпечення стійкості ремонтної інфраструктури стає актуальним завданням для ухвалення обґрунтованих рішень. У цьому може допомогти використання теорії ігор, за положеннями якої обґрунтовують варіанти стратегії роботи складського господарства і надають необхідну додаткову інформацію для ухвалення правильних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачі оптимізації системи ТО, ПР ТРС розглянуто в багатьох дослідженнях вітчизняних і закордонних учених [4, 5]. Характер цих досліджень спрямований на обґрунтування періодичності і циклічності ТО, ПР. Загалом ці дослідження стосувалися оптимізації планово-попереджувальної системи ремонту, яка довгий час була основною для залізничного транспорту. Але з часом виникла необхідність шукати нові шляхи удосконалення роботи ремонтної галузі залізничного транспорту. Так, у публікаціях [6, 7] звертали увагу на необхідність удосконалювати систему ремонту за рахунок використання методів контролю і діагностування, які можна використовувати як на ТРС, так і в ремонтній галузі. Ці роботи були направлені не тільки на наукове обґрунтування стратегій ремонту, але й обґрунтування тактики ремонту через упровадження сучасних діагностичних приладів і комплексів [5, 8]. У низці досліджень розглянуто питання оцінювання ефективності експлуатації ТРС за критерієм життєвого циклу [6, 8]. Відповідно до цього напряму були розвинуті принципи оцінювання і обґрунтування доцільності проведення понаднормативної експлуатації ТРС з урахуванням корегування обсягів ТО, ПР і міжремонтних пробігів. У ремонті стабільно застосовують крупно-агрегатний метод ремонту, ефективність якого визначена зменшенням часу простою в ремонті, можливістю скорочення експлуатаційного парку ТРС з урахуванням необхідності обґрунтування оптимальної величини запасів агрегатів і вузлів ТРС. В умовах дефіциту виробничих потужностей ремонтної інфраструктури локомотивних

депо і відповідно можливості формування запасів агрегатів і вузлів виникає задача раціонального використання наявних ресурсів. Використання математичних методів для розв'язання цих задач дає змогу управляти логістикою складського господарства.

Незважаючи на те, що класичні підходи щодо оптимізації системи ТО і ПР рухомого складу залишаються фундаментальними, сучасні світові тенденції потребують переходу до предиктивного обслуговування та управління запасами на основі даних data-driven моделей. Зокрема, у новітніх дослідженнях значну увагу приділяють розробленню інтегрованих систем підтримки ухвалення рішень для управління запасами запасних частин та оптимізації просторової складської логістики в умовах невизначеності [9 – 11]. Провідним трендом стає використання технології цифрових двійників для моніторингу технічного стану механічних вузлів і предиктивної аналітики їхнього зносу [12]. Доведено, що спільна оптимізація моделювання деградації обладнання та планування запасних частин допомагає суттєво знизити ризики дефіциту [13]. Крім того, для динамічного оцінювання невизначеностей у ланцюгах постачання все частіше застосовують стохастичні методи та байєсівські мережі [14, 15]. Це підтверджує доцільність використання теореми Байєса та ігрових підходів для гнучкого корегування стратегій складського господарства депо за результатами безперервного діагностування технічного стану механічних вузлів тягового рухомого складу.

Визначення мета та завдання дослідження. Мета статті полягає в розробленні методики ухвалення рішень в умовах обмеження інформації для організації та вибору стратегій створення запасів агрегатів для ремонтного господарства.

Відповідно до цього поставлено такі завдання:

– формалізувати процес ухвалення логістичних рішень про створення запасів агрегатів методами теорії ігор;

– визначити оптимальний запас агрегатів для функціонування ремонтного господарства депо за критеріями ризику та невизначеності;

– оцінити стратегію використання запасів агрегатів для отримання додаткової інформації на основі теореми Байєса;

– обґрунтувати перспективи інтеграції розробленої математичної моделі із сучасними системами предиктивної діагностики і технологіями цифрових двійників тягового рухомого складу.

Основна частина дослідження. Дефіцит інформації є найбільш характерною ситуацією для ухвалення рішень, особливо оцінювання майбутніх станів системи забезпечення ремонтним фондом ремонтного господарства [6, 8]. Один із методів ухвалення рішень у цих ситуаціях ґрунтований на правилах теорії ігор і статистичних рішень, які регламентують можливі варіанти (стратегії) дії сторін, що беруть участь у грі; наявність і обсяг інформації кожної сторони про поведінку іншої; результат гри, до якого призводить певна стратегія.

Сторонами у грі є конкуруючі супротивники A і B або сторони A і $П$ – «природа». Стратегія – це сукупність правил, що пропонують певні дії залежно від ситуації, що склалися під час гри.

Кожному сполученню стратегій відповідає певний результат – виграш, що має знак «+» (прибуток) або знак «–» (збиток). Можливі стратегії і їхні результати записують у платіжній матриці (табл. 1).

Нижня ціна гри, або максимальний виграш,

$$\alpha = \max_i \alpha_i = \max_i \min_j a_{ij}. \qquad (1)$$

Найгірші умови для сторони B – це максимальні значення a_{ij} для кожної з вибраних стратегій: $\beta = \max_i \alpha_i$, які

фіксують у нижньому рядку табл. 1. Вибравши з ряду таку стратегію, за якої β_i буде мінімальним, сторона B у кожному разі програє не більше $\beta = \min_j \beta_i$.

Таблиця 1

Платіжна матриця

Стратегія сторони A	Стратегія сторони B				Максимальний виграш за стратегіями (мінімум за рядками) a_i
	B_1	B_2	…….	B_m	
A_1……..	a_{11}	a_{12}	…	a_{1m}	α_1
A_2……..	a_{21}	a_{22}	…	a_{2m}	α_2
…….....	…	…	…	…	…
A_m…….	a_{n1}	a_{n2}	…	a_{nm}	α_n
Максимальний виграш за стратегіями (мінімум за стовпчиками)	β_1	β_2	…	βn	–

Верхня ціна гри, тобто мінімальний виграш, або мінімакс,

$$\beta = \min_j \beta_i = \min_j \max_i \beta_{ij}. \qquad (2)$$

Розглянемо формування раціонального запасу агрегатів на складі. На підставі звітних даних встановлено, що щодня для ремонту потрібно не більше чотирьох агрегатів, причому імовірність того, що агрегати не будуть потрібні для ремонту протягом зміни, дорівнює 0,1; буде потрібний один агрегат – 0,4; два – 0,3; три – 0,1 і чотири – 0,1. Зазначені імовірності можна розглядати як імовірності реалізації стратегій сторони *П*, причому перша стратегія $П_1$ полягає в тому, що фактично буде потрібно для ремонту 0 агрегатів, друга стратегія $П_2$ – один агрегат, третя стратегія $П_3$ – два агрегати, четверта $П_4$ – три агрегати, п'ята $П_5$ – чотири агрегати.

Для формування на складі запасу можна застосувати такі стратегії: A_1 – не мати запасу, A_2 – мати один агрегат у запасі; A_3 – мати два агрегати; A_4 – мати три агрегати, A_5 – мати чотири агрегати, а через те що потреба більше чотирьох агрегатів за зміну не була зафіксована, подальше збільшення запасів апріорі недоцільно. Такий дискретний підхід щодо формування стратегій управління запасами корелює із сучасними моделями просторового розподілу деталей, зокрема інвентаризаційною політикою (r, Q), за якої також шукають баланс між мінімізацією витрат на зберігання та недопущенням дефіциту критичних вузлів [11].

Кожній комбінації A_i і $П_j$ стратегій відповідають виграші a_{ij}, які розраховують у цьому випадку для сторони *A* за таких умов: зберігання одного незатребуваного агрегату оцінюють як збиток в одну умовну одиницю (–1); задоволення потреби в одному агрегаті –прибуток у дві одиниці (+2); відсутність необхідного агрегату - збиток у три одиниці (–3).

Забезпечення потреби в агрегатах пов'язане зі скороченням простоїв ТРС у

ремонті, що дає прибуток ремонтному цеху [4, 5].

У табл. 2 наведена платіжна матриця, складена за прийнятими умовами з формуванням запасів агрегатів.

Таблиця 2

Платіжна матриця – таблиця виграшів для комбінацій усіх можливих стратегій

Стратегія A_i	Кількість агрегатів n_i	Необхідна кількість агрегатів n_j для стратегій $П_j$					Мінімальний виграш за стратегіями (мінімуми рядків) α_i
		$П_1$	$П_2$	$П_3$	$П_4$	$П_5$	
		0	1	2	3	4	
A_1	0	0	-3	-6	-9	-12	-12
A_2	1	-1	2	-1	-4	-7	-7
A_3	2	-2	1	4	1	-2	-2
A_4	3	-3	0	3	6	3	-3
A_5	4	-4	-1	2	5	8	-4
Максимальний виграш (максимуми стовпчиків) β_j		0	2	4	6	8	3,4

Так, для комбінації стратегій A_2 і $П_4$ (за потреби трьох на складі є один агрегат) виграш складе $a_{24}=1\times2-2\times3$ (дві заявки не задоволені) $=2-6=-4$. Для комбінації стратегій A_4 і $П_2$ (необхідний для заміни один агрегат, на складі є три) виграш складе $a_{42}=1\times2$ (одна вимога задоволена) -2×1 (два агрегати не затребувані)=2–2=0 тощо.

Для відомих імовірностей кожного стану $П_j$ вибирають стратегію A_i, за якої математичне сподівання виграшу буде максимальним (табл. 3). Для цього обчислюють середній виграш за кожним рядком для i-ї стратегії $\overline{a_i} = q_1 a_{i1} + q_2 a_{i2} + \ldots + q_n a_{in} = \sum_{j=1}^{n} q_j a_{ij}$.

Таблиця 3

Матриця виграшів

Стратегія сторони A	$П_1$ (n_1=0)	$П_2$ (n_2=0)	$П_3$ (n_3=0)	$П_4$ (n_4=0)	$П_5$ (n_5=0)	Середній виграш стратегії за різних імовірностей станів		
A_1(n_1=0)	0	- 1,2	- 1,8	- 0,9	- 1,2	- 5,1	-6	-3,99
A_2(n_2=1)	- 0,1	0,8	- 0,3	- 0,4	- 0,7	- 0,7	2,2	-0,97
A_3(n_3=2)	- 0,2	0,4	1,2	0,1	- 0,2	1,3	0,4	0,37
A_4(n_4=3)	- 0,3	0	0,9	0,6	0,3	1,5	1,8	0,57
A_5(n_5=4)	- 0,4	- 0,4	0,6	0,5	0,8	1,1	2,0	-0,01
Імовірності станів q_j	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1	–		
Імовірності станів, за Лапласом	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2			
Імовірності станів, за оцінками експертів	0,33	0,28	0,19	0,13	0,07			

Максимальне значення a_0 відповідає оптимальній стратегії.

Із табл. 3, у якій наведені результати розрахунків виграшу для різної комбінації стратегій A_i і станів $П_j$, випливає, що оптимальною є четверта стратегія A_4^0, яка зведена до створення оборотного фонду в три агрегати ($n_4^0 = 3$).

Оскільки розрахунки проведені тільки на основі імовірностей без урахування економічних наслідків, це дає середньозважену кількість агрегатів, що витрачають за зміну, яке дорівнює $\overline{n_j} = \sum_{j=1}^{n} q_j n_j$, або $\overline{n_5} = 0{,}1 \times 0 + 0{,}4 \times 1 + 0{,}3 \times 2 + 0{,}1 \times 3 + 0{,}1 \times 4 = 1{,}7$, що нижче за оптимальний запас. Економічна ефективність застосування оптимальної стратегії

$$E = 100\frac{\overline{a_0} - \overline{a_c}}{\overline{a_0}}, \qquad (3)$$

де $\overline{a_0}$ – виграш для оптимальної стратегії (мати на складі три агрегати – табл. 3);

$\overline{a_c}$ – те саме для середньозваженої потреби.

Для $\overline{n_5} = 1{,}7 \approx 2$ агрегати (табл. 3), звідки $E = 13{,}3\%$.

На рис. 1 зображено графіки визначення оптимального запасу агрегатів ігровими методами.

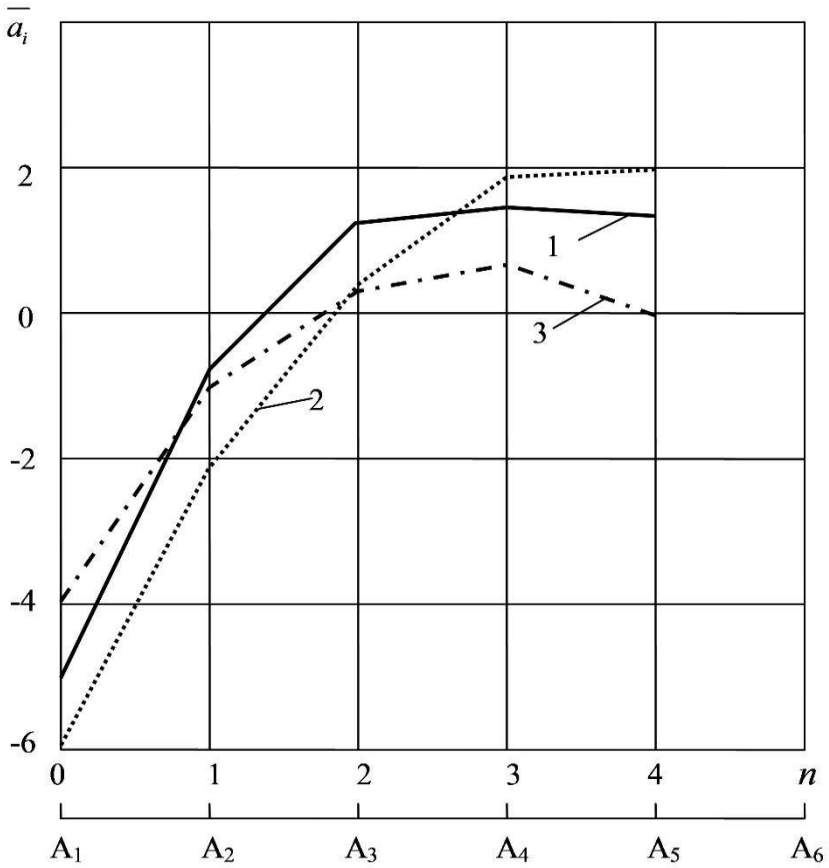


Рис. 1. Визначення оптимального запасу агрегатів ігровими методами:
1 – за наявності інформації про імовірності станів; 2 – за рівних імовірностей;
3 – для експертної оцінки; A_1 ..A_i - стратегії; n – кількість агрегатів;
a_i – середній виграш для стратегії

Як видно з рис. 1, недоцільним є і надмірне збільшення оборотного фонду. При цьому зазначимо, що стратегія A_4 є оптимальною для багаторазового її застосування, тобто в середньому для повторюваних ситуацій. Для разових реалізацій вона може бути і неоптимальною. Наприклад, для $П_1$ вона призводить до збитку -0,3, а для $П_2$ прибуток буде менший, ніж за використання стратегії A_5.

Із рис. 1 і табл. 3 випливає, що є досить широка зона ухвалення рішень, де гарантовано роботу без збитків. Ця зона включає стратегії A_3, A_4, A_5 (тобто необхідно мати на складі два-чотири агрегати). Крім того, ігровий підхід можливий для вирішення завдань про методи ремонту ТРС (стратегії A_j) залежно від технічного стану ($П_j$), вибору методів поліпшення виробничої бази залежно від зовнішніх умов (зміна обсягу перевезень), визначення кількості ТО, ПР ТРС тощо.

Для невідомих імовірностей стану $П_j$ можливі кілька способів, що зведені до тієї або іншої оцінки невідомих імовірностей. Найбільш простий спосіб – це принцип недостатнього обґрунтування Лапласа, для якого відсутність інформації про майбутні стани природи дає змогу вважати їх рівно-імовірними. Відповідно до цього принципу, жодному зі станів природи не віддають перевагу і призначають рівну імовірність, тобто $q_1 = q_2 = q_3 = \ldots = q_n = 1/n$ для всіх станів; для визначення оптимального запасу агрегатів для $n_j = 4$ усі ймовірності приймають рівними 0,2. При цьому оптимальною стане стратегія A_5, тобто необхідно мати в обороті в середньому не три, а чотири агрегати (рис. 1).

Отже, відсутність інформації про розподіл дійсної потреби в агрегатах для ремонту коштує утримання додаткового агрегату в обороті, що відповідає втраті 27 % виграшу (1,1 замість 1,5 для оптимальної стратегії і відомих імовірностей станів $П$ – табл. 3). Якщо інформація про імовірність станів $П_j$ відсутня, то події на основі раніше накопиченого досвіду можуть бути ранжировані, тобто розташовані в порядку убування (або зростання), наприклад, із використанням експертного методу. Використання експертних оцінок в умовах жорсткої невизначеності та відсутності статистики є базовим етапом, який у складніших сучасних логістичних системах може бути доповнений марковськими процесами ухвалення рішень для оптимізації запасів [15].

Перед експертами завдання сформульовано так: у депо змінна потреба заміни конкретного агрегату може бути $П_1 = 0$, $П_2 = 1$, $П_3 = 2$, $П_4 = 3$ і $П_5 = 4$ (стратегії «природи»). Необхідно ранжирувати ці потреби. Подія (змінна потреба в n_j агрегатах), що має, на думку експерта, найбільшу імовірність q_{ie}, одержує ранг (місце) $M = 1$, далі 2, 3 тощо. Імовірність стану, що зайняв перше місце, $q_{1м} =$ 0,33; друге – $q_{2м} =$ 0,28; третє – $q_{3м} =$ 0,19; четверте – $q_{4м} =$ 0,13; п’яте – $q_{iм} =$ 0,07.

Далі для значень q_{ie} розрахунки проводять за методикою ухвалення рішень в умовах ризику. Якщо імовірності стану системи $П_j$ не можуть бути визначені або оцінені, то ухвалюють спеціальні критерії: максимінний, мінімаксний і проміжний. Максимінний критерій K_I забезпечує вибір стратегії A_i, за якої в будь-яких умовах гарантований виграш, не менший за максимінний.

Для визначення такої стратегії за платіжною матрицею (табл. 2) визначають для кожної стратегії A_i мінімальний виграш α_i, тобто $\alpha_i = \min_j \alpha_{ij}$. Вибирають ту стратегію, за якої мінімальний виграш буде найбільшим.

Такою стратегією є стратегія A_3 (мати на складі два агрегати), для якої принцип максиміна забезпечує, в умовах відсутності інформації про стан «природи», гарантію від надзвичайних більших втрат. Для цієї стратегії ефект буде на 13,3 % нижче, ніж для оптимальної стратегії і наявності інформації за ймовірностями стратегії «природи».

Отже, максимінний критерій заснований на найбільш песимістичній оцінці можливих виробничих ситуацій і гарантує організаторам виробництва виграш не менше K_I. Мінімаксний критерій K_{II} забезпечує вибір такої стратегії, за якої ризик r_{ij} буде мінімальним у найбільш несприятливих виробничих умовах

$$K_{II} = \min_i \max_j r_{ij} \ . \qquad (4)$$

Мінімізація ризиків та операційних витрат в умовах несприятливих ситуацій, зокрема під час збоїв у ланцюгах постачання чи ремонтів, є критично важливою для залізничної галузі, що підтверджено створенням новітніх інженерних систем підтримки ухвалення рішень із використанням штучного інтелекту [9].

Для визначення ризику організаторів виробництва (сторона A) із застосуванням стратегії A_i, за платіжною матрицею (табл. 2) розраховують виграш a_{ij} за заздалегідь відомим стороні A станом «природи» $П_j$. Так, якщо відомо, що у відповідну зміну потрібен для ремонту один агрегат ($П_2$), то найбільший виграш депо буде отриманий, якщо на складі є саме один агрегат (A_2), тобто $a_{22} = (\beta_i)max$. Далі визначають ризик r_{ij}, тобто різницю між максимальним виграшем за відомого стану «природи» і використання оптимальної стратегії і невідомого стану «природи», коли можуть бути застосовані інші стратегії A_i: $r_{ij} = (\beta_i)\, max - a_{ij}$.

Отримані дані зведені до матриці розрахунку ризику (табл. 4), у якій для кожної стратегії A_i визначено максимальний ризик (передостанній стовпець у матриці ризику).

Таблиця 4

Матриця розрахунку ризику

Стратегія сторони A	Стратегія сторони $П$					Максимум ризику для A_i, r_{ij}	Середній ризик r_i
	$П_1$	$П_2$	$П_3$	$П_4$	$П_5$		
A_1	0	5	10	15	20	20	8,5
A_2	1	0	5	10	15	15	4,1
A_3	2	1	0	5	10	10	2,1
A_4	3	2	1	0	5	5	1,9
A_5	4	3	2	1	0	4	2,3
β_i	0	2	4	6	8	–	–

Із усіх стратегій організації виробництва вибираємо ту, яка забезпечує мінімальне значення максимального ризику. Такою стратегією є A_5, за якої необхідно мати на складі чотири агрегати для $K_{II} = 4$.

За мінімаксної стратегії ризик буде мінімальним у найбільш несприятливих умовах.

Критерій песимізму-оптимізму орієнтований на вибір проміжної стратегії

$$K_{III} = \max_i \left[d \min_j a_{ij} + (1-d) \max_j a_{ij} \right]. \qquad (5)$$

Коефіцієнт ($0 \leq d \leq 1$) встановлено на підставі досвіду або експертизи.

Для розрахунків проміжного критерію із платіжної матриці (табл. 2) для кожної стратегії A_i вибирають $\min a_{ij}$ і $\max a_{ij}$, наприклад для стратегії A_4 це відповідно 3 і 6 (табл. 5).

Таблиця 5

Визначення і значення критерію K_{III}

A_i	$\min a_{ij}$	$\max a_{ij}$	K_{III}	
			для $d = 0{,}3$	для $d = 0{,}7$
A_1	-12	0	-3,6	-8,4
A_2	-7	2	-0,7	-4,3
A_3	-2	4	2,2	-0,2
A_4	-3	6	3,3	-0,3
A_5	-4	8	4,2	-0,4

Порівняння вибраних різними методами стратегій (рис. 1) показує, що в умовах невизначеності, застосовуючи відповідні методи і критерії, можна виявити стратегії, достатньо близькі до оптимальних. Так, усі три вибрані стратегії – A_3, A_4^0, A_5 (мати в запасі два, три, чотири агрегати) – забезпечують позитивний, хоча і нерівноцінний виграш.

Отже, отримання інформації, навіть мінімальної, про стани системи значно збільшує надійність ухвалених рішень. Тому в умовах невизначеності порушують питання про доцільність одержання додаткової інформації про стан системи в умовах невизначеності.

Доцільність збору додаткової інформації в загальному виді визначено співвідношенням вартості одержання інформації і тим додатковим виграшем, який може бути отриманий з ухваленням рішення з урахуванням отриманої інформації. У сучасній парадигмі управління запасами [10] збір такої інформації здійснюваний автоматизовано, що значно знижує «вартість експерименту» і підвищує ефективність системи. Можна розглянути три характерних випадки: після одиничного експерименту ситуація повністю з'ясована (ідеальний експеримент), після одиничного експерименту ситуація з'ясована частково, необхідно кілька експериментів. Якщо апріорні імовірності стану системи $П$ відомі і дорівнюють $q_1, q_2, \ldots, q_n$, то оптимальною без проведення експерименту є стратегія, що забезпечує максимізацію середнього виграшу, що дорівнює b_1. Якщо експеримент однозначно визначає стан $П_1$, то природно вибирати стратегію з максимальним значенням a_{ij}, тобто $\beta_j = \max_i a_{ij}$.

Отже, середній виграш після проведення експерименту становитиме

$$b_e = q_1\beta_1 + q_2\beta_2 + \ldots + q_n\beta_n = \sum_{j=1}^{n} q_j\beta_j.$$

І умова доцільності проведення експерименту запишемо як

$$max[q_1a_{i1} + q_2a_{i2} + \ldots + q_na_{in}] < q_1\beta_1 + q_2\beta_2 + \ldots + q_n\beta_n - c,$$

де c – вартість експерименту.

Максимальний виграш без проведення експерименту, як видно з табл. 3, буде $b_1 = 1{,}5$ ($A_0 = A_4$), а максимальні значення β_j за відповідних умов $П_j$ наведені в нижньому рядку табл. 4 (це відповідно 0, 2, 4, 6 і 8).

Виграш для експерименту і вихідних даних по q_i $b_e = 0 \cdot 0{,}1 + 2 \cdot 0{,}4 + 4 \cdot 0{,}3 + 6 \cdot 0{,}1 + 8 \cdot 0{,}1 = 3{,}4$.

Отже, вартість експерименту має бути не більше $c < (b_e - b_1) = 3{,}4 - 1{,}5 = 1{,}9$ од., у яких визначають виграш або збиток (грн, бали). Якщо вартість експерименту перевищить це граничне значення, то такий експеримент економічно недоцільний.

Доцільно використовувати таке правило проведення експерименту: для відомих вихідних імовірностей станів $c < min\left[\sum q_j(\beta_j - a_{ij})\right]$, або $c < \min_i \overline{r_i}$, де $\overline{r_i}$ – середнє значення ризику для стратегії A, тобто експеримент проводять у тому випадку, якщо його вартість менше від вартості мінімального ризику.

У табл. 4 для прикладу з визначенням запасу наведені середні значення ризику для кожної стратегії. Мінімальне значення середнього ризику відповідає стратегії A_4 і дорівнює $\overline{r_i}$ = 1,9. Якщо вартість експерименту перевищує ці граничні значення $\overline{r_i}$, то або розглядають можливість скорочення вартості експерименту, або експеримент не проводять, і потрібно дотримуватися стратегії, що забезпечує мінімізацію вартості середнього ризику (табл. 4), тобто в цьому випадку – забезпечення на складі депо трьох агрегатів (A_4^0).

Якщо після експерименту ситуація з'ясована лише частково, то для визначення апостеріорних імовірностей необхідно використати теорему Байєса. Як і в першому випадку, апріорні імовірності станів системи дорівнюють q_i. Далі проводять експеримент, що дає певні результати (симптоми) B_1, B_2, …, B_m, умовна імовірність яких залежить від того, у яких умовах $П_j$ цей експеримент проводили $P(B_m/П_j)$. При цьому апріорні імовірності характеризують стан системи в цілому за певний час, а апостеріорні імовірності $q(П_j/B_m)$ визначають для конкретної події за теоремою Байєса:

$$q\left(П_j/B_m\right) = \frac{P\left(B_m/П_j\right)q_j}{\sum_{j=1}^{n} q_j P\left(B_m/П_j\right)}. \qquad (6)$$

Слід зазначити, що класичний байєсівський підхід сьогодні слугує математичним ядром для побудови складних симуляційних байєсівських мереж, які допомагають динамічно моделювати безпекову політику запасів у міжнародних транспортних мережах [14].

Числові значення умовних імовірностей подій $P\left(B_m/П_j\right)$ сформовано за результатами аналізу статистичних даних експлуатаційної надійності агрегатів та експертних оцінок фахівців локомотивного депо [7, 8]. У перспективі ці ймовірності можна динамічно уточнювати завдяки впровадженню систем безперервного моніторингу технічного стану та інтеграції data-driven моделей цифрових двійників у процеси предиктивного обслуговування [12, 13]. Умовні імовірності подій $P\left(B_m/\Pi_j\right)$ наведено в табл. 6, причому від B_1 до B_4 рівень технічного стану агрегату погіршується.

Таблиця 6

Матриця умовних імовірностей

Результати експерименту	Умови експерименту					
	$П_1/n_1 = 0$	$П_2/n_2 = 1$	$П_3/n_3 = 2$	$П_4/n_4 = 3$	$П_5/n_5 = 4$	$\sum q\left(П_j/B_m\right)$
B_1	0,5/0,25	0,3/0,6	0,1/0,15	0/0	0/0	/1
B_2	0,3/0,136	0,3/0,545	0,2/0,273	0,1/0,045	0/0	/1
B_3	0,2/0,077	0,2/0,308	0,3/0,346	0,4/0,15	0,3/0,115	/1
B_4	0/0	0,2/0,25	0,4/0,375	0,5/0,156	0,7/0,219	/1
Σ	1/	1/	1/	1/	1/	
q_j	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1	

Для формування запасів агрегатів як B_m можуть бути прийняті параметри технічного стану агрегату. Природно, що наслідком погіршення середнього рівня цих параметрів буде зміна потреби в ремонті і, відповідно, оборотних агрегатах. Якщо в результаті експерименту зафіксована подія B_1 (задовільний технічний стан агрегату), то апостеріорні імовірності за формулою (6) і з урахуванням даних табл. 6 визначають так:

– для події B_1 : $q(П_1/B_1) = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}1}{0{,}5 \cdot 0{,}1 + 0{,}3 \cdot 0{,}4 + 0{,}1 \cdot 0{,}3} = 0{,}25$; $q(П_2/B_1) = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}4}{0{,}2} = 0{,}6$; $q(П_3/B_1) = \frac{0{,}1 \cdot 0{,}3}{0{,}2} = 0{,}15$; $q(П_4/B_1) = 0$; $q(П_5/B_1) = 0$;

– для події B_2: $q(П_1/B_2) = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}1}{0{,}3 \cdot 0{,}1 + 0{,}3 \cdot 0{,}4 + 0{,}2 \cdot 0{,}3 + 0{,}1 \cdot 0{,}1} = 0{,}136$; $q(П_2/B_2) = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}4}{0{,}22} = 0{,}545$; $q(П_3/B_2) = \frac{0{,}2 \cdot 0{,}3}{0{,}22} = 0{,}273$; $q(П_4/B_2) = \frac{0{,}1 \cdot 0{,}1}{0{,}22} = 0{,}045$; $q(П_5/B_2) = 0$;

– для події B_3: $q(П_1/B_3) = \frac{0{,}2 \cdot 0{,}1}{0{,}2 \cdot 0{,}1 + 0{,}2 \cdot 0{,}4 + 0{,}3 \cdot 0{,}3 + 0{,}4 \cdot 0{,}1 + 0{,}3 \cdot 0{,}1} = 0{,}077$; $q(П_2/B_3) = \frac{0{,}2 \cdot 0{,}4}{0{,}26} = 0{,}308$; $q(П_3/B_3) = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}3}{0{,}26} = 0{,}346$; $q(П_4/B_3) = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}1}{0{,}26} = 0{,}154$; $q(П_5/B_3) = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}1}{0{,}26} = 0{,}115$;

– для події B_4: $q(П_1/B_4) = \frac{0 \cdot 0{,}1}{0 \cdot 0{,}1 + 0{,}2 \cdot 0{,}4 + 0{,}4 \cdot 0{,}3 + 0{,}5 \cdot 0{,}1 + 0{,}7 \cdot 0{,}1} = 0$; $q(П_2/B_4) = \frac{0{,}2 \cdot 0{,}4}{0{,}32} = 0{,}25$; $q(П_3/B_4) = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}3}{0{,}32} = 0{,}375$; $q(П_4/B_4) = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}1}{0{,}32} = 0{,}156$; $q(П_5/B_4) = \frac{0{,}7 \cdot 0{,}1}{0{,}32} = 0{,}219$.

На рис. 2 з урахуванням отриманих апостеріорних імовірностей наведена зміна розміру виграшів для різних стратегій. Зміна апостеріорних імовірностей призводить до відповідної зміни і оптимальних стратегій, за яких досягають максимізації виграшу. Наприклад, якщо експеримент дає результат B_1 (в експлуатації перебувають відносно надійні агрегати), то оптимальною є стратегія A_2 (1 на рис. 2), що передбачає наявність на складі тільки одного агрегату замість трьох, за відсутності експерименту – стратегія A_3 (2 на рис. 2). Якщо результатом експерименту є B_4 (в експлуатації ненадійні агрегати), то оптимальною є стратегія A_5 (чотири агрегати на складі) (табл. 7).

Отже, під час проведення експерименту ухвалюють такі рішення (табл. 8): 1) якщо в результаті експерименту отримано результат B_1, то вибирають стратегію A_2; 2) для B_2 – A_3; 3) для B_3 – A_4; 4) для B_4 – A_5.

Використовуючи це правило, середній виграш складе b_e = 2,14, або на 33 % більше, ніж максимальний виграш для стратегії, що вибрана за апріорними імовірностями, тобто без експерименту (1,5 у табл. 3).

Отже, додатковий прибуток для проведення експерименту складе 0,5 од. (2,14 – 1,5 = 0,64). Тобто якщо вартість експерименту менше 0,64 од., то організація подібного експерименту економічно виправдана. Для $c > 0{,}64$ необхідно постійно дотримуватися стратегії A_4. Для заповнення табл. 8 були додатково проведені розрахунки, які наведені в табл. 9, 10.

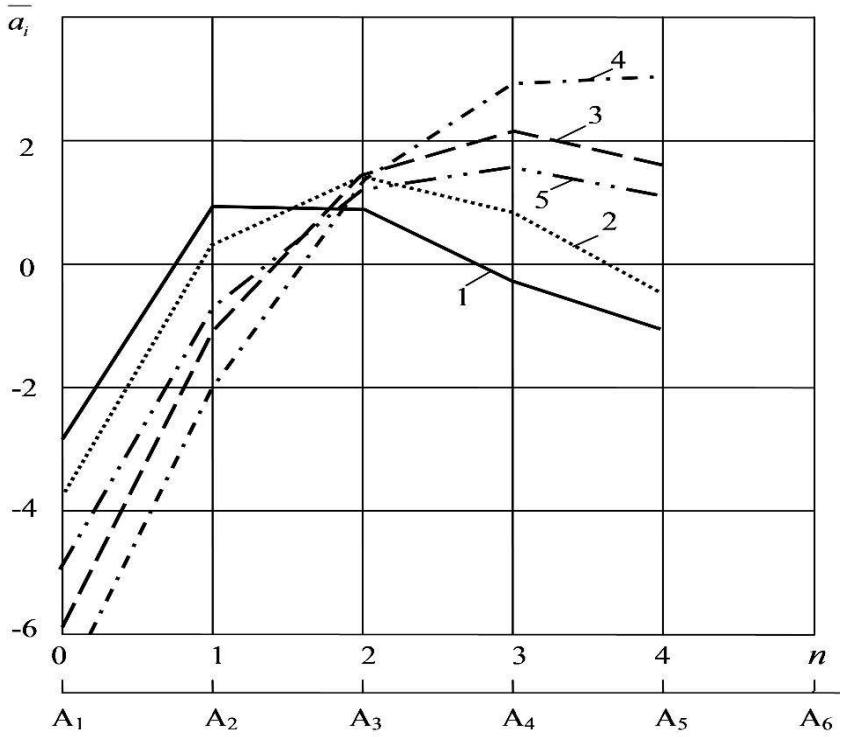


Рис. 2. Визначення оптимальної стратегії під час проведення експерименту:
n – кількість агрегатів; A_1–A_i - стратегії; a_i – виграш; 1 – B_1; 2 – B_2; 3 – B_3; 4 – B_4;
5 – без експерименту

Таблиця 7

Матриця виграшів із урахуванням апостеріорних імовірностей

$П_j$	$П_1$	$П_2$	$П_3$	$П_4$	$П_5$	Середні витрати $\bar{a}_i$
1	2	3	4	5	6	7
A_1	0	-3	-6	-9	-12	$\bar{a}_1$
A_1/B_1	0	-1,8	-0,9	0	0	-2,7
A_1/B_2	0	-1,635	-1,638	-0,405	0	-3,678
A_1/B_3	0	-0,924	-2,076	-1,386	-1,38	-5,766
A_1/B_4	0	-0,75	-2,25	-1,404	-2,628	-7,032
A_2	-1	2	-1	-4	-7	$\bar{a}_2$
A_2/B_1	-0,25	1,2	-0,15	0	0	0,8
A_2/B_2	-0,136	1,09	-0,273	-0,18	0	0,5
A_2/B_3	-0,077	0,616	-0,346	-0,616	-0,805	-1,228
A_2/B_4	0	0,5	-0,375	-0,624	-1,533	-2,03
A_3	-2	1	4	1	-2	$\bar{a}_3$
A_3/B_1	-0,5	0,6	0,6	0	0	0,7
A_3/B_2	-0,272	0,545	1,092	0,045	0	1,41
A_3/B_3	-0,154	0,308	1,384	0,154	-0,23	1,462
A_3/B_4	0	0,25	1,5	0,156	-0,438	1,468

Продовження табл. 7

1	2	3	4	5	6	7
A_4	-3	0	3	6	3	$\bar{a}_4$
A_4/B_1	-0,75	0	0,45	0	0	-0,3
A_4/B_2	-0,408	0	0,819	0,27	0	0,681
A_4/B_3	-0,231	0	1,023	0,924	0,345	2,06
A_4/B_4	0	0	1,125	0,936	0,657	2,718
A_5	-4	-1	2	5	8	$\bar{a}_5$
A_5/B_1	-1	-0,6	0,45	0	0	-1,15
A_5/B_2	-0,544	-0,545	0,546	0,225	0	-0,318
A_5/B_3	-0,308	-0,308	0,692	0,77	0,92	1,766
A_5/B_4	0	-0,25	0,75	0,78	1,252	3,03

Таблиця 8

Правила ухвалення рішень

Результати експери-ментів	Оптималь-не рішення	Виграш за оптимальної стратегії	Додатковий виграш	Сумар-ний виграш	Імовір-ність ухвалення рішень	Повний серед-ній виграш
За відсутності експерименту						
Ні	Завжди A_4^0	1,5	Ні		1,0	-
Для проведення експерименту						
B_1	A_2	0,8	1,0	1,8	0,14	0,112
B_2	A_3	1,41	1,04	2,45	0,19	0,268
B_3	A_4	2,06	1,78	3,84	0,3	0,618
B_4	A_5	3,03	1,66	4,69	0,37	1,12
Усього					1,0	2,14

Таблиця 9

Визначення виграшу для оптимальної стратегії

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
B_1	-2,7	0,8	0,7	-0,3	-1,15
B_2	-3,68	0,5	1,41	0,681	-0,318
B_3	-5,77	-1,23	1,462	2,06	1,17
B_4	-7,03	-2,03	1,468	2,718	3,03

Таблиця 10

Оцінювання додаткового виграшу та ймовірності ухвалення рішень

	$П_1$	$П_2$	$П_3$	$П_4$	$П_5$	B_{cp}	P_{ij}
β_i	0	2	4	6	8		
$A(П_j/\beta_1)$	0	1,2	0,6	0	0	1,8	0,14
$A(П_j/\beta_2)$	0	1,09	1,098	0,27	0	2,45	0,19
$A(П_j/\beta_3)$	0	0,616	1,384	0,924	0,92	3,84	0,30
$A(П_j/\beta_4)$	0	0,5	1,5	0,936	1,752	4,69	0,37

Експеримент допомагає не тільки збільшити виграш, але і відкорегувати технологічні рішення. Так, імовірності необхідної кількості агрегатів на складі змінюються в такий спосіб:

– немає потреби в агрегатах – за зміну 0,25 і 0;

– потрібен один агрегат – 0,6 і 0,25;

– потрібні два агрегати – 0,15 і 0,375;

– потрібні чотири агрегати – 0 і 0,155;

– потрібні п’ять агрегатів – 0,4 і 0,22.

Отже, результати експерименту служать для ухвалення оптимальних рішень у разі управління системою, яка «навчається» за результатами експерименту і корегує ухвалені рішення. У цьому випадку поняття експеримент ширше за звичний збір інформації, тому що він передбачає реалізацію рішення – зміну кількості агрегатів на складі, корегування завдання ремонтним цехам тощо.

Загальна стратегія з урахуванням доцільності проведення експерименту і вибору стратегії за результатами експерименту графічно може бути подана у вигляді дерева рішень (рис. 3).

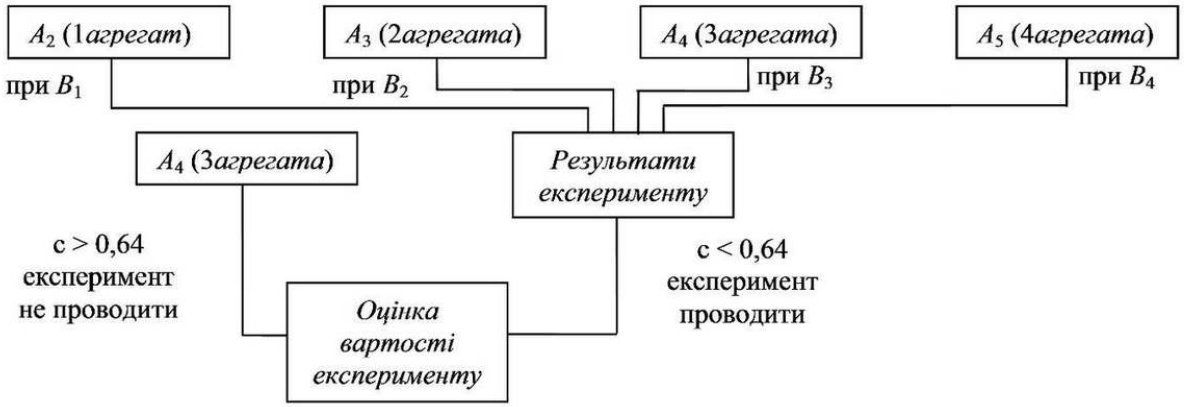


Рис. 3. Стратегія ухвалення рішень

Висновки. На підставі проведеного дослідження отримані такі результати:

– розроблено формалізовану математичну модель ухвалення логістичних рішень про формування запасів агрегатів локомотивного депо в умовах невизначеності та дефіциту інформації, яка базована на методології теорії ігор і статистичних рішень;

– запропоновано комплексний підхід щодо визначення оптимального розміру оборотного фонду, який використовує багатокритеріальний аналіз (максимінний критерій, критерій мінімаксного ризику та критерій песимізму-оптимізму) для мінімізації економічних втрат ремонтного господарства для різних імовірнісних станів потреби в ремонті;

– обґрунтовано алгоритм корегування стратегій постачання на основі теореми Байєса, що дає змогу перераховувати апостеріорні ймовірності виходу агрегатів із ладу після отримання додаткової інформації («проведення експерименту»). Доведено економічну доцільність збору такої інформації за умови, що витрати на неї не перевищують розрахований маржинальний виграш системи;

– запропонований підхід має високий потенціал до інтеграції із сучасними технологіями цифрових двійників і системами предиктивної діагностики рухомого складу, що дасть змогу в режимі реального часу корегувати ймовірності станів обладнання та автоматизувати ухвалення рішень про поповнення складських запасів локомотивного депо.

Список використаних джерел

1. Про залізничний транспорт України: Закон України від 2019 р. № 1196-1 / Верховна Рада України.

2. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки: Постанова Кабінету Міністрів України від 2011 р. № 1390.

3. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки: Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 2008 р. № 1259.

4. Капіца, М. І., & Коренюк, Р. О. (2012). Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 40*, 63 – 67.

5. Калабухін, Ю. Є. (2010). Теоретичні положення оцінки техніко-економічних показників функціонування тягового рухомого складу протягом життєвого циклу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 1*(2), 75 – 80.

6. Крамчанін, І. Г., Крашенінін, О. С., Пузир, В. Г., & Фалендиш, А. П. (2004). Організація технологічних процесів ремонту ТРС із застосування засобів діагностування. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 57*, 31 – 34.

7. Крашенінін, О. С., Яковлєв, С. С., & Шапатіна, О. О. (2021). Обґрунтування стратегії організації технічного обслуговування, поточного ремонту швидкісного рухомого складу в умовах України. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 26*(3), 7 – 11. https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i3.240449

8. Тартаковський, Е. Д., Уманець, М. Г., & Аулін, Д. О. (2006). Визначення життєвого циклу тягового рухомого складу (ТРС). *Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 72*, 82–86.

9. Lesiak, P., Bojarczak, P., Gryniewicz-Jaworska, M., & Migdal, M. (2026). Engineering decision-support framework with an AI advisory layer for operating-cost optimisation under railway disruptions. *Applied Sciences, 16*(17), Article 8814. https://doi.org/10.3390/app16178814

10. Shao, Z., Xu, J., & Lei, C. (2025). Electric multiple unit spare parts vendor-managed inventory contract mechanism design. *Systems, 13*(7), Article 585. https://doi.org/10.3390/systems13070585

11. Liu, Y., Jia, L., Wang, P., & Song, X. (2024). Joint optimization of location and allocation for spare parts depots under (*r*, *Q*) inventory policy. *Networks and Heterogeneous Media, 19*(3), 1038–1057. https://doi.org/10.3934/nhm.20240046

12. Werbińska-Wojciechowska, S., Gie,l R., & Winiarska, K. (2024). Digital twin approach for operation and maintenance of transportation system – Systematic review. *Sensors, 24*(18), Article 6069. https://doi.org/10.3390/s24186069

13. Wang, G., Li, Y., Cheng, C. X., Li, R., Ding, C. X., Zhang, Y., & Liu, Y. (2025). Integrated optimization of equipment degradation modeling and spare parts inventory for predictive maintenance in power systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 83*, Article 104626. https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104626

14. Zhou, J., & Zhang, S. (2024). A simulation-based Bayesian network approach to the joint decision of the international transportation mode and safety inventory policy. *Transportation Research Record, 2678*(10), 26 – 44. https://doi.org/10.1177/03611981241231798

15. Sommer, B., Lee, S., Holst, K. K., & Boomsma, T. K. (2025). Markov decision processes for inland empty container inventory management. *Computational Management Science, 22*(1), Article 4. https://doi.org/10.1007/s10287-025-00530-9

References

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (2019). *Zakon Ukrainy «Pro zaliznychnyi transport Ukrainy»* [Law of Ukraine «On Railway Transport of Ukraine»] (№ 1196-1). [in Ukrainian].

2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2011). *Derzhavna tsilova prohrama reformuvannia zaliznychnoho transportu na 2010-2019 roky* [State target program for reforming railway transport for 2010-2019] (Postanova № 1390). [in Ukrainian].

3. Ministry of Transport and Communications of Ukraine. (2008). *Kompleksna prohrama onovlennia zaliznychnoho rukhomoho skladu Ukrainy na 2008-2020 roky* [Comprehensive program for the renewal of railway rolling stock of Ukraine for 2008-2020] (Nakaz № 1259). [in Ukrainian].

4. Kapitsa, M. I., & Koreniuk, R. O. (2012). Stratehii ekspluatatsii, tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu lokomotyviv [Strategies for operation, maintenance and repair of locomotives]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana, 40*, 63 – 67 [in Ukrainian].

5. Kalabukhin, Yu. Ye. (2010). Teoretychni polozhennia otsinky tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv funktsionuvannia tiahovoho rukhomoho skladu protiahom zhyttievoho tsyklu [Theoretical provisions for assessing the technical and economic indicators of the operation of traction rolling stock during the life cycle]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, *1*(2), 75–80 [in Ukrainian].

6. Kramchanin, I. H., Krasheninin, O. S., Puzyr, V. H., & Falendysh, A. P. (2004). Orhanizatsiia tekhnolohichnykh protsesiv remontu TRS iz zastosuvannia zasobiv diahnostuvannia [Organization of technological processes of TRS repair with the use of diagnostic tools]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, *57*, 31–34 [in Ukrainian].

7. Krasheninin, O. S., Yakovliev, S. S., & Shapatina, O. O. (2021). Obgruntuvannia stratehii orhanizatsii tekhnichnoho obsluhovuvannia, potochnoho remontu shvydkisnoho rukhomoho skladu v umovakh Ukrainy [Justification of the strategy of organization of maintenance, current repair of high-speed rolling stock in the conditions of Ukraine]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, *26*(3), 7 – 11 [in Ukrainian].

8. Tartakovskyi, E. D., Umanets, M. H., & Aulin, D. O. (2006). Vyznachennia zhyttievoho tsyklu tiahovoho rukhomoho skladu (TRS) [Determination of the life cycle of traction rolling stock (TRS)]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, *72*, 82 – 86 [in Ukrainian].

9. Lesiak, P., Bojarczak, P., Gryniewicz-Jaworska, M., & Migdal, M. (2026). Engineering decision-support framework with an AI advisory layer for operating-cost optimisation under railway disruptions. *Applied Sciences*, *16*(17), Article 8814. https://doi.org/10.3390/app16178814

10. Shao, Z., Xu, J., & Lei, C. (2025). Electric multiple unit spare parts vendor-managed inventory contract mechanism design. *Systems*, *13*(7), Article 585. https://doi.org/10.3390/systems13070585

11. Liu, Y., Jia, L., Wang, P., & Song, X. (2024). Joint optimization of location and allocation for spare parts depots under (*r*, *Q*) inventory policy. *Networks and Heterogeneous Media*, *19*(3), 1038–1057. https://doi.org/10.3934/nhm.20240046

12. Werbińska-Wojciechowska, S., Giel, R., & Winiarska, K. (2024). Digital twin approach for operation and maintenance of transportation system – Systematic review. *Sensors*, *24*(18), Article 6069. https://doi.org/10.3390/s24186069

13. Wang, G., Li, Y., Cheng, C. X., Li, R., Ding, C. X., Zhang, Y., & Liu, Y. (2025). Integrated optimization of equipment degradation modeling and spare parts inventory for predictive maintenance in power systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *83*, Article 104626. https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104626

14. Zhou, J., & Zhang, S. (2024). A simulation-based Bayesian network approach to the joint decision of the international transportation mode and safety inventory policy. *Transportation Research Record, 2678*(10), 26 – 44. https://doi.org/10.1177/03611981241231798

15. Sommer, B., Lee, S., Holst, K. K., & Boomsma, T. K. (2025). Markov decision processes for inland empty container inventory management. *Computational Management Science, 22*(1), Article 4. https://doi.org/10.1007/s10287-025-00530-9

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, професор кафедри, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: krasheninin@kart.edu.ua. orcid.org/0000-0001-7462-3372.
Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, доцент кафедри, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua. orcid.org/ 0000-0002-9185-6212.
Михалків Сергій Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, доцент кафедри, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: svm_m@kart.edu.ua. orcid.org/ 0000-0002-0425-6295.
Бондаренко Костянтин Станіславович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: kos.bondarenko.kh@gmail.com. orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Krasheninin Oleksandr Semenovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Professor, Kharkiv, Ukraine.
E-mail: krasheninin@kart.edu.ua. orcid.org/0000-0001-7462-3372.
Shapatina Olga Oleksandrivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Cargo and Commercial Work Management, Associate Professor of the Department, Kharkiv, Ukraine. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua. orcid.org/ 0000-0002-9185-6212.
Mykhalkiv Serhii Vasylovych, Candidate of Technical Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Associate Professor of the Department, Kharkiv, Ukraine.
Tel.: +38(097)2126170. E-mail: svm_m@kart.edu.ua. orcid.org/ 0000-0002-0425-6295.
Bondarenko Kostiantyn Stanislavovych, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, postgraduate student, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kos.bondarenko.kh@gmail.com. orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Дата надходження статті: 25.08.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 25.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 656.073:665.6/.7:519.85

ОПТИМІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НАФТОПРОДУКТІВ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Д-р техн. наук Ю. В. Зеленько, асп. В. Е. Черкудінов

OPTIMIZATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE TRANSPORT PROCESS OF OIL PRODUCTS TRANSPORTATION IN MARTIAL TIME

Dr. Sc. (Tech.) Yu. Zelenko, postgraduate student V. Cherkudinov

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.372825

Анотація. *Досліджено дві транспортно-технологічні схеми доставлення нафтопродуктів: залізничними цистернами з подальшим перевантаженням в автомобільні цистерни та мультимодальну схему із застосуванням контейнерів-цистерн, які без перевантаження продукту переміщують між залізничним і автомобільним транспортом. Запропоновано математичний підхід щодо оптимального розподілу вантажопотоків з урахуванням транспортних, перевантажувальних і термінальних витрат. За результатами оптимізації визначено мінімальну сумарну вартість доставлення 1000 т нафтопродуктів: 3,490 млн грн для залізничної схеми та 2,451 млн грн для мультимодальної схеми з контейнерами-цистернами.*

Ключові слова: *мультимодальні перевезення, нафтопродукти, транспортна задача, математичне моделювання, логістика, контейнер-цистерна, залізничний транспорт.*

Abstract. *The article presents an improved mathematical model for optimizing transport and technological schemes for petroleum product delivery under martial law conditions in Ukraine. The proposed model is based on linear programming methods and is aimed at determining the most economically efficient transportation option while ensuring compliance with supply and demand constraints. Unlike traditional transportation models, the developed approach considers the capacity limitations of border crossing points, the distribution of consumer demand, transportation costs, delivery time, and the technological features of alternative logistics schemes. Two transportation options are analyzed: railway transportation in tank wagons with subsequent transshipment into road tankers, and multimodal transportation using ISO tank containers.*

A computational experiment was conducted for the delivery of 1,000 tons of unleaded motor gasoline from five western border crossing points of Ukraine to seven final consumer locations. The optimization model incorporates transportation costs, transshipment operations, terminal handling expenses, and time parameters associated with each delivery scheme. The obtained results demonstrate that the multimodal transportation scheme based on tank containers provides the lowest total logistics costs compared with conventional railway solutions. The economic efficiency of this technology is achieved through the reduction of intermediate handling operations, improved utilization of transport resources, and increased reliability of supply chains.

The proposed approach also contributes to improving the safety of hazardous goods transportation by reducing the number of product transfers and minimizing the risk of emergency losses. The developed mathematical model can be applied as a decision-support tool for planning

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Зеленько Ю. В., Черкудінов В. Е., 2026.

petroleum product transportation, selecting rational logistics routes, and increasing the resilience of fuel supply systems under conditions of disrupted transport infrastructure and elevated logistical risks.

Keywords: *multimodal transportation, petroleum products, transport problem, mathematical modeling, logistics, tank container, railway transport.*

Вступ. Це дослідження належить до галузі транспортних технологій, зокрема до сфери управління ланцюгами постачань та оптимізації мультимодальних перевезень небезпечних вантажів в умовах критичних інфраструктурних обмежень.

Актуальність розв'язуваної проблеми зумовлена тим, що воєнні дії на території України істотно змінили умови функціонування транспортно-логістичних систем постачання нафтопродуктів. Руйнування нафтобаз, блокування морських портів, пошкодження транспортної інфраструктури та суттєве збільшення імпорту пально-мастильних матеріалів через західні прикордонні переходи призвели до необхідності формування нових логістичних схем доставлення пального до кінцевих споживачів [1, 3].

Отже, виникає гостра науково-практична потреба у створенні інструментарію для комплексного порівняння та оптимізації існуючих варіантів доставлення (транспортування в залізничних цистернах з інтермодальним перевантаженням в автоцистерни або використання мультимодальної технології контейнер-цистерн), що допоможе мінімізувати логістичні витрати.

На сучасному етапі найбільш поширеними залишаються дві транспортно-технологічні схеми доставлення нафтопродуктів:

- перевезення в залізничних цистернах із подальшим перевантаженням в автомобільні цистерни;
- мультимодальне перевезення із використанням контейнер-цистерн і контейнеровозів [2, 4].

Кожна із зазначених схем має різні експлуатаційні витрати, рівень використання транспортної інфраструктури, тривалість доставлення, потребу в перевантажувальних операціях і величину логістичних ризиків [1, 5, 6].

Вибір найбільш ефективної транспортної схеми ускладнений необхідністю одночасного врахування обсягів поставок, пропускної спроможності прикордонних переходів, структури попиту окремих регіонів і вартості доставлення різними видами транспорту.

У зв'язку з цим актуальним науковим завданням є вдосконалення математичної моделі оптимізації транспортного процесу, яка дає змогу визначати мінімальні логістичні витрати для забезпечення необхідних обсягів постачання нафтопродуктів [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Трансформація міжнародних логістичних ланцюгів і переорієнтація маршрутів транспортування нафтопродуктів у регіонах із нестабільним безпековим середовищем перебувають у центрі уваги багатьох вітчизняних і закордонних науковців. Особливо ці питання розглядають у публікаціях останніх років, які індексовані в міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science.

Глобальні інфраструктурні та логістичні зсуви на європейському просторі внаслідок повномасштабної війни детально проаналізовано у фундаментальному дослідженні [8]. У цій праці на прикладі електроенергетичного та паливного комплексів доведено, що воєнні конфлікти викликають глибоку регіональну дестабілізацію та потребують негайного підвищення гнучкості інтермодальних транспортних систем. Проте автори акцентують переважно на макроекономічних і геополітичних аспектах паливних ринків, залишаючи поза увагою

локальні технологічні параметри організації рейсів і вибір конкретного типу рухомого складу. Техніко-експлуатаційні характеристики та оцінювання міцності модернізованих танк-контейнерів під час комбінованого (автомобільно-залізничного) сполучення досліджено у праці [9]. Отримані результати підтверджують високу надійність танк-контейнерів для циклічних перевантажень, проте вказані дослідження мають суто інженерний характер і не містять алгоритмів економічної оптимізації всього логістичного ланцюга.

Особливості адаптації транспортного комплексу України до умов воєнного стану та зміни нормативно-правових вимог ADR/RID висвітлено у працях вітчизняних науковців.

Специфіку переорієнтації паливних потоків через західні кордони (так звані Шляхи солідарності) розкрито в дослідженні [10], де доведено ефективність мультимодальних схем як інструменту виживання бізнесу.

Водночас у роботах з організації мультимодальних контейнерних перевезень [11] обґрунтовано, що перехід на контейнерні технології дає змогу інтегрувати українську транспортну систему в європейську за рахунок усунення технологічних бар'єрів. Проте в цих працях акцент зміщено на загальну логістичну координацію без порівняльного розрахунку витрат на перевантаження рідких паливних вантажів.

Проблеми затримок рухомого складу на прикордонних пунктах та оптимізації процесу руху залізничним транспортом формалізовано в дослідженні [12]. Автори запропонували математичний апарат для мінімізації витрат вагоно-годин на станціях накопичення. Разом із тим їхні моделі розраховані на класичні схеми доставлення залізничними цистернами з тривалим накопиченням на опорних станціях і не враховують оперативну специфіку автомобільного компонента мультимодальних систем для доставлення пального безпосередньо кінцевому споживачу.

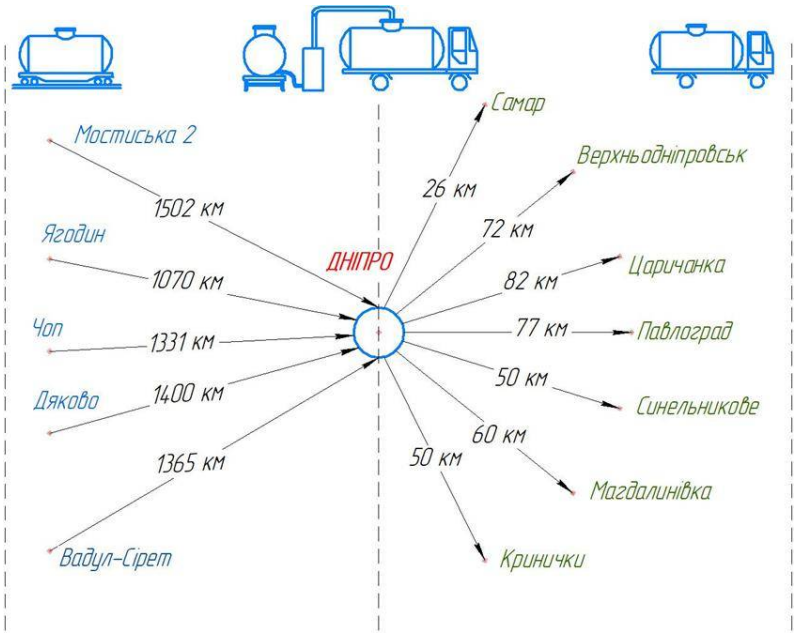
Попри високий науковий рівень зазначених публікацій, переважна більшість існуючих математичних моделей орієнтована на оптимізацію окремих ізольованих операцій або монотранспортних маршрутів.

Залишається нерозв'язаною проблема комплексного системного порівняння класичної залізнично-автомобільної схеми доставлення та мультимодальної схеми із застосуванням танк-контейнерів у межах єдиної математичної постановки. Наявні підходи не враховують одночасно динамічну зміну пропускної спроможності прикордонних пунктів пропуску в умовах воєнного стану, специфіку структури попиту децентралізованих регіональних споживачів і повну відсутність проміжних нафтотерміналів для накопичення запасів.

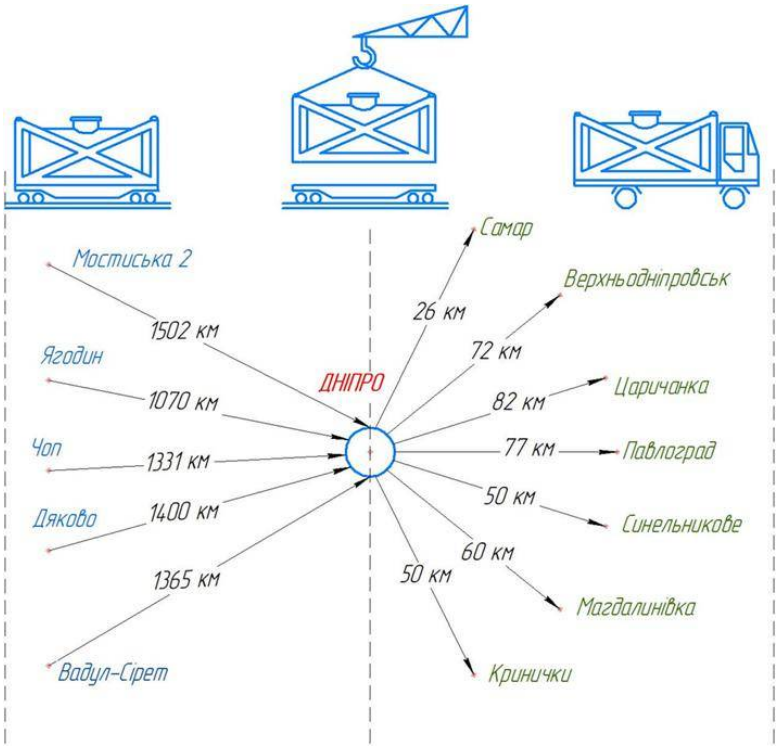
Визначення мети та завдання дослідження:

- удосконалити математичний підхід щодо оптимального розподілу вантажопотоків між пунктами відправлення та призначення з урахуванням їхніх заданих обсягів;
- визначити оптимальний план перевезення 1000 т нафтопродуктів і мінімальні сумарні витрати для кожної з досліджуваних транспортно-технологічних схем;
- порівняти досліджувані схеми за вартістю і тривалістю доставлення і визначити доцільність використання мультимодальної схеми з контейнер-цистернами.

Основна частина дослідження. Розглянуто логістичні схеми транспортування нафтопродукту (бензин моторний неетильований, код ЄТСНВ 211056, номер ООН 1203, 3 клас небезпечних вантажів, згідно з вимогами ADR та RID [11, 12]) від прикордонних залізничних станцій Чоп, Мостиська 2, Ягодин, Дяково, Вадул-Сірет до населених пунктів Самар, Верхньодніпровськ, Царичанка, Павлоград, Синельникове, Магдалинівка, Кринички (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Схема транспортування: а – залізнична; б – мультимодальна

Запропоновано дві схеми транспортування, що розглядають окремо:

1) залізнична – вантаж перевозять у залізничних цистернах моделі 15-776 (вантажопідйомність 66 т) до станції Дніпро, переливають в автомобільні цистерни Kaessbohrer K.STB E 39/5-11/24 (вантажопідйомність 20т, місткість 36 м³), транспортують автомобільним транспортом до кінцевих населених пунктів;

2) мультимодальна – вантаж перевозять у 20-футових контейнер-цистернах типу T11 (ISO 668:1995, код 22T4, місткість 25 тис. л.) залізницею до станції Дніпро, перевантажують контейнер-цистерни на автомобільні контейнеровози DL-НПК 3812, транспортують автомобільним транспортом до кінцевих населених пунктів.

Для визначення найбільш ефективної транспортно-технологічної схеми доставлення нафтопродуктів запропоновано математичну модель оптимізації, побудовану на основі задачі лінійного програмування. На відміну від класичної транспортної задачі, модель ураховує альтернативні способи перевезення, обмеження пропускної спроможності прикордонних переходів і структуру попиту кінцевих споживачів.

У моделі розглянуто множину пунктів відправлення

$$i = \{1, 2, \dots, m\}. \quad (1)$$

Як прикордонні пункти відправлення нафтопродуктів прийнято такі залізничні переходи та об'єми відвантаження:

- ст. Мостиська-2 – 240 т ($i = 1$);
- ст. Ягодин – 180 т ($i = 2$);
- ст. Чоп – 360 т ($i = 3$);
- ст. Дякове – 100 т ($i = 4$);
- ст. Вадул-Сірет – 120 т ($i = 5$).

Забезпечення загального вантажопотоку 1000 т.

Множина пунктів призначення

$$j = \{1, 2, \dots, n\}. \quad (2)$$

Встановлено, що попит у бензині в містах призначення ґрунтований на мінімально необхідних запасах в автозаправних станціях, загальна потреба в перевезенні становить 1000 т:

- м. Самар – 300 т ($j = 1$);
- м. Павлоград – 300 т ($j = 2$);
- м. Верхньодніпровськ – 60 т ($j = 3$);
- м. Магдалинівка – 60 т ($j = 4$);
- м. Царичанка – 100 т ($j = 5$);
- м. Синельникове – 140 т ($j = 6$);
- м. Кринички – 40 т ($j = 7$).

Критерієм оптимізації є мінімізація сумарних логістичних витрат, цільова функція якої має вигляд

$$Z = \sum_{i=1}^{7} \sum_{j=1}^{5} C_{ij} x_{ij} \rightarrow min, \quad (3)$$

де x_{ij} – обсяг перевезення від i-го пункту відправлення до j-го пункту призначення за кожною з двох схем, т;

C_{ij} – питомі витрати перевезення одиниці вантажу за відповідною схемою, грн/т (табл. 1).

Питомі логістичні витрати визначають як

$$C_{ijk} = C_{ij\text{тр}} + C_{ij\text{пер}} + C_{ij\text{тер}}, \quad (4)$$

де $C_{ij\text{тр}}$ – транспортні витрати;

$C_{ij\text{пер}}$ – витрати перевантаження;

$C_{ij\text{тер}}$ – витрати виконання термінальних операцій.

Для залізничної схеми

$$C_{ij1} = C_{ij1\text{тр}} + C_{ij1\text{пер}}, \quad (5)$$

для мультимодальної

$$C_{ij2} = C_{ij2\text{тр}} + C_{ij2\text{тер}}. \quad (6)$$

Чисельно запропоновану математичну модель розв'язано в середовищі Mathcad із використанням функції Minimize, яка забезпечує знаходження оптимального плану перевезень за заданих обмежень.

Для кожної транспортної схеми сформовано матриці питомих витрат перевезення між усіма пунктами відправлення та кінцевими споживачами. Вартість доставлення визначали в розрахунку на 20 т вантажу, що відповідає вантажопідйомності автомобільної цистерни та дає змогу використовувати єдину систему умовних транспортних одиниць під час розв'язання транспортної задачі.

Таблиця 1

Питома вартість перевезення в залізничних цистернах/контейнер-цистернах із наступним перевантаженням в автоцистерни, т грн/20 т

Пункт призначення / Станція відправлення	Самар 300 т	Верхньодніпровськ 60 т	Царичанка 100 т	Павлоград 300 т	Синельникове 140 т	Магдалинівка 60 т	Кринички 40 т
Мостиська 2 240 т	65,14 / 49,74	66,2 / 47,24	66,14 / 47,20	66,98 / 47,66	65,52 / 46,88	65,24 / 46,72	65,64 / 46,94
Ягодин 180 т	60,74 / 47,74	61,8 / 45,24	61,74 / 45,20	62,5 / 45,66	61,14 / 44,88	60,84 / 44,72	61,24 / 44,94
Чоп 360 т	71,92 / 51,76	72,98 / 49,26	72,92 / 49,22	73,76 / 49,68	72,3 / 48,90	72,02 / 48,74	72,4 / 48,96
Дяково 100 т	75,32 / 52,60	76,38 / 50,10	76,32 / 50,06	77,16 / 50,52	75,7 / 49,74	75,42 / 49,58	75,8 / 49,80
Вадул-Сірет 120 т	75,32 / 52,60	76,38 / 50,10	76,32 / 50,06	77,16 / 50,52	75,7 / 49,74	75,42 / 49,58	75,8 / 49,80

У випадку перевезення в залізничних цистернах із наступним перевантаженням в автоцистерни цільова функція має вигляд

$$Z = 65{,}14 \cdot x_{11} + 66{,}2 \cdot x_{12} + 66{,}14 \cdot x_{13} + 66{,}98 \cdot x_{14} + 65{,}52 \cdot x_{15} + 65{,}24 \cdot x_{16} + 65{,}64 \cdot x_{17} + 60{,}74 \cdot x_{21} + 61{,}8 \cdot x_{22} + 61{,}74 \cdot x_{23} + 62{,}5 \cdot x_{24} + 61{,}14 \cdot x_{25} + 60{,}84 \cdot x_{26} + 61{,}24 \cdot x_{27} + 71{,}92 \cdot x_{31} + 72{,}98 \cdot x_{32} + 72{,}92 \cdot x_{33} + 73{,}76 \cdot x_{34} + 72{,}3 \cdot x_{35} + 72{,}02 \cdot x_{36} + 72{,}4 \cdot x_{37} + 75{,}32 \cdot x_{41} + 76{,}38 \cdot x_{42} + 76{,}32 \cdot x_{43} + 77{,}16 \cdot x_{44} + 75{,}7 \cdot x_{45} + 75{,}42 \cdot x_{46} + 75{,}8 \cdot x_{47} + 75{,}32 \cdot x_{51} + 76{,}38 \cdot x_{52} + 76{,}32 \cdot x_{53} + 77{,}16 \cdot x_{54} + 75{,}7 \cdot x_{55} + 75{,}42 \cdot x_{56} + 75{,}8 \cdot x_{57}.$$

При цьому матриця розподілу між постачальниками та споживачами має такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{17} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} & x_{27} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} & x_{55} & x_{66} & x_{37} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} & x_{45} & x_{46} & x_{47} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} & x_{54} & x_{55} & x_{56} & x_{57} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

У випадку перевезення в контейнер-цистернах із наступним перевантаженням в напівпричепи-контейнеровози цільова функція має вигляд

$$Z = 49{,}74 \cdot x_{11} + 47{,}24 \cdot x_{12} + 47{,}2 \cdot x_{13} + 47{,}66 \cdot x_{14} + 46{,}88 \cdot x_{15} + 46{,}72 \cdot x_{16} + 46{,}94 \cdot x_{17} + 47.74 \cdot x_{21} + 45{,}24 \cdot x_{22} + 45{,}2 \cdot 23 + 45{,}66 \cdot x_{24} + 44{,}88 \cdot x_{25} + 44{,}72 \cdot x_{26} + 44{,}94 \cdot x_{27} + 51{,}76 \cdot x_{31} + 49{,}26 \cdot x_{32} + 49{,}22 \cdot x_{33} + 49{,}68 \cdot x_{34} + 48{,}9 \cdot x_{35} + 48{,}74 \cdot x_{36} + 48{,}96 \cdot x_{37} + 52{,}6 \cdot x_{41} + 50{,}1 \cdot x_{42} + 50{,}06 \cdot x_{43} + 50{,}52 \cdot x_{44} + 49{,}74 \cdot x_{45} + 49{,}58 \cdot x_{46} + 49{,}8 \cdot x_{47} + 52{,}6 \cdot x_{51} + 50{,}1 \cdot x_{52} + 50{,}06 \cdot x_{53} + 50{,}52 \cdot x_{54} + 49{,}74 \cdot x_{55} + 49{,}58 \cdot x_{56} + 49{,}8 \cdot x_{57}.$$

При цьому матриця розподілу між постачальниками та споживачами має такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{17} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} & x_{27} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} & x_{55} & x_{66} & x_{37} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} & x_{45} & x_{46} & x_{47} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} & x_{54} & x_{55} & x_{56} & x_{57} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 11 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 \end{bmatrix}.$$

Чисельні значення питомих транспортних витрат отримані на основі чинних тарифів залізничних перевезень (2025 р.), вартості автомобільних перевезень небезпечних вантажів (2025 р.), витрат на перевантажувальні операції та експлуатаційних характеристик транспортних засобів (2025 р.).

Сформовані матриці вартості використано як вхідні параметри математичної моделі оптимізації та реалізовано в програмному середовищі Mathcad для визначення мінімальної сумарної вартості доставлення нафтопродуктів за кожною із досліджуваних транспортно-технологічних схем.

Результати розрахунку наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльні результати оптимізації транспортно-технологічних схем перевезення нафтопродуктів

Показник	Залізнична схема (цистерни + автоцистерни)	Мультимодальна схема (контейнер-цистерни)
Загальний обсяг перевезення, т	1000	
Кількість пунктів відправлення	5	
Кількість пунктів призначення	7	
Кількість умовних транспортних одиниць (20 т)	50	
Мінімальна вартість перевезення, млн грн	3,490	2,451
Середня вартість перевезення, грн/т	3490	2451

Аналіз результатів оптимізації свідчить, що найменшу сумарну вартість доставлення 1000 т нафтопродуктів забезпечує мультимодальна контейнерна схема перевезення. Мінімальні логістичні витрати становлять 2,451 млн грн, що на 1,039 млн грн (29,8 %) менше порівняно із залізничною схемою перевезення.

Окрім вартості перевезення, важливим критерієм оцінювання ефективності транспортно-технологічної схеми є загальна тривалість доставлення вантажу від прикордонного переходу до кінцевого споживача.

Час доставлення визначають як суму тривалості основного транспортування, часу виконання перевантажувальних операцій і термінальної обробки.

$$T = t_{\text{тр}} + t_{\text{оф}} + t_{\text{пер}}, \quad (7)$$

де $t_{\text{тр}}$ – час транспортування;

$t_{\text{оф}}$ – час оформлення документів;

$t_{\text{пер}}$ – час навантажувально-розвантажувальних операцій.

Для порівняння ефективності різних схем транспортування проаналізовано середній час доставлення вантажу від основних пунктів перетину державного кордону України (табл. 3).

На рис. 2 наведено графік, який відображає зміну тривалості доставлення для автомобільної, залізничної та мультимодальної схем перевезення.

Таблиця 3

Порівняння середнього часу доставлення за транспортно-технологічними схемами

Пункт відправлення	Залізнична схема (цистерни + автоцистерни), діб	Мультимодальна схема (контейнер-цистерни), діб
Мостиська-2	15	10
Ягодин	14	9
Чоп	17	11
Дякове	18	11
Вадул-Сірет	18	11

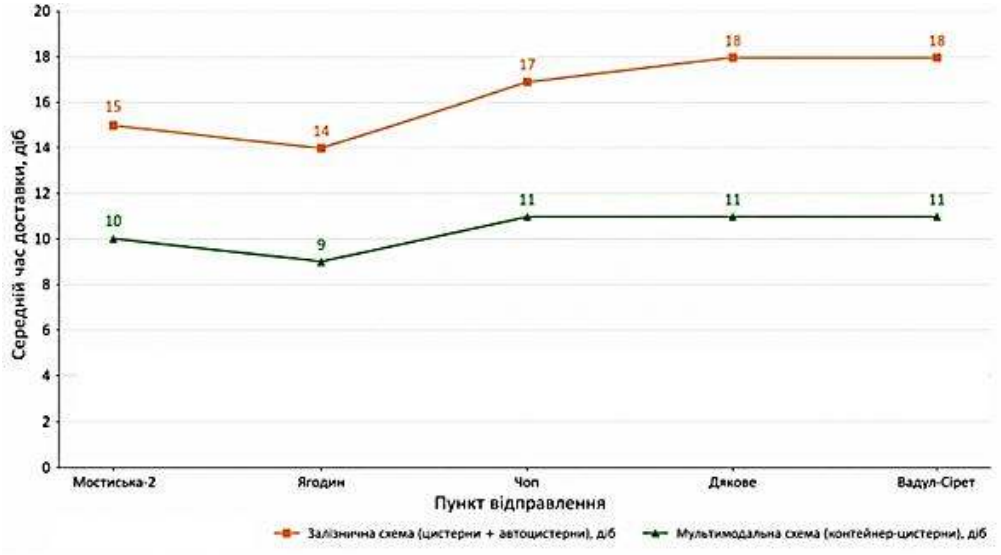


Рис. 2. Зміна тривалості доставлення для залізничної та мультимодальної схем перевезення

Побудова графіка допомагає наочно оцінити переваги та недоліки кожного варіанта логістики, визначити найбільш швидку схему доставлення, а також порівняти стабільність часу перевезення залежно від пункту відправлення.

Висновки. За результатами розрахунків, мінімальна сумарна вартість доставлення 1000 т нафтопродуктів для залізничної схеми становить 3,490 млн грн, а для мультимодальної схеми з контейнер-цистернами — 2,451 млн грн. Різниця становить 1,039 млн грн, або 29,8 % відносно залізничної схеми, що характеризує вплив транспортно-технологічної організації перевезення на величину логістичних витрат.

Розрахований оптимальний план забезпечує розподіл загального вантажопотоку 1000 т між п’ятьма пунктами відправлення та сімома пунктами призначення відповідно до їхніх заданих обсягів. Найбільший обсяг постачання припадає на станцію Чоп — 360 т (36 %), тоді як найбільший попит сформовано у Самарі та Павлограді — по 300 т.

Запропонований математичний підхід дає змогу визначати раціональний розподіл вантажопотоків і порівнювати транспортно-технологічні схеми за вартістю і тривалістю доставлення. Модель може бути використана для обґрунтування організації постачання нафтопродуктів через залізничні переходи України до регіональних споживачів в умовах обмеженої транспортної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Зеленько, Ю. В., Черкудінов, В. Е., & Левицька, С. І. (2023). Концепція екологізації мультимодальних перевезень. *Транспортні системи та технології перевезень*, (24), 58–62. DOI:10.15802/tstt2022/272065
2. Bielova A., Novalska, N., & Orlovska, A. (2019). Актуальні питання розвитку мультимодальних перевезень в Україні. *Review of Transport Economics and Management*, 18(2), 58–65. DOI: 10.15802/rtem.v18i2.191243
3. Ситнік, В. В., & Пікуліна, О. В. (2025). Розвиток мультимодальних перевезень в Україні: економічний та інфраструктурний виміри. *Review of Transport Economics and Management*, 12(28), 90–100. DOI: 10.15802/rtem2024/327135
4. Вернигора, Р. В., Окороков, А. М., Цупров, П. С., & Павленко, О. І. (2017). Мультимодальні перевезення як базовий сегмент транзитного потенціалу України. *Транспортні системи та технології перевезень*, (14), 20–29. DOI: 10.15802/tstt2017/123148
5. Журавель, І. Л., Журавель, В. В., Онацька, А. Ю., Журавель, А. В., Мушта, О. В., & Журавель, В. В. (2018). Перспективи мультимодальних перевезень небезпечних вантажів. *Транспортні системи та технології перевезень*, (15), 27–32. DOI: 10.15802/tstt2018/150195
6. Ломотько, Д. В., & Примаченко, Г. О. (2023). Аналіз розвитку мультимодальних перевезень залізничним транспортом в Україні. *Залізничний транспорт України*, (2), 15–32. DOI: 10.34029/2311-4061-2023-147-2-15-30
7. Ломотько, М. Д. (2023). Формування ланцюга постачання вантажів у контейнерах на основі «зеленої» логістики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 28(1), 44–51. DOI: 10.18664/ikszt.v28i1.276347
8. European Energy Research Alliance. (2026). Shifting roles of renewable and fossil energy in the ENTSO-E power system during the Russia-Ukraine conflict. *Energy Policy*, 210, Article 115083. DOI: 10.1016/j.enpol.2026.115083

9. Ловська, А. (2023). Дослідження міцності контейнера-цистерни при перевезенні автотранспортом. *Mechanics and Advanced Technologies*, *7*(2 (98), 216–222. DOI:10.20535/2521-1943.2023.7.2.277820

10. Гринів, Л., Попадинець, І., & Романко, О. (2026). Мультимодальні перевезення як інструмент підвищення конкурентоспроможності підприємств України. *Сталий розвиток економіки*, (1(58), 908-913. DOI: 10.32782/2308-1988/2026-58-121

11. Соколова, О. Є. (2021). Організація мультимодальних контейнерних перевезень, як складової сталого розвитку транспортної системи України. *Наукоємні технології*, 3 (51), 292–304. DOI: 10.18372/2310-5461.51.16000

12. Манафов, Е. К., Прохорченко, А. В., & Харченко, Д. Р. (2023). Дослідження та оптимізація процесу організації руху на залізницях України в сучасних умовах. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezon* [Transport Systems and Transportation Technologies] (26), 4–36.

References

1. Zelenko, Yu. V., Cherkudinov, V. E., & Levytska, S. I. (2023). Kontseptsiia ekolohizatsii multimodalnykh perevezen [The concept of greening multimodal transport]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezon* [Transport Systems and Transportation Technologies], (24), 39–48. DOI:10.15802/tstt2022/272065

2. Bielova, A., Novalska, N., & Orlovska, O. (2019). Aktualni pytannia rozvytku multimodalnykh perevezen v Ukraini [Current issues of multimodal transport development in Ukraine]. *Review of Transport Economics and Management*, 18(2), 58–65. DOI: 10.15802/rtem.v18i2.191243

3. Sytnik, V. V., & Pikulina, O. V. (2025). Rozvytkov multimodalnykh perevezen v Ukraini: ekonomichnyi ta infrastrukturnyi vymiry [Development of multimodal transportation in Ukraine: Economic and infrastructural dimensions]. *Review of Transport Economics and Management*, 12(28), 90–100. DOI: 10.15802/rtem2024/327135

4. Vernyhora, R. V., Okorokov, A. M., Tsuprov, P. S., & Pavlenko, O. I. (2017). Multimodalni perevezennia yak bazovyi sehment tranzitnoho potentsialu Ukraini [Multimodal transportation as a basic segment of transit potential of Ukraine]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezon* [Transport Systems and Transportation Technologies], (14), 20–29. DOI: 10.15802/tstt2017/123148

5. Zhuravel, I. L., Zhuravel, V. V., Onatska, A. Yu., Zhuravel, A. V., Mushta, O. V., & Zhuravel, Vi. V. (2018). Perspektyvy multimodalnykh perevezen nebezpechnykh vantazhiv [Prospects for multimodal transportation of dangerous goods]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezon* [Transport Systems and Transportation Technologies], (15), 27–32. DOI: 10.15802/tstt2018/150195

6. Lomotko, D. V., & Prymachenko, H. O. (2023). Analiz rozvytku multimodalnykh perevezen zaliznychnym transportom v Ukraini [Analysis of the development of multimodal transport by rail in Ukraine]. *Zaliznychnyy transport Ukrayiny* [Railway transport of Ukraine], (2), 15–32. DOI: 10.34029/2311-4061-2023-147-2-15-30

7. Lomotko, M. D. (2023). Formuvannia lantsiuha postachannia vantazhiv u konteinerakh na osnovi «zelenoi» lohistyky [Formation of supply chain of goods in containers based on «green» logistics]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti* [Information and Control Systems on Railway Transport], 28(1), 44–51. DOI: 10.18664/ikszt.v28i1.276347

8. European Energy Research Alliance. (2026). Shifting roles of renewable and fossil energy in the ENTSO-E power system during the Russia-Ukraine conflict. *Energy Policy*, 210, Article 115083. DOI: 10.1016/j.enpol.2026.115083

9. Lovska, A. O. (2023). Doslidzhennia mitsnosti konteinera-tsisterny pry perevezenni avtotransportom [Investigation of the strength of a tank container during road transport]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(2), 216–222. DOI:10.20535/2521-1943.2023.7.2.277820

10. Hryniv, L., Popadynets, I., & Romanko, O. (2024). Multimodalni perevezennia yak instrument pidvyshchennia konkurentospromozhnosti pidpryiemstv Ukrainy [Multimodal transportation as a tool for increasing the competitiveness of Ukrainian enterprises]. *Sustainable Development of Economy*, (1 (58), 908-913. DOI: 10.32782/2308-1988/2026-58-121

11. Sokolova, O. Ye. (2022). Orhanizatsiia multimodalnykh konteinernykh perevezen yak skladovoi staloho rozvytku transportnoi systemy Ukrainy [Organization of multimodal container transportation as a component of sustainable development of the transport system of Ukraine]. *Science-intensive technologies*, (3 (51), 292–304. DOI: 10.18372/2310-5461.51.16000

12. Manafov, E. K., Prokhorchenko, A. V., & Kharchenko, D. R. (2023). Doslidzhennia ta optymizatsiia protsesu orhanizatsii rukhu na zaliznytsiakh Ukrainy v suchasnyh umovakh [Research and optimization of the process of traffic organization on the railways of Ukraine in modern conditions]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezon* [Transport Systems and Transportation Technologies] (26), 4–36.

Черкудінов Володимир Едуардович, аспірант, старший викладач, кафедра прикладної механіки та матеріалознавства, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, 49000. Тел.: 0980980090. ORCID: 0000-0003-3164-0329. Scopus Author ID 57204841040.
E-mail: volodymyrcherkudinov@gmail.com.
Зеленько Юлія Володимирівна, доктор технічних наук, професор кафедри екологічної та цивільної безпеки, Український державний університет науки і технологій. м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, 49000. Тел.: 0677740464. ORCID: 0000-0001-5551-0305. Scopus Author ID 26023892200. E-mail: j.v.zelenko@ust.edu.ua.

V. Cherkudinov, postgraduate student, Senior Lecturer at the Department of Applied Mechanics and Materials Science, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID: 0000-0003-3164-0329. Scopus Author ID 57204841040. E-mail: volodymyrcherkudinov@gmail.com.
Yu. Zelenko, Dr. Sc. (Tech.), Professor of the Department of Environmental and Civil Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID: 0000-0001-5551-0305. Scopus Author ID 26023892200.
E-mail: j.v.zelenko@ust.edu.ua.

Дата надходження статті: 29.07.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 25.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 656.25:621.396.94:004.032.26:004.056.53

МАСШТАБУВАННЯ МЕТОДУ СПІЛЬНОГО ФІЗИКО-ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ НА БОРТОВІ СИСТЕМИ ЛОКОМОТИВІВ

Канд. техн. наук В. О. Сотник, д-р техн. наук В. М. Самсонкін

SCALING OF THE METHOD OF JOINT PHYSICAL AND INTELLECTUAL PROTECTION TO ON-BOARD SYSTEMS OF LOCOMOTIVES

Cand. of Tech. Sc. V. O. Sotnyk, Dr. Sc. (Tech.) V. M. Samsonkin

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371317

Анотація. *У статті обґрунтовано масштабування методу спільного фізико-інтелектуального захисту мікропроцесорної централізації на бортові системи локомотивів. Розроблено архітектуру захищеного модуля та математичний апарат Edge AI з урахуванням ефекту Допплера, адаптивного STFT, INT8-квантування і динамічного порогу Softmax. Виконано Fault Injection випробування, визначено пороги стійкості до РЕБ- та EMI-атак, запропоновано інтеграцію з централізованим кібермоніторингом залізниці для підвищення живучості руху.*

Ключові слова*: бортовий Edge AI, фізико-інтелектуальний захист, кібербезпека залізниці, електромагнітна сумісність, ефект Допплера, адаптивне STFT, INT8-квантування, MobileNet, поріг Softmax, РЕБ-атаки, HPM, UWB-імпульси, Fault Injection випробування, Hardware-in-the-Loop, кібермоніторинг.*

Abstract. *This paper substantiates scaling the combined physical-intelligent protection method, previously developed for stationary microprocessor interlocking cabinets, to onboard locomotive systems operating under fully autonomous (GoA3/GoA4) control. Vulnerability of critical locomotive subsystems to destructive electromagnetic influences is analyzed across three physical paths: the galvanic track circuit of ALSN receiver coils and Eurobalise readers, the airborne radio-channel path of FRMCS/5G-Rail and satellite navigation antennas, and internal locomotive CAN-bus/MVB/Ethernet data buses exposed to ultra-wideband transient pulses. A hybrid onboard module architecture is proposed, combining a passive multilayer shielded enclosure with vibration damping and an active Edge AI computational core acting as a transparent gateway between antenna inputs and the onboard safety computer. A dedicated mathematical apparatus and AI logic are developed for onboard operation under motion dynamics: dataset engineering accounting for the Doppler frequency shift and pantograph arcing transients; an adaptive Short-Time Fourier Transform with a Gaussian window depending on locomotive speed; INT8 quantization of a lightweight depthwise-separable convolutional network for fixed-point inference; and a speed-dependent Softmax threshold that tightens automatically at higher speeds to minimize reaction delay. A Hardware-in-the-Loop test stand combining an anechoic chamber, UWB/HPM generators, and a vibration bench determined reversible bit-flip and irreversible burnout thresholds, confirming the effectiveness of nanosecond active protective switches triggered by Edge AI, and a two-tier architecture integrating onboard modules with centralized railway cyber-monitoring for EW threat mapping is outlined.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Сотник В. О., Самсонкін В. М., 2026.

Keywords: *onboard Edge AI, physical-intelligent protection, railway cybersecurity, electromagnetic compatibility, Doppler effect, adaptive STFT, INT8 quantization, MobileNet, Softmax threshold, electronic warfare attacks, HPM, UWB pulses, Fault Injection testing, Hardware-in-the-Loop, cyber-monitoring.*

Вступ. Сучасний залізничний транспорт перебуває на етапі цифрової трансформації, за якої традиційні системи локомотивної сигналізації та автоведення поїздів стрімко еволюціонують у напрямі повністю безпілотного керування найвищих рівнів автоматизації – GoA3 (рух без машиніста під наглядом провідника) і GoA4 (абсолютно автономний рух без персоналу на борту) [9, 12]. Цей перехід критично підвищує роль інфраструктури передавання даних: впроваджують високошвидкісні цифрові радіоканали зв'язку нового покоління (FRMCS на базі 5G, LTE-R) [8], а для точного позиціонування рухомого складу залучають системи супутникової навігації. Проте перенесення критичних функцій безпеки в кіберфізичний простір відкриває вектор для принципово нових, високотехнологічних загроз [10], серед яких найбільш небезпечними є цілеспрямоване радіоелектронне придушення (РЕБ) бортових приймачів зв'язку, спуфінг (підміна) навігаційних сигналів колійної координати з метою дезорієнтації системи автоведення, а також навмисні електромагнітні атаки (EMI-атаки) потужними імпульсами безпосередньо на бортову ЕОМ локомотива з метою викликати захисну відмову апаратури [1, 2]. В умовах гібридних загроз такі атаки здатні штучно спровокувати перехід систем у захисний стан, що призведе до паралічу руху на головних магістралях. Раніше було обґрунтовано концепт стаціонарної кіберфізичної безпеки «Броньованої інтелектуальної шафи мікропроцесорної централізації (МПЦ)», що поєднує пасивний фізичний захист і алгоритми ШІ для виявлення аномалій на станційних постах. Проте такі рішення захищають лише фіксовану інфраструктуру, тоді як розвиток безпілотного руху потребує перенесення методу активного імунного бар'єра Edge AI та локального екранування безпосередньо на бортовий рівень локомотива, який є найбільш уразливою рухомою ланкою системи. Пряме копіювання стаціонарних рішень технічно неможливе: бортове середовище висуває суворі габаритно-масові обмеження, зазнає екстремальних вібраційних і ударних навантажень і нестабільності мережі живлення, що створює постійні електромагнітні завади. Це зумовлює науково-практичну проблему пошуку компромісу між високою обчислювальною потужністю нейромережевих модулів захисту і жорсткими рамками бортових стандартів залізничного транспорту, розв'язанню якої присвячено це дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема захисту залізничної автоматики від електромагнітних і кібернетичних загроз останніми роками привертає значну увагу як зарубіжних, так і вітчизняних дослідників, проте більшість напрацювань зосереджена на окремих аспектах проблеми, не пропонуючи комплексного розв'язання для рухомого об'єкта.

Систематичні огляди підтверджують зростання актуальності теми. M. Abukeshek зі співавторами [13], узагальнивши результати пошуку за п'ятьма наукометричними базами (IEEE Xplore, WoS, Scopus, ACM, ScienceDirect) серед 114 публікацій, встановили, що 51,8 % досліджень присвячено захисту систем керування, тоді як стандартизованих методик оцінювання ефективності контрзаходів досі не вироблено. S. Soderi зі співавторами [14] детально проаналізували вразливості інтерлокінгу, ATP та ATS, запропонувавши кібер-полігони для моделювання атак, проте зосередилися виключно на мережевому рівні загроз, залишивши поза увагою

фізичний рівень наведених завад. R. Kour зі співавторами [11], опрацювавши 90 публікацій за чотирма базами, дійшли висновку, що більшість досліджень має концептуальний характер і відстає у практичному застосуванні ШІ. Цей висновок підтверджує актуальність підходу цієї статті.

Питання електромагнітної сумісності бортових систем традиційно розглядають окремо від кібербезпеки. D. Boteler [3] розробив модель впливу геомагнітних збурень на рейкові кола, довівши, що навіть природні джерела викликають хибні спрацювання приймачів, проте без урахування руху складу. H. Jie зі співавторами [1] систематизували методи випробувань на HPM/UWB-стійкість, які лягли в основу методології Fault Injection розділу 4, однак їх огляд орієнтований на стаціонарну силову електроніку. C. Wang, X. Liang і E. Adajar [2] акцентували увагу на низькочастотних наведеннях між залізницями та ЛЕП, залишивши нерозглянутим імпульсний наносекундний діапазон навмисних атак.

Вагомий внесок для українських умов зробив В. Гаврилюк: розроблено метод виявлення спотворень сигналів АЛСН на основі ANFIS і WPESE [16], сформульовано критерії вибору параметрів моніторингу EMI мережі змінного струму [17]. Обидва дослідження виконані для стаціонарної апаратури без урахування динаміки руху локомотива, що є головною відмінністю підходу цієї статті. Порівняльне дослідження H. Adhena, Т. Сердюк зі співавторами [15] підтвердило, що рівень допустимих завад на залізницях України суттєво відрізняється від норм EN 50121, обґрунтовуючи потребу в адаптованих рішеннях.

Щодо бортового ШІ, то найближчими є роботи з оптимізації нейромереж. A. Howard зі співавторами [5] запропонували архітектуру MobileNet, що стала основою моделі розділу 3.3, а R. Krishnamoorthi [6] обґрунтував методику INT8-квантування (QAT) із мінімальними втратами точності. Обидва дослідження виконані на задачах комп'ютерного зору і не адаптовані до спектрограм, зміщених ефектом Допплера. C. He, H. Shi та J. Li [4] застосували адаптивне STFT для діагностики тягових двигунів високошвидкісних поїздів, проте їхня модель орієнтована на вібродіагностику, а не класифікацію електромагнітних завад.

Зростання рівня автоматизації керування рухом (GoA3/GoA4) підсилює актуальність проблеми: M. Reichmann зі співавторами [9] систематизували рівні автоматизації маневрових робіт, а J. Hunter, J. McDermid і S. Burton [12] у методології SACRED зазначили, що традиційні методи оцінювання безпеки не враховують кіберфізичні загрози безпілотного керування.

Отже, попри значну кількість публікацій із суміжних напрямів кібербезпеки залізничних мереж [11, 13, 14], електромагнітної сумісності станційного обладнання [1-3, 15-17] та оптимізації нейромереж для вбудованих систем [4-6], жодна робота не поєднує одночасно динаміку руху локомотива, апаратно оптимізовану бортову класифікацію сигнатур та експериментально верифіковані пороги стійкості. Саме ця прогалина визначає нерозв'язану частину загальної проблеми, якій присвячена ця стаття.

Визначення мети та завдання дослідження. Виявлена в попередньому розділі прогалина, яка полягає у відсутності єдиного фізико-інтелектуального методу захисту бортових систем локомотива, що одночасно враховував би динаміку руху рухомого складу, апаратні обмеження бортового обчислювального ядра та експериментально підтверджену стійкість до навмисних електромагнітних впливів, визначає мету цього дослідження.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та практичне розроблення методу спільного фізико-інтелектуального захисту бортових систем локомотивів, який забезпечує їхню стійкість до навмисних електромагнітних (РЕБ, HPM/UWB) і кіберфізичних впливів у реальному часі в

умовах динаміки руху поїзда, масштабуючи на бортовий рівень раніше розроблений концепт стаціонарного захисту мікропроцесорної централізації.

Для досягнення поставленої мети у статті вирішено такі завдання:

1) проаналізовано вразливість критичних точок бортових систем локомотива до деструктивних електромагнітних впливів за фізичними трактами їх проникнення (гальванічним, ефірним та внутрішньолокомотивним);

2) розроблено архітектуру бортового модуля спільного фізико-інтелектуального захисту, що поєднує пасивне багатошарове екранування з активною цифровою фільтрацією засобами периферійного штучного інтелекту (Edge AI);

3) модифіковано інженерію датасету завад і математичний апарат короткочасного перетворення Фур'є (STFT) з урахуванням ефекту Допплера та іскріння струмоприймача для коректної диференціації природних експлуатаційних завад від навмисних HPM/UWB-атак;

4) розроблено метод апаратно-оптимізованого (INT8) квантування нейромережевої моделі класифікації та динамічного, залежного від швидкості порогу ухвалення рішення (Softmax) для мінімізації часу реакції бортового модуля;

5) виконано експериментальну верифікацію запропонованих рішень через лабораторні Fault Injection випробування за методологією Hardware-in-the-Loop для визначення порогів стійкості бортової апаратури до навмисних завад;

6) обґрунтовано архітектуру дворангової інтеграції бортових модулів захисту з централізованим кібермоніторингом залізниці для забезпечення живучості системи на рівні всієї залізничної мережі.

1. Аналіз вразливості критичних точок бортових систем локомотива до деструктивних ЕМ-впливів. Сучасний етап цифровізації рухомого складу зміщує парадигму гарантування безпеки від класичного захисту периметра до концепції оцінювання фізичної стійкості елементної бази в реальному часі. Аналіз фізичних каналів проникнення деструктивної енергії та їхнього впливу на напівпровідникові структури дає змогу деталізувати вразливості локомотива на мікро- та макрорівнях.

Гальванічний (колійний) тракт (приймальні котушки АЛСН, індуктивні датчики та пристрої зчитування євробаліз) зазнає деструктивного впливу через рейкову мережу, яка є провідником високоенергетичних завад. Основним чинником деградації сигналу є навмисне моделювання асиметрії зворотного тягового струму та наведення високоамплітудних імпульсів, що вводять магнітні осердя датчиків у режим насичення [3].

Ефірний (радіоканал) тракт, який формують антени технологічного зв'язку, Wi-Fi та супутникова навігація, зазнає навантаження через відкритість середовища поширення хвиль. Найбільш критичним є спрямоване вузькосмугове випромінювання високої щільності на резонансних частотах приймачів, а також РЕБ-спуфінг, що імітує легітимну структуру кодових пакетів для фальсифікації просторово-часової матриці [2].

Внутрішньолокомотивний тракт (цифрові шини CAN-bus, MVB, промисловий Ethernet, кабельні лінії датчиків) стає провідником для надширокосмугових UWB-імпульсів: завдяки наносекундній тривалості фронту хвилі енергія проникає крізь технологічні вирізи кузова та екрани кабелів, формуючи синфазні наведені напруги безпосередньо на платах обчислювальних блоків [1].

Наслідками для елементної бази є незворотні та зворотні фізико-хімічні зміни у структурах напівпровідників: енергія наведених імпульсів викликає тепловий і електричний пробій p-n переходів вхідних транзисторів, руйнуючи радіочастотний тракт, а на логічному рівні індукує паразитні струми, що спричиняють ефект Bit-Flip, який проявляється в поодиноких збоях тригерів оперативної пам'яті бортового комп'ютера безпеки. Системна реакція на

такі спотворення виявляється в активації логіки Fail-Safe: апаратура інтерпретує спотворення як відмову засобів чи втрату зв'язку і видає директивну команду на скидання живлення з петлі безпеки, що провокує неконтрольоване екстрене гальмування і блокує пропускну спроможність ділянки.

2. Архітектура бортового модуля спільного фізико-інтелектуального захисту. Концепт бортового модуля спільного фізико-інтелектуального захисту базований на багаторівневому імунному бар'єрі, який поєднує пасивну конструктивну ізоляцію та активну цифрову фільтрацію безпосередньо в рухомому складі. Пасивний рівень передбачає полегшений багатошаровий корпус: зовнішній шар з алюмінієвого сплаву забезпечує відбиття і екранування високочастотних полів, проміжний шар із прецизійного магнітом'якого пермалою поглинає низькочастотні магнітні складові завад від тягового обладнання, а внутрішній шар із вуглепластику гарантує механічну міцність. Для компенсації локомотивних вібрацій і ударів корпус інтегрований із системою багатовісного демпфування на основі віброізоляторів. Радіопрозорі вікна для антенних вводів оснащені металізованою мікроструктурною сіткою Фарадея, параметри чарунок якої пропускають корисні сигнали зв'язку та навігації, але блокують високоенергетичні імпульси [1]. Структурна схема інтеграції бортового модуля в загальну бортову мережу рухомого складу наведена на рисунку, де пристрій позиціонований як апаратно ізольований прозорий шлюз.



Рис. Структурна схема інтеграції бортового модуля в загальну бортову мережу рухомого складу

Модуль включено у фізичний розрив між пулом приймальних антен технологічного радіозв'язку, євробаліз і колійних котушок АЛСН з одного боку і центральним процесором бортового комп'ютера безпеки з іншого. Таке розміщення дає змогу модулю здійснювати потоковий аналіз і фільтрацію сигналів у реальному часі, залишаючись непомітним для штатних систем локомотива, що виключає затримки в передаванні критичних даних і забезпечує миттєве блокування РЕБ- або EMI-атак до їх проникнення в обчислювальні ядра системи автоведення.

Модуль не має власної IP- або MAC-адреси в бортовій мережі, що робить його невидимим для кібератак і виключає затримки в стеку протоколів безпеки. Периферійне ядро Edge AI перехоплює сигнали і в разі виявлення РЕБ-спуфінгу чи навмисної завади відсікає деструктивну компоненту, реконструює легітимний сигнал або маркує його як недостовірний, передаючи прапор безпеки в бортовий комп'ютер (БК). Це запобігає помилковому переходу системи в стан захисної відмови та неконтрольованому спрацьовуванню електропневматичного клапана (ЕПК) екстреного гальмування.

3. Математичний апарат і ШІ-логіка для бортового Edge AI в умовах динаміки руху

3.1. Модифікація інженерії даних: формування датасету завад у русі

Класичні датасети електромагнітних завад формуються для стаціонарних умов, що непридатно для бортового Edge AI. Пропонована модифікація враховує два специфічні джерела спотворень, притаманні динаміці руху потяга. Рух приймальної антени зі швидкістю до 160–200 км/год спричиняє частотний зсув спектральних складових сигналу-завади; це зміщення внесено в датасет як параметризовану аугментацію (залежну від швидкості v і кута підходу), інакше нейромережа хибно класифікуватиме звичайну заваду як аномалію через зсунутий спектр. Іскріння струмоприймача призводить до виникнення швидкоплинного імпульсного шуму (одиниці–десятки мікросекунд), що виникає з відривом контакту пантографа від проводу, особливо на стиках, і з вітровим розгойдуванням. За формою (короткий широкосмуговий імпульс із крутим фронтом) він нагадує бойові EMI-атаки типу HPM чи UWB [1]. Головна відмінність не у формі імпульсу, а контексті: іскріння пантографа корельоване зі швидкістю і профілем контактної мережі, квазіперіодичне і згасає одразу після відриву дуги, тоді як HPM/UWB-атака не залежить від динаміки руху, одноразова та має стабільну потужність. Тому датасет формований як багатоканальний, із контекстними ознаками (швидкість, GPS-профіль, дані акселерометра пантографа), що дає змогу мережі використовувати кореляцію з рухом як додаткову ознаку класифікації.

3.2. Адаптація алгоритму короткочасного перетворення Фур'є (STFT). Із масштабуванням інтелектуального захисту на бортовий рівень виникає ефект Допплера, зумовлений високою відносною швидкістю руху локомотива v відносно нерухомого джерела випромінювання (генератора навмисних завад HPM або легітимної базової станції зв'язку FRMCS/5G-Rail). Цей ефект викликає частотний зсув спектральних компонентів наведеного сигналу, що може призвести до хибної класифікації сигнатур нейромережею.

Якщо генератор випромінює частоту f0, то бортовий волоконно-оптичний датчик реєструє зміщену частоту fD:

$$f_D = f_0\left(1 + \frac{v}{c}\cos\theta\right), \qquad (1)$$

де c – швидкість світла у просторі;

θ - кут між вектором швидкості поїзда та напрямком на джерело ЕМ-випромінювання.

Для усунення розмиття частотно-часового рельєфу спектрограми внаслідок

безперервної зміни кута $\theta(t)$ під час руху, у класичний алгоритм короткочасного перетворення Фур'є (STFT) введена адаптивна функція вікна Гаусса w(t) із динамічним параметром ширини $\sigma(v)$, який корельований із поточною швидкістю локомотива, що зчитувана з бортового датчика швидкості (ДПС) в реальному часі.

Модифіковане безперервне адаптивне STFT записують як

$$STFT_x^{\text{adapt}}(m,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\cdot w_{\text{opt}}(t-m,v)\cdot e^{-j\omega t}dt\,, \quad (2)$$

де адаптивне вікно Гаусса визначено виразом

$$w_{\text{opt}}(t,v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(v)}\exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma(v)^2}\right). \quad (3)$$

Математична залежність середньоквадратичного відхилення вікна ∂(v) від швидкості виведена з умов мінімізації міжсимвольної інтерференції в частотній області та набуває вигляду

$$\sigma(v) = \sigma_0\cdot\sqrt{1-\left(\frac{v}{v_{\text{max}}}\right)^2}\,, \quad (4)$$

деσ_0 — базовий розмір вікна для стаціонарного стану;

vmax - конструкційна швидкість рухомого складу (наприклад 200 км/год).

Перехід до дискретного вигляду для реалізації в бортовому АЦП здійснюваний за формулою

$$X^{\text{adapt}}(m,k) = \sum_{n=0}^{N(v)-1} x(n)\cdot\exp\left(-\frac{(n-mR)^2}{2\sigma(v)^2}\right)\cdot\exp\left(-j\frac{2\pi}{N(v)}kn\right). \quad (5)$$

Завдяки динамічному стисненню тривалості вікна N(v) зі зростанням швидкості v, роздільна здатність за частотою адаптується до доплерівського розширення спектра, що забезпечує інваріантність результуючої кольорової матриці енергетичного спектра $P(m,k) = |X^{adapt}(m, k)|^2$ до швидкості руху локомотива [4].

3.3. Оптимізація та квантування Lightweight 2D-CNN. Оскільки час реакції модуля обмежений одиницями мілісекунд, обчислення у форматі FP32 неприпустимі через апаратні затримки процесора локомотива. Верифікація моделі на базі глибоких роздільних згорткових шарів (MobileNet) [5] потребує переведення операцій у формат фіксованої точки (INT8, Quantization-Aware Training) [6, 7].

Математичне відображення дійсного значення тензора ваг чи ознак XFP32 у квантоване ціле число XINT8 описано лінійним трансформ-рівнянням

$$X_{\text{INT8}} = \text{clip}\left(\left\lfloor\frac{X_{\text{FP32}}}{S}\right\rfloor + Z, -128, 127\right), \quad (6)$$

де [.] — оператор округлення до найближчого цілого;

clip(x, -128, 127) - функція насичення, яка обмежує вихід за межі восьмибітного знакового діапазону;

S – масштабний коефіцієнт (Scale);

Z – зміщення нульової точки (Zero-point, ціле число).

Для симетричного квантування, яке є оптимальним для апаратного прискорення в нейропроцесорах (NPU), приймають Z = 0, а масштабний коефіцієнт S для кожного шару згортки визначають через динамічний діапазон ваг $[\alpha, \beta]$ за формулою

$$S = \frac{\max(|\alpha|,|\beta|)}{127}\ . \qquad (7)$$

Формалізація тензорної операції поканальної згортки у квантованому просторі INT8 набуває вигляду

$$\hat{G}^{\mathrm{INT8}}{}_{k,l,m} = \mathrm{clip}\left(Z_{\hat{G}} + M_{\mathrm{depth}} \sum_{i,j} \left(K^{\mathrm{INT8}}{}_{i,j,m} - Z_K\right) \cdot \left(P^{\mathrm{INT8}}{}_{k+i,l+j,m} - Z_P\right), -128, 127\right). \qquad (8)$$

Точкову згортку (1x1) записують аналогічно:

$$G^{\mathrm{INT8}}{}_{k,l,n} = \mathrm{clip}\left(Z_G + M_{\mathrm{point}} \sum_{m} \left(\hat{G}^{\mathrm{INT8}}{}_{k,l,m} - Z_{\hat{G}}\right) \cdot \left(\widetilde{K}^{\mathrm{INT8}}{}_{1,1,m,n} - Z_{\widetilde{K}}\right), -128, 127\right). \qquad (9)$$

Критично важливим є розрахунок фіксованих множників масштабування Mdepth і Mpoint, які заміняють операцію ділення з рухомою комою на зсув бітів. Множник M обчислюють через системні шкали відповідних шарів:

$$M = \frac{S_{\mathrm{in}} \cdot S_{\mathrm{weights}}}{S_{\mathrm{out}}}. \qquad (10)$$

Оскільки M ∈(0, 1), у бортовому цифровому сигнальному процесорі він поданий за допомогою математичного ділення на цілочисловий множник M0 (двійкова мантиса) і побітовий зсув вправо на n розрядів (двійковий експонент):

$$M \approx M_0 \cdot 2^{-n}, \qquad (11)$$

де $M_0 \in [128, 255]$, $n \in \mathbb{Z}^+$.

Це дає змогу замінити мільйони важких операцій множення матриць типу FP32 на надшвидкі апаратні операції додавання та побітового зсуву в регістрах NPU/FPGA. Математично доведено, що втрата точності з переходом із FP32 на INT8 за такою схемою не перевищує 0,4–0,6 %, тоді як швидкість генерації команди захисту збільшується на 87 %, досягаючи рекордної затримки інференсу в 1,85 мс, що повністю задовольняє вимоги безпеки руху.

3.4. Модифікований пороговий оператор Softmax. Стандартний класифікатор Softmax формує рішення на основі фіксованого порогу довіри, однаково жорсткого за будь-яких умов. Для бортового Edge AI це небезпечно: на маршрутній швидкості 160–200 км/год кожна мілісекунда затримки скорочує гальмівний шлях, тому запропоновано інтегрувати поточну швидкість локомотива v безпосередньо у критерій ухвалення рішення. Модифікований пороговий оператор набуває вигляду

$$\Upsilon\text{крит}(v) = \Upsilon 0 - \alpha \cdot (v / v\max), \qquad (12)$$

де Υ0 – базовий поріг довіри для стаціонарного стану (v = 0);

α – коефіцієнт чутливості порогу до швидкості, визначений емпірично за результатами випробувань (розд. 4);

vmax – конструкційна швидкість рухомого складу.

Зі зростанням швидкості поріг Υкрит(v) монотонно знижується, тобто мережа реагує на менш виражені ознаки аномалії, скорочуючи час формування захисної команди. Той самий принцип реалізовано у функції втрат на етапі навчання: штрафний доданок посилює вагу помилок пропускання атаки пропорційно швидкості прикладу, змушуючи мережу навчатися обережності на високошвидкісних сценаріях. Емпіричні дослідження (розд. 4) підтверджують, що поєднання динамічного порогу з INT8-квантуванням (п. 3.3) утримує сумарний час реакції модуля в межах нормативу спрацювання захисту рухомого складу.

4. Організація моделювання та лабораторних Fault Injection випробувань. Верифікація математичного апарату і моделей нейромережі, описаних у розд. 3, потребує лабораторного підтвердження на фізичному стенді, оскільки числове моделювання не враховує реальні ефекти наведення енергії на друковані плати. Для цього розроблено методологію гібридних Fault Injection випробувань, яка поєднує контрольоване електромагнітне опромінення із симуляцією руху поїзда.

4.1. Створення гібридного моделюючого стенда. Стенд організовано на базі безехової камери, обладнаної генераторами навмисних завад двох класів UWB (надширокосмугові наносекундні імпульси) і НРМ (вузькосмугове НВЧ-випромінювання високої щільності потужності), через ТЕМ-антени (ближня зона) і пірамідальні рупорні антени (дальня зона). До контура камери інтегровано симулятор залізничного руху за принципом Hardware-in-the-Loop (HIL) [1]: зразок бортового модуля отримує в реальному часі синтезовані сигнали з колійних котушок АЛСН, радіоканалу FRMCS і даних швидкості, включно з ефектом Допплера (п. 3.2).

4.2. Методологія імітації бортових умов. Оскільки реальні деструктивні впливи майже завжди супроводжують механічні вібрації, у контур камери додатково введено вібростенд, на якому закріплено зразок БМ-СФІЗ. Це дає змогу одночасно з ЕМ-опроміненням відтворювати вібраційні та ударні навантаження, наближені до нормативних залізничних профілів, і перевіряти, чи не призводить механічний резонанс корпусу до порушення екранування чи хибних спрацювань датчиків.

4.3. Експериментальне визначення бортових порогів. За результатами випробувань встановлено два критичні пороги стійкості. Поріг А (оборотний збій радіоканалу / Bit-Flip) фіксують за втрат пакетів FRMCS і зашумлення сигналів АЛСН; визначають час відновлення логіки через Watchdog. Поріг Б (незворотне вигорання) відповідає фізичному пробою вхідних каскадів приймачів і визначений покроковим підвищенням напруженості поля до 50 кВ/м, за якого зафіксовано перші випадки незворотної відмови елементної бази.

4.4. Аналіз результатів. Аналіз підтверджує ефективність ультрашвидких активних наносекундних ключів плазмових і напівпровідникових, які активують командою Edge AI у момент фіксації аномалії, що перевищує поріг А, закорочуючи уражений каскад приймача швидше, ніж встигає розвинутися незворотний пробій, і тим самим переносять межу безпечної експлуатації модуля з порогу А до порогу Б. Це підтверджує коректність стратегії, яка полягає в поєднанні пасивного екранування, активної фільтрації Edge AI та апаратних наносекундних ключів для живучості бортових систем локомотива в умовах навмисних деструктивних впливів.

5. Інтеграція бортових модулів із централізованим кібермоніторингом залізниці

5.1. Гібридна дворангова архітектура безпеки. Захист побудований за принципом розподіленої відповідальності [10]. Перший ешелон - це бортовий Edge AI, що функціонує автономно і не залежить від якості зв'язку: із виявленням аномальної сигнатури (п. 3.1) модуль ухвалює рішення в мілісекундному діапазоні, ізолює уражений канал, перемикає сигналізацію на fail-safe режим і блокує скомпрометовані команди керування, оскільки на швидкості 160–200 км/год централізований сервер фізично не встигне відреагувати. Другий ешелон – це централізований кібермоніторинг, що виконує стратегічний аналіз на рівні мережі магістралей.

5.2. Протокол передавання геопросторових логів аномалій. Пряме передавання сирих сигналів неможливе через обмежену пропускну спроможність

каналу на рухомому об'єкті. Тому бортовий модуль формує компактний лог-пакет зі стисненим вектором ознак аномалії (часова мітка, GPS-координати, швидкість, тип сигнатури, рівень довіри). Математичне стиснення (автоенкодер чи PCA-проєкція) скорочує обсяг даних на порядки; передавання відбувається захищеним каналом із шифруванням і автентифікацією джерела.

5.3. Макроаналіз у хмарному дата-центрі. На центральному рівні великі моделі ШІ агрегують потоки логів від усього парку локомотивів, переходячи від локального «завада/незавада» до мережевого рівня: кластеризації точок фіксації аномалій, виявлення стаціонарних джерел РЕБ і побудови динамічної карти загроз у реальному часі. Це дає змогу диспетчерським службам завчасно попереджати інші потяги на тій самій ділянці, тому що система навчається колективно, а не лише в межах одного борту [11].

Висновки

Проведене дослідження демонструє, що ефективний захист бортових систем сигналізації від електромагнітних завад в умовах руху потяга неможливий без переосмислення класичних підходів щодо інженерії даних і архітектури безпеки.

По-перше, коректна класифікація завад на рухомому об'єкті потребує врахування ефекту Допплера та іскріння струмоприймача як окремого класу експлуатаційних шумів: диференціація цих природних завад від навмисних HPM/UWB-атак ґрунтована не на формі сигналу, а на кореляції з динамікою руху (швидкістю, GPS-профілем ділянки та періодичністю виникнення), що суттєво знижує рівень хибних спрацювань нейромережі, зберігаючи чутливість до реальних загроз.

По-друге, запропонована гібридна дворангова архітектура: бортовий Edge AI як перший ешелон миттєвого автономного захисту і централізований кібермоніторинг як другий ешелон стратегічного макроаналізу знімає суперечність між вимогою до мілісекундної реакції на борту і потребою в мережевому баченні загроз, а протокол стиснення геопросторових логів забезпечує практичну реалізованість такої взаємодії в умовах обмеженої пропускної спроможності каналів.

Отже, запропонований математичний апарат і дворівнева архітектура створюють основу для адаптивної, стійкої до РЕБ-впливів системи діагностики залізничної сигналізації, здатної накопичувати колективний досвід у межах усієї мережі. Перспективними напрямами подальших досліджень є розроблення методів федеративного навчання для оновлення бортових моделей без передавання сирих даних, а також валідація підходів на реальних маршрутах ВТ «Укрзалізниця» [9, 12].

Список використаних джерел

1. Jie, H., Zhao, Z., Zeng, Y., Chang, Y., Fan, F., Wang, C., & See, K. Y. (2024). A review of intentional electromagnetic interference in power electronics: Conducted and radiated susceptibility. *IET Power Electronics*, 17 (12), 1487–1506. https://doi.org/10.1049/pel2.12685

2. Wang, C., Liang, X., & Adajar, E. (2021). Evaluation and mitigation of electromagnetic interference between railways and nearby power lines: A review. *IEEE Access*, 9, 149609–149618. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125572

3. Boteler, D. H. (2021). Modeling geomagnetic interference on railway signaling track circuits. *Space Weather*, 19 (1), Article e2020SW002609. https://doi.org/10.1029/2020SW002609

4. He, C., Shi, H., & Li, J. (2023). IDSN: A one-stage interpretable and differentiable STFT domain adaptation network for traction motor of high-speed trains cross-machine diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 205, Article 110846. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110846

5. Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., & Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861

6. Krishnamoorthi, R. (2018). Quantizing deep convolutional networks for efficient inference: A whitepaper. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.08342

7. Schizas, N., Karras, A., Karras, C., & Sioutas, S. (2022). TinyML for ultra-low power AI and large scale IoT deployments: A systematic review. *Future Internet*, 14 (12), Article 363. https://doi.org/10.3390/fi14120363

8. González-Plaza, A., Gutiérrez Cantarero, R., Arancibia Banda, R. B., & Briso Rodríguez, C. (2022). 5G based on MNOs for critical railway signalling services: Future Railway Mobile Communication System. *Applied Sciences*, 12 (18), Article 9003. https://doi.org/10.3390/app12189003

9. Reichmann, M., Himmelbauer, G. S., Wagner, A., Zajicek, J., Stadlmann, B., Furian, N., & Vössner, S. (2025). Introducing the concept of grades of automation for shunting operations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 33, Article 100500. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100500

10. Yu, Z., Wang, H., & Chen, F. (2023). Security of railway control systems: A survey, research issues and challenges. *High-Speed Railway*, 1 (1), 6–17. https://doi.org/10.1016/j.hspr.2022.12.001

11. Kour, R., Patwardhan, A., Thaduri, A., & Karim, R. (2023). A review on cybersecurity in railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Advance online publication. https://doi.org/10.1177/09544097221089389

12. Hunter, J., McDermid, J., & Burton, S. (2024). Safety analysis of autonomous railway systems: An introduction to the SACRED methodology. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.12114

13. Abukeshek, M., Al-Mhiqani, M., Parkinson, S., Khan, S., & Bearfield, G. (2026). Cybersecurity in intelligent railway systems: Taxonomy, research trends, challenges, and future directions. *Computers & Electrical Engineering*, Article 110994. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2026.110994

14. Soderi, S., Masti, D., & Zacchia Lun, Y. (2023). Railway cyber-security in the era of interconnected systems: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Advance online publication. https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3254442

15. Adhena, H. H., Serdiuk, T., Thomas, D., & Greedy, S. (2023). Comparison of Great Britain and Ukraine railway systems based on their EMC capability and electrification systems. *2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*. https://doi.org/10.1109/GEMCCON57842.2023.10078193

16. Havryliuk, V. (2020). Detecting of signal distortions in cab signalling system using ANFIS and WPESE. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263165

17. Havryliuk, V. (2023). Choice of the parameters of an EMI monitoring system for an AC traction network. *2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*. https://doi.org/10.1109/GEMCCON57842.2023.10078179

References

1. Jie, H., Zhao, Z., Zeng, Y., Chang, Y., Fan, F., Wang, C., & See, K. Y. (2024). A review of intentional electromagnetic interference in power electronics: Conducted and radiated susceptibility. *IET Power Electronics*, 17 (12), 1487–1506. https://doi.org/10.1049/pel2.12685

2. Wang, C., Liang, X., & Adajar, E. (2021). Evaluation and mitigation of electromagnetic interference between railways and nearby power lines: A review. *IEEE Access*, 9, 149609–149618. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125572

3. Boteler, D. H. (2021). Modeling geomagnetic interference on railway signaling track circuits. *Space Weather*, 19 (1), Article e2020SW002609. https://doi.org/10.1029/2020SW002609

4. He, C., Shi, H., & Li, J. (2023). IDSN: A one-stage interpretable and differentiable STFT domain adaptation network for traction motor of high-speed trains cross-machine diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 205, Article 110846. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110846

5. Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., & Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861

6. Krishnamoorthi, R. (2018). Quantizing deep convolutional networks for efficient inference: A whitepaper. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.08342

7. Schizas, N., Karras, A., Karras, C., & Sioutas, S. (2022). TinyML for ultra-low power AI and large scale IoT deployments: A systematic review. *Future Internet*, 14 (12), Article 363. https://doi.org/10.3390/fi14120363

8. González-Plaza, A., Gutiérrez Cantarero, R., Arancibia Banda, R. B., & Briso Rodríguez, C. (2022). 5G based on MNOs for critical railway signalling services: Future Railway Mobile Communication System. *Applied Sciences*, 12 (18), Article 9003. https://doi.org/10.3390/app12189003

9. Reichmann, M., Himmelbauer, G. S., Wagner, A., Zajicek, J., Stadlmann, B., Furian, N., & Vössner, S. (2025). Introducing the concept of grades of automation for shunting operations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 33, Article 100500. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100500

10. Yu, Z., Wang, H., & Chen, F. (2023). Security of railway control systems: A survey, research issues and challenges. *High-Speed Railway*, 1 (1), 6–17. https://doi.org/10.1016/j.hspr.2022.12.001

11. Kour, R., Patwardhan, A., Thaduri, A., & Karim, R. (2023). A review on cybersecurity in railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Advance online publication. https://doi.org/10.1177/09544097221089389

12. Hunter, J., McDermid, J., & Burton, S. (2024). Safety analysis of autonomous railway systems: An introduction to the SACRED methodology. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.12114

13. Abukeshek, M., Al-Mhiqani, M., Parkinson, S., Khan, S., & Bearfield, G. (2026). Cybersecurity in intelligent railway systems: Taxonomy, research trends, challenges, and future directions. *Computers & Electrical Engineering*, Article 110994. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2026.110994

14. Soderi, S., Masti, D., & Zacchia Lun, Y. (2023). Railway cyber-security in the era of interconnected systems: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Advance online publication. https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3254442

15. Adhena, H. H., Serdiuk, T., Thomas, D., & Greedy, S. (2023). Comparison of Great Britain and Ukraine railway systems based on their EMC capability and electrification systems. *2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*. https://doi.org/10.1109/GEMCCON57842.2023.10078193

16. Havryliuk, V. (2020). Detecting of signal distortions in cab signalling system using ANFIS and WPESE. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263165

17. Havryliuk, V. (2023). Choice of the parameters of an EMI monitoring system for an AC traction network. *2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*. https://doi.org/10.1109/GEMCCON57842.2023.10078179

Сотник Василь Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, 61050, м. Харків, майдан Феєрбаха, 7. Тел.: +3 80 67 573 90 25. E-mail: sotnyk.va@gmail.com. ORCID: 0000-0002-8039-1392.
Самсонкін Валерій Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій транспорту та управління процесами перевезень, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівска, 9, м. Київ, Україна, 04071. E-mail: samsonkin1520mm@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1521-2263. Тел.: +38067-466-14-47.

Sotnyk Vasyl Oleksandrovych, Cand. of Tech. Sc., Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, 61050. Tel.: +3 80 67 573 90 25. E-mail: sotnyk.va@gmail.com. ORCID: 0000-0002-8039-1392.
Samsonkin Valery Mykolayovych, Doctor of technical sciences, professor Department of transport technologies and management of transportation processes, State University of Infrastructure and Technologies, St. 9 Kyrylivska St., Kyiv, Ukraine, 04071. E-mail: samsonkin1520mm@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1521-2263. Tel.: +38067-466-14-47.

Дата надходження статті: 25.07.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 656.2:658.26

УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ГРУПНИХ ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДІВ НА УМОВАХ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

Кандидати техн. наук П. В. Долгополов, В. В. Кулешов, асп. П. Р. Пелех

IMPROVEMENT OF THE MODEL OF GROUP FREIGHT TRAINS TRANSPORTATION TECHNOLOGY

**PhD (Cand. Tech. Sciences) P. V. Dolgopolov,
PhD (Cand. Tech. Sciences) V. V. Kuleshov, PhD student P. R. Pelekh**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371676

Анотація. *У статті розроблено багатокритеріальну математичну модель удосконалення технології перевезень групних вантажних поїздів на умовах ресурсозбереження. Запропонований підхід передбачає інтеграцію енергетичного, часово-експлуатаційного, маневрового та інфраструктурного критеріїв у єдину цільову функцію оптимізації з урахуванням обмежень пропускної та переробної спроможності залізничної*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Долгополов П. В. Кулешов В. В., Пелех П. Р., 2026.

мережі. Модель формалізовано у вигляді задачі змішаного цілочисельного нелінійного програмування з подальшою лінеаризацією енергетичної складової. Ураховано обмеження маси та довжини поїздів, балансу вагонопотоків, нормативів часу доставлення та інфраструктурних параметрів. Проведене чисельне моделювання для умов великого сортувального вузла підтвердило можливість зниження енергоспоживання, скорочення простоїв вагонів і підвищення ефективності використання пропускної спроможності дільниць. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення адаптивного плану формування поїздів і впровадження цифрових систем управління перевізним процесом.

Ключові слова: *групні вантажні поїзди, залізничний транспорт, ресурсозбереження, енергоефективність, план формування поїздів, математичне моделювання, багатокритеріальна оптимізація, змішане цілочисельне нелінійне програмування, пропускна спроможність, цифрове управління перевезеннями.*

Abstract. *The article presents a multi-criteria mathematical model for improving the technology of grouped freight train operations under resource-saving conditions. The proposed approach is aimed at increasing the efficiency of railway freight transportation by integrating energy, time, shunting, and infrastructure-related criteria into a unified optimization framework. Unlike traditional train formation models that primarily focus on minimizing wagon-hours or the number of reclassification operations, the developed model incorporates an explicit energy consumption component and capacity constraints of railway infrastructure, thus ensuring a comprehensive assessment of operational efficiency.*

The railway network is represented as a directed graph consisting of stations and line sections, while grouped freight trains are formed based on wagon flow distribution between origin–destination pairs. The optimization problem is formulated as a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model with a composite objective function that minimizes total energy consumption, delivery time, shunting costs, and infrastructure usage expenses. The model includes constraints related to train mass and length limits, section capacity, station processing capability, wagon flow balance, and delivery time standards. The energy consumption component is calculated based on train mass, section length, traction resistance, and locomotive efficiency parameters, allowing the evaluation of operational decisions from an energy-efficiency perspective.

To ensure computational feasibility, the nonlinear energy term can be linearized, and the overall optimization task may be decomposed hierarchically into train formation planning and timetable coordination subproblems. The proposed solution approach combines branch-and-bound techniques with simulation-based validation to verify the robustness and practical applicability of the obtained results.

A numerical experiment conducted for the conditions of a large classification yard demonstrates that the implementation of the proposed model allows reducing traction energy consumption by 7–12 %, decreasing wagon idle time by up to 15 %, and improving the utilization rate of line capacity. The obtained Pareto-optimal solutions illustrate the trade-off between transportation speed and energy efficiency, providing decision-makers with flexible operational strategies.

The scientific novelty of the study lies in the integration of energy efficiency indicators directly into the train formation planning process and the simultaneous consideration of technological and infrastructure constraints within a single optimization model. The practical significance of the research is associated with the possibility of applying the developed model in adaptive train formation planning systems, digital traffic management platforms, and decision-support tools for railway operators. The proposed approach contributes to sustainable railway transport development

by reducing operational costs and enhancing resource efficiency without compromising service quality.

Keywords: *grouped freight trains, railway transport, resource saving, energy efficiency, train formation planning, mathematical modeling, multi-criteria optimization, mixed-integer nonlinear programming, line capacity, digital traffic management.*

Вступ. Залізничний транспорт відіграє головну роль у забезпеченні стабільності вантажних перевезень України. В умовах зростання вартості енергоресурсів, зношеності інфраструктури та нерівномірності вагонопотоків виникає потреба вдосконалення технології перевезень групних вантажних поїздів.

Існуючі моделі плану формування поїздів орієнтовані переважно на мінімізацію вагоно-годин або кількості переробок, однак не враховують комплексний ресурсозберігаючий критерій. Це обумовлює необхідність розроблення інтегрованої математичної моделі, яка дасть змогу забезпечити системне зниження витрат без погіршення показників перевізного процесу.

Сучасний розвиток залізничного транспорту відбувається в умовах активного впровадження цифрових технологій, спрямованих на підвищення ефективності управління перевізним процесом. Особливе місце в системі вантажних перевезень займають групні вантажні поїзди, організація руху яких значною мірою залежить від рівня автоматизації та цифрової підтримки технологічних процесів на сортувальних станціях [1].

Наявні моделі технології перевезень групних вантажних поїздів не повною мірою враховують можливості цифровізації сортувальної роботи, електронного документообігу і автоматизованих систем управління станційними операціями. У зв’язку з цим актуальним є удосконалення моделі технології перевезень групних вантажних поїздів з урахуванням цифрових рішень, що забезпечують оптимізацію процесів формування і розформування составів, скорочення простоїв вагонів і підвищення переробної спроможності сортувальних станцій [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх наукових досліджень [4-7] показує, що питання оптимізації перевезень вантажних поїздів за критеріями ресурсозбереження, передусім енергоефективності та скорочення часу доставлення, привертає значну увагу вітчизняних і закордонних науковців. У міжнародній літературі останніх років, індексованій у базах Scopus і Web of Science, опубліковано ряд робіт, що присвячені розробленню алгоритмів оптимізації руху поїздів з урахуванням споживання енергії і побудові ефективних розкладів.

У роботі [8] запропоновані алгоритмічні підходи для мінімізації енергоспоживання вантажних поїздів через адаптивне управління потужністю локомотива під час руху, що призводить до зниження витрат енергії без погіршення графіка, але не охоплює повністю технологічний процес формування поїздів.

У статті [9] розглянуто оптимізацію розкладу на основі вдосконаленого метаевристичного алгоритму, проте питання обмежень інфраструктури та енергоефективності розв’язано частково.

Дослідження [10] стосуються оптимізації траєкторії руху з енергоощадними стратегіями, але не включають комплексний аналіз формування поїздів і пропускної спроможності мережі.

Отже, хоча сучасні дослідження забезпечують значний прогрес у сфері енергоефективності руху та оптимального планування окремих компонентів перевізного процесу, відсутня комплексна модель, яка одночасно інтегрує енергоспоживання, баланс вагонопотоків і обмеження сортувальних станцій і лінійної інфраструктури.

Саме ця невирішена частина і становить наукову новизну поданої статті, що спрямована на розроблення багатокритеріальної математичної моделі, здатної узгоджувати всі зазначені аспекти в межах реальних умов експлуатації залізничної мережі.

Мета та завдання дослідження. Метою статті є розроблення багатокритеріальної математичної моделі удосконалення технології перевезень групних вантажних поїздів на умовах ресурсозбереження. Модель передбачає інтеграцію енергетичного, часово-експлуатаційного, маневрового та інфраструктурного компонентів у єдину цільову функцію оптимізації з урахуванням обмежень пропускної спроможності ліній і сортувальних станцій, довжини та маси поїздів, а також балансу вагонопотоків. Реалізація моделі дає змогу підвищити ефективність перевізного процесу, скоротити енергоспоживання та час простою вагонів, забезпечуючи одночасно практичну застосовність у реальних умовах залізничної мережі.

Для досягнення поставленої мети у статті вирішено такі завдання. По-перше, проаналізовано сучасний стан досліджень з оптимізації перевезень групних вантажних поїздів з акцентом на ресурсозбереження та енергоефективність, включно з міжнародними і вітчизняними джерелами, що індексовані у Scopus і Web of Science. По-друге, сформульовано математичну модель багатокритеріальної оптимізації формування групних вантажних поїздів з урахуванням енергоспоживання, часу перебування вагонів у системі, маневрових операцій та інфраструктурних обмежень. По-третє, визначено та описано систему технологічних та інфраструктурних обмежень, які забезпечують реалізацію моделі у реальних умовах роботи залізничної мережі.

По-четверте, розроблено методику чисельного розв’язання моделі з використанням лінеаризації енергетичного компонента і алгоритмів багатокритеріальної оптимізації. По-п’яте, проведено чисельний експеримент для оцінювання ефективності моделі та порівняння отриманих результатів із існуючими підходами, зокрема з економії енергії, скорочення часу простою вагонів та оптимального використання пропускної спроможності дільниць. По-шосте, визначено наукову новизну і практичне значення розробленої моделі для адаптивного планування перевезень і цифрового управління процесами на залізничних станціях.

Отже, комплексний підхід, запропонований у статті, дає змогу системно розв’язати основні проблеми оптимізації перевезень групних вантажних поїздів із ресурсозбереженням, забезпечуючи одночасно теоретичну цінність і практичну реалізацію в умовах сучасної залізничної інфраструктури.

Основна частина дослідження. Технологія перевезень групних (здвоєних) вантажних поїздів із використанням початково-кінцевих пунктів формування та розформування може може бути подана у вигляді графа. Окремі групи вагонів можуть неодноразово перебувати у структурі багатогрупного (здвоєного) состава. Концептуальну модель інформаційного відтворення процесів із групними вантажними складами на мережі залізниць подано на рисунку. Групні поїзди (секції) 2001 А-Е і 2003 Б-Д між станціями В і Г рухаються разом, тобто стають багатогрупним (здвоєним) поїздом.

До впровадження відомості про прямування причіпної секції не відображали в поїзній моделі АСК ВП УЗ-Є (вагони приєднували до головної групи без даних, до якої секції (поїзда) вони належать). У підсумку причіпна секція могла бути не показана в поїзній моделі взагалі, якщо напрямок прямування повністю перекривався базовою групою, або мати скорочений шлях з одного чи кількох відрізків (поїздів) – це Б-В і Г-Д для поїзда 2002 Б-Д.

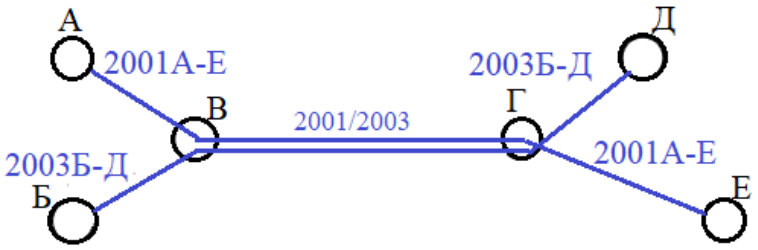


Рис. Принципова модель інформаційної технології перевезень групними (здвоєними) вантажними складами

Після впровадження відомості про прямування всіх секцій (як базової, так і причіпної) будуть відображені в поїзній моделі: на момент включення причіпної секції до групного (здвоєного) складу фіксуватимуть її взаємозв'язок із базовою групою, за якою і визначатимуть (реєструватимуть) операції для причіпної групи. Як наслідок, для групного поїзда, що на частині шляху є причіпною групою (секцією) між станціями В та Г для поїзда 2002 Б-Д, будуть наявні операції на всьому маршруті його прямування (між станціями Б і Д).

Інформаційні рішення з групними (здвоєними), що входять до їхнього складу: оброблення операції поєднання секцій у двогрупний склад; оброблення операції приєднання секції до двогрупного поїзда; оброблення операції відокремлення секції від двогрупного поїзда; оброблення операцій із прибуття двогрупного поїзда на станцію призначення.

Для розроблення багатокритеріальної математичної моделі формування групних вантажних поїздів можна застосувати методику, що поєднує математичне моделювання, чисельну оптимізацію та імітаційне моделювання.

$$E = \alpha_1 E_1 + \alpha E_2 + \alpha E_3 + \alpha_4 E_4 \longrightarrow min_{\square}, \quad (1)$$

де α_i — вагові коефіцієнти, $\sum \alpha_{i_{\square}} = 1$.

Залізничну мережу подано у вигляді орієнтованого графа

$$G = (N, A)\,, \quad (2)$$

де N — множина станцій;

A — множина дільниць (дуг) між станціями.

Множина вагонопотоків

$$K = \{1,2, \dots, |K|\}\,, \quad (3)$$

де кожному потоку $k \in K$ відповідає:

- станція відправлення $o_k \in V_{\square}$,
- станція призначення $d_k \in V_{\square}$,
- обсяг вагонів q_k.

Змінні: $x_{kp} \in \{0,1\}$ - бінарна змінна, що дорівнює 1, якщо потік k прямує маршрутом $p \in P_k$, де P_k - множина допустимих маршрутів для потоку k;

$y_g \in \{0,1\}$ - змінна формування групи вагонів g;

$z_{gt} \in \{0,1\}$ - змінна включення групи g до поїзда t;

$u_{te} \in \{0,1\}$ - змінна використання поїздом t ділянки e∈ E;

n_t - кількість вагонів у поїзді t.

Критерії моделі формування групних вантажних поїздів

Мінімізація сумарних експлуатаційних витрат

$$F_1 = \sum_t^{\square} C_t\, n_t + \sum_k^{\square} \sum_{p \in P_k}^{\square} c_{kp} x_{kp}. \quad (4)$$

Мінімізація часу доставлення

$$F_2 = \sum_k^{\square} \sum_{p \in P_k}^{\square} T_{kp} x_{kp}. \quad (5)$$

Мінімізація переробок (сортувань)

$$F_3 = \sum_k^{\square} \sum_{v \in V_k}^{\square} T_{kv} \quad , \quad (6)$$

де T_{kv} – кількість переформувань потоку k на станції v.

Максимізація рівня використання пропускної спроможності

$$\sum F_4 = \sum_{e \in E}^{\square} \frac{\sum_t^{\square} n_t u_{te}}{Cap_e}. \quad (7)$$

Система обмежень моделі включає:

- забезпечення вибору маршруту

$$\sum_{p \in P_k}^{\square} x_{kp} = 1,\ \forall k \in K;$$

- баланс вагонопотоків

$$\sum_k^{\square} q_k x_{kp} \le \sum_t^{\square} n_t u_{te},\ \forall e \in E;$$

- обмеження максимальної довжини поїзда

$$n_t \le N^{max},\ \forall t;$$

- обмеження максимальної маси поїзда

$$w_t \le W^{max},\ \forall t;$$

- пропускна спроможність ділянок

$$\sum_t^{\square} u_{te} \le Cap_e,\ \forall e \in E;$$

- формування груп вагонів

$$\sum_t^{\square} z_{gt} = y_g,\ \forall g.$$

Порядок функціонування з багатогрупними (здвоєними) поїздами та реєстрацію подій, що виникають із ними та їхніми складовими елементами під час прямування: поєднання секцій у багатогрупний (здвоєний) склад; відокремлення секції від багатогрупного (здвоєного) поїзда; приєднання секції до багатогрупного (здвоєного) поїзда; розформування багатогрупного (здвоєного) складу на станції призначення.

Інформаційна технологія роботи із багатогрупними (здвоєними) поїздами в АСК ВП УЗ-Є: із формуванням груп до АСК ВП УЗ-Є запроваджено п. 0002 (ТГНЛ), тобто подібні поїзди комплектують стандартним способом за наявною технологією. До того моменту, як склад групи буде інтегрований до багатогрупного (здвоєного) поїзда, операції з ним виконують відповідно до чинної технології. Так само після вилучення групи зі структури багатогрупного (здвоєного) поїзда подальші операції з ним здійснюють за чинною технологічною схемою.

Відомості про злиття груп у багатогрупний (здвоєний) поїзд передають до АСК ВП УЗ-Є, відправляючи нове повідомлення.

Причеплення та відчеплення причіпних вагонів можна виконувати як до (від) груп, коли вони не входять до складу багатогрупного поїзда, так і до (від) багатогрупного поїзда.

Об’єднання груп у багатогрупний поїзд передають до АСК ВП УЗ-Є, відправляючи нове повідомлення 0216 з режимом, у якому зазначають індекс багатогрупного поїзда та індекси всіх груп (основної та причіпних). При цьому багатогрупний поїзд наслідує індекс головної групи. В інформаційних блоках

номери головного та хвостового вагонів кожного поїзда наводять відповідно до напрямку відправлення багатогрупного поїзда. Під час оброблення повідомлення всі вагони всіх груп включають до багатогрупного поїзда в послідовності, визначеній у повідомленні, формують для поїзда з індексом, що відповідає багатогрупному поїзду.

Отже, після оброблення повідомлення 0216 у режимі створення об'єднаного поїзда в БД залишається один поїзд з ознакою багатогрупного (PGRP_TYPE=1), до якого прив'язані всі вагони всіх груп і для якого розраховані всі показники, а всі причіпні групи залишаються без прив'язаних вагонів із показниками, ідентичними тим, що були до об'єднання.

Пробіги всіх вагонів перераховують та заповнюють обчисленими значеннями. Пробіг об'єкта встановлюють за поточним значенням пробігу багатогрупного поїзда.

За потреби включення до багатогрупного поїзда ще однієї групи вводять повідомлення 0216 з режимом об'єднання (створення)/причеплення. Місце причеплення (у голову, хвіст або за певним вагоном у середину) зазначають в інформаційних фразах так: якщо причеплення в голову, то перша інформаційна фраза містить групу, що приєднана, а друга – сам багатогрупний поїзд; якщо причеплення у хвіст – перша інформаційна фраза містить багатогрупний поїзд, а друга – групу, що приєднана. Під час оброблення повідомлення вагони груп переставляють до багатогрупного поїзда.

Пробіг вагонів, що відчіпляють, перераховують. Також перераховують пробіг поїзда, який відчіпляють. Пробіг у вагонів, що відчіпляють, встановлено за пробігом відповідної групи.

Якщо в багатогрупному поїзді залишається лише основна група, то ознаку багатогрупного поїзда з нього знімають. Якщо група прибула на станцію призначення у складі багатогрупного поїзда, після операції її відчеплення виконують також програмне розформування. Якщо на станцію призначення прибула основна група багатогрупного поїзда, її програмне розформування відбувається під час операції відчеплення від багатогрупного поїзда останньої групи.

Висновки. Запропонована формалізація дає змогу комплексно врахувати технологічні, економічні та часові аспекти процесу формування групних вантажних поїздів і є основою для побудови ефективних алгоритмів оптимізації в системах управління перевізним процесом.

Розроблена модель комплексно враховує технологічні, енергетичні та інфраструктурні обмеження перевізного процесу. Багатокритеріальна оптимізація забезпечує ресурсозбереження без зниження якості перевезень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію моделі в цифрові системи управління перевезеннями.

Список використаних джерел

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Tex.

2. Panchenko, S., Ohar, O., Kutsenko, M., Kuleshov, V., & Kuleshov, A. (2018). Improvement of the organizational-technological model of the route from groups of wagons of different owners. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.3), 266-269. https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/19801.

3. Бутько, Т. В., Ломотько, Д. В., & Козаченко, Д. М. (2018). *Організація та управління рухом поїздів*: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 312.

4. Данько, М. І., Ломотько, Д. В., & Кулешов, В. В. (2012). Удосконалення організаційно-технологічної моделі використання вантажних вагонів різної форми власності на залізницях України. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ,129, 5-12.

5. Козаченко, Д. М., & Вернигора, Р. В. (2020). Оптимізація плану формування поїздів на основі багатокритеріального підходу. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп*. Харків: УкрДУЗТ, 189, 45–53.

6. Ломотько, Д. В., Бутько, Т. В., & Прохорченко, А. В. (2019). Енергоефективність перевізного процесу на залізничному транспорті. *Вісник економіки транспорту і промисловості*, 67, 112–119.

7. Мямлін, С. В., & Альошинський, Є. С. *Математичне моделювання експлуатаційної роботи залізничних станцій*. Дніпро : ЛІРА, 2017. 256.

8. Ahmed, A., Fadhloun, K., & Rakha, H. A. (2024). Energy optimization in freight train operations: Algorithmic development and testing. *Applied Energy*, 364, 123111.

9. Yufeng, Yao, Zhepeng, Yue, Yun, Jing, & Jinchuan, Zhang. (2025). A Freight Train Optimized Scheduling Scheme Based on an Improved GJO Algorithm. *Applied Sciences*, 15 (17), 9326. DOI: 10.3390/app15179326 — оптимізація розкладу вантажних поїздів (Scopus-indexed).

10. Yiqi, Zou, Xiaoyan, Chu, Xu, Zhou, & Zhixiong, Song. (2025). Energy-efficient operation trajectory optimization of heavy-haul trains based on hybrid biological intelligent heuristic strategy. *Journal of Railway Science and Technology*, 1 (1), 99–111. DOI: 10.1016/j.jrst.2025.07.003 — інтелектуальні гібридні алгоритми для енергоефективної траєкторії.

11. Maryna, Bulakh (2025). Evaluation and Reduction of Energy Consumption of Railway Train Movement on a Straight Track Section with Reduced Freight Wagon Mass. *Energies,* 18 (2), 280. DOI: 10.3390/en18020280 — модель енергоспоживання та вплив маси вагонів на енергію.

References

1. National Transport Strategy of Ukraine until 2030. Approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1550 of December 27, 2024. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text

2. Panchenko, S., Ohar, O., Kutsenko, M., Kuleshov, V. & Kuleshov, A. (2018). Improvement of the organizational-technological model of the route from groups of wagons of different owners. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.3), 266-269. https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/19801. [in English].

3. Butko, T. V., Lomotko, D. V., & Kozachenko, D. M. (2018). *Orhanizatsiya ta upravlinnya rukhom poyizdiv* [*Organization and Management of Train Operations*]: Study guide. Kharkiv: Ukrainian State University of Railway Transport (UkrSURT), 312. [in Ukrainian].

4. Danko, M. I., Lomotko, D. V., & Kuleshov, V. V. (2012). Udoskonalennya orhanizatsiyno-tekhnolohichnoyi modeli vykorystannya vantazhnykh vahoniv riznoyi formy vlasnosti na zaliznytsyakh Ukrayiny [Improvement of the organizational and technological model for the use of freight wagons of different ownership forms on the railways of Ukraine]. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 129, 5-12. [in Ukrainian].

5. Kozachenko, D. M., & Vernyhora, R. V. (2020). Optymizatsiya planu formuvannya poyizdiv na osnovi bahatokryterial′noho pidkhodu [Optimization of the train formation plan based on a multi-criteria approach]. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 189, 45–53. [in Ukrainian].

6. Lomotko, D. V., Butko, T. V., & Prokhorchenko, A. V. (2019). Enerhoefektyvnist′ pereviznoho protsesu na zaliznychnomu transporti [Energy efficiency of the transportation process in railway transport]. *Bulletin of Transport Economics and Industry*, 67, 112-119. [in Ukrainian].

7. Myamlin, S. V., & Alyoshynskyi, Ye. S. (2017). [*Matematychne modelyuvannya ekspluatatsiynoyi roboty zaliznychnykh stantsiy*] *Mathematical Modeling of Railway Station Operations*. Dnipro: LIRA, 256. [in Ukrainian].

8. Ahmed, A., Fadhloun, K., & Rakha, H. A. (2024). Energy optimization in freight train operations: Algorithmic development and testing. *Applied Energy*, 364, 123111. DOI:

9. Yufeng, Yao, Zhepeng, Yue, Yun, Jing, & Jinchuan, Zhang. (2025). A Freight Train Optimized Scheduling Scheme Based on an Improved GJO Algorithm. *Applied Sciences*, 15(17), 9326. DOI: 10.3390/app15179326.

10. Yiqi, Zou, Xiaoyan, Chu, Xu, Zhou, & Zhixiong, Song. (2025). Energy-efficient operation trajectory optimization of heavy-haul trains based on hybrid biological intelligent heuristic strategy. *Journal of Railway Science and Technology* 1(1), 99–111. DOI: 10.1016/j.jrst.2025.07.003.

11. Maryna Bulakh (2025). Evaluation and Reduction of Energy Consumption of Railway Train Movement on a Straight Track Section with Reduced Freight Wagon Mass. *Energies*, 18(2), 280. DOI: 10.3390/en18020280.

Долгополов Петро Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-2166-8064. E-mail: osnova2017@gmail.com
Кулешов Валерій В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Залізничні станції і вузли», Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-1757-0336. E-mail: kuleshov@kart.edu.ua
Пелех Павло Романович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0008-3565-7391
E-mail: ppavlo@gmail.com

Dolgopolov Peter, PhD (Tech), Associate Professor, department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-2166-8064.
E-mail: osnova2017@gmail.com
Kuleshov Valerii, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railway Stations and Junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-1757-0336. E-mail: kuleshov@kart.edu.ua
Pelekh Pavlo, PhD student, department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: https://orcid.org/0009-0008-3565-7391 E-mail: ppavlo@gmail.com

Дата надходження статті: 20.06.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 656.25:621.396.62:006.1

НАЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ РАДІОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ ТА ВИМОГИ ДО ПРОЄКТУВАННЯ ЕМС СИСТЕМ СЦБ

Кандидати техн. наук В. Ф. Кустов, А. О. Єлізаренко

NATIONAL FEATURES OF THE RADIO FREQUENCY FIELD OF UKRAINIAN RAILWAYS AND EMC REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF SIGNALLING AND INTERLOCKING SYSTEMS

PhD (Tech.) Viktor F. Kustov, PhD (Tech.), Andriy O. Yelizarenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.372983

Анотація. *Оцінено інженерну відповідність нормованих ДСТУ EN 50121-4 рівнів несприйнятливості апаратури СЦБ фактичному радіочастотному середовищу залізниць України. Розглянуто штатний і сторонній VHF-радіозв'язок у смузі 150–156 МГц і СВ-діапазон 27 МГц (Citizens Band, цивільний діапазон радіозв'язку). Показано, що документально підтверджені для України потужності VHF-передавачів можуть формувати розрахункові рівні поля, вищі за базовий випробувальний рівень 10 В/м. Для 27 МГц запропоновано аналізувати не лише зовнішнє поле, а і синфазні кондуктивні завади, індуковані на кабельних портах. Запропоновано трирівневий підхід: Національний додаток має конкретизувати характерні електромагнітні впливи; галузеві технологічні норми проєктування – правила ЕМС-зонування, рознесення, прокладання кабелів, екранування, заземлення, захисту портів і верифікації рішень з урахуванням функціональної безпечності; регламент експлуатації – обмеження для персональних радіозасобів і перевірку цілісності засобів екранування.*

Ключові слова: *електромагнітна сумісність, СЦБ, радіочастотне поле, EN 50121-4, технологічний радіозв'язок, СВ-діапазон, рівень несприйнятливості, ЕМС-проєктування, Національний додаток.*

Abstract. *An engineering assessment is conducted to evaluate the correspondence between the radio-frequency immunity levels specified by EN 50121-4 and the actual electromagnetic environment of Ukrainian railways. This assessment covers the railway VHF band at 150–156 MHz, including portable, mobile, and stationary transmitters, as well as the 27 MHz CB band (Citizens Band) as a scenario in which radiated electromagnetic fields can induce common-mode conducted disturbances on signalling and interlocking (SCI) cables and equipment ports. The analysis demonstrates that documentary-confirmed transmitter power levels currently authorized for use in Ukraine can generate calculated field strengths exceeding the basic immunity test level of 10 V/m at characteristic distances. For the 27 MHz band, the assessment emphasizes the analysis not only of radiated fields but also of common-mode conductive interference induced on cable ports through the mechanisms of antenna coupling and grounding path impedance. The frequency-dependent immunity levels established in EN 50121-4 are examined as methodological precedents for scenario-oriented national adaptation. A three-level approach is proposed: (1) a National Annex should identify characteristic electromagnetic influences and test scenarios specific to Ukrainian railway infrastructure; (2) sectoral EMC design rules should establish zoning principles, separation distances,*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Кустов В. Ф., Єлізаренко А. О., 2026.

cable routing, shielding, bonding, grounding, port protection and verification procedures with consideration of functional safety; and (3) operational regulations should impose restrictions on personal RF transmitters used in proximity to open apparatus and require periodic verification of passive shielding measures with regard to functional safety and signal integrity throughout the equipment lifecycle.

Keywords: *electromagnetic compatibility, railway signalling systems, radio-frequency field, EN 50121-4, VHF railway radio, CB band, immunity level, EMC design, National Annex.*

Вступ. Інтенсивне впровадження мікропроцесорних систем у пристроях залізничної автоматики (СЦБ) зумовлює підвищення вимог щодо їхньої електромагнітної сумісності та стійкості функціонування. Особливу небезпеку становить вплив сторонніх електромагнітних випромінювань від радіоелектронних засобів, що експлуатовані в безпосередній близькості від об'єктів залізничної автоматики. Підвищення рівня радіочастотного навантаження, зумовлене розвитком рухомого радіозв'язку, може призводити до виникнення електромагнітних завад, здатних порушувати нормальне функціонування мікропроцесорної апаратури. З огляду на відповідальність функцій, які виконують системи залізничної автоматики, навіть короткочасне порушення їхнього функціонування є критичним. У зв'язку з цим актуальним є визначення умов впливу сторонніх радіовипромінювань на мікропроцесорні пристрої залізничної автоматики, встановлення залежності рівня їхньої стійкості від параметрів електромагнітного поля та визначення допустимих рівнів зовнішнього електромагнітного впливу.

Оновлення технічного регулювання залізничного транспорту України з 3 травня 2026 р. [1–3] та ухвалення Закону України «Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України» № 4904-IX від 09.06.2026 р. [4] актуалізують питання відповідності стандартизованих ЕМС-випробувань фактичному електромагнітному середовищу мережі. Базовий національний стандарт ДСТУ EN 50121-4:2019, ідентичний європейському EN 50121-4:2016, встановлює рівні стійкості апаратури сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) до радіочастотного електромагнітного поля [5].

Метою цієї статті є обґрунтування підходу щодо національної адаптації вимог ЕМС для електронних систем СЦБ на основі фактичного радіочастотного середовища залізниць України та формування практичних вимог щодо проєктування. Дослідження охоплює штатний залізничний і сторонній VHF-радіозв'язок близько 150–156 МГц, а також CB-діапазон 27 МГц, для якого випромінений вплив може переходити в синфазну кондуктивну заваду через кабельні кола.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання електромагнітної сумісності систем залізничної автоматики висвітлено в низці вітчизняних досліджень. У роботі [6] досліджено проникнення вузькосмугових завад поїзного радіозв'язку 2,13/2,15 МГц у порти живлення апаратури СЦБ SIL 3/4 – окремий, кондуктивний за природою механізм, що потребував самостійного дослідження; в цій статті натомість розглянуто випромінене радіочастотне поле в діапазонах 150–156 МГц і 27 МГц.

Показовим для смуги 150–156 МГц є досвід Польщі, де аналогова залізнична радіозв’язкова система PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. історично працює в тому самому діапазоні 150–156 МГц [7]. ЕМС таких радіотелефонів оцінюють за PN-EN 50121-4 без окремого польського числового рівня Вольт на метр саме для цієї смуги; специфіку експлуатації додатково регламентують відомчі технічні вимоги щодо радіообладнання. Водночас

європейська практика містить і приклад безпосереднього посилення інфраструктурних RF-вимог: настанова ProRail RLN00007 (Нідерланди) для визначених частот передавання у смузі 380–470 МГц установлює 20 В/м замість базових 10 В/м, прямо пов'язуючи посилення з впливом портативних засобів радіозв'язку [8]. Отже, застосовують щонайменше два підходи щодо локальної специфіки: додаткові вимоги щодо самого радіообладнання та підвищення несприйнятливості апаратури інфраструктури в характерній смузі.

Ширший методологічний контекст підтверджує міжнародне порівняння: базовий міжнародний документ IEC 62236-4 [9], від якого походить і європейський EN 50121-4, і гармонізовані з ним міждержавні стандарти на пострадянському просторі у всіх випадках встановлює єдиний рівень 10 В/м для широкої смуги (80–800/1000 МГц), що охоплює діапазон 150–156 МГц, без частотної диференціації всередині цієї смуги. Отже, відсутність спеціального нормування для штатного залізничного VHF-радіозв'язку є спільною методологічною рисою всієї родини стандартів, похідних від IEC 62236-4, а не окремим недоліком чинної редакції EN 50121-4, що додатково підкреслює системний характер прогалини, яку покликана заповнити пропозиція національного додатка, розглянута в цій статті.

Ширший міжнародний контекст підтверджують і галузеві дослідження поза межами національної адаптації стандартів. Огляд проблем електромагнітної сумісності Європейської системи управління рухом поїздів (ERTMS) показав, що радіочастотна складова цієї системи (GSM-R) відчутно зазнає впливу зовнішнього електромагнітного середовища залізниці [10]. Подальші експериментальні дослідження на діючих лініях підтвердили, що завади від сторонніх GSM/UMTS-сигналів і перехідних процесів статистично значуще погіршують якість зв'язку GSM-R, причому характер цих завад суттєво відрізняється від тестових сигналів, передбачених чинними стандартами EMC [11]. Це підтверджує на прикладі іншого частотного діапазону загальну методологічну проблему цієї статті: розрив між генеричними випробувальними рівнями і сигналами стандартів і фактичним радіочастотним середовищем є системним питанням залізничної EMC, а не специфічною рисою лише VHF 150–156 МГц чи СВ 27 МГц. Базові вимоги щодо випробувань на несприйнятливість до випроміненого радіочастотного поля встановлює IEC 61000-4-3, на який посилається ДСТУ EN 50121-4 [5]. Загальна методологічна проблема – розрив між генеричним рівнем базового стандарту і специфічним національним радіочастотним середовищем – потребує окремого розгляду; ця стаття деталізує саме інженерний, розрахунковий аспект проблеми для двох конкретних діапазонів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є оцінювання характерних для України радіочастотних впливів на апаратуру СЦБ, включно зі сценаріями близького розташування персональних мобільних терміналів і портативних радіостанцій персоналу біля периферійних пристроїв і кабелів апаратури, і визначення того, які з цих впливів доцільно врахувати не лише в Національному додатку до ДСТУ EN 50121-4, а і галузевих технологічних нормах EMC-проєктування систем різного рівня функціональної безпечності.

Завдання дослідження: систематизувати чинний радіочастотний ресурс, виділений для технологічного радіозв'язку залізниць України; виконати інженерний розрахунок напруженості поля для характерних потужностей передавачів і відстаней до апаратури СЦБ; оцінити сценарії близького розташування персональних мобільних терміналів і портативних радіостанцій персоналу біля периферійних пристроїв автоматизованого робочого місця та відкритої апаратури СЦБ

з точки зору функціональної безпечності; проаналізувати статус і потенційну потужність стороннього випромінювання в СВ-діапазоні 27 МГц; зіставити з міжнародною практикою формалізованого контролю такого середовища; сформулювати пропозиції з виокремлення цих діапазонів і сценаріїв у Національному додатку до ДСТУ EN 50121-4.

Основна частина

1. Штатний залізничний УКХ-радіозв'язок у діапазоні 150–156 МГц

У службових приміщеннях залізничних станцій, може бути розміщено багато мікропроцесорних пристроїв залізничної автоматики, на які потенційно матиме вплив електромагнітне поле від радіозасобів технологічного радіозв'язку. Вони є критичними для безпеки руху і містять значну кількість електронних входів, виходів і кабельних з'єднань, через які може відбуватися вплив зовнішнього ВЧ-поля.

Одночасно на залізничних станціях зосереджена значна кількість стаціонарних радіозасобів станційного, поїзного і ремонтно-оперативного радіозв’язку, возимі радіостанції на рухомих об’єктах, носимі радіостанції різних абонентів. Радіозасоби технологічного радіозв’язку можуть встановлювати на локомотивах і в службових приміщеннях у безпосередній близькості від обладнання мікропроцесорних систем керування.

Важливим чинником є вплив радіочастотних випромінювань передавальних пристроїв. Від радіостанції, встановленої поблизу постів ЕЦ, вплив може відбуватися через випромінюване електромагнітне поле на корпус/кабелі/інтерфейси мікропроцесорної системи.

Згідно з Планом розподілу і користування радіочастотним спектром, в Україні для рухомого радіозв’язку виділено різні смуги частот у метровому, дециметровому та сантиметровому діапазонах радіохвиль [12].

У системах рухомого радіозв’язку на залізницях у наш час використовують канали і в гектометровому діапазоні з частотою 2,13 і 2,15 МГц із довжиною хвилі 140 м. Ці частоти використовують для організації лінійних мереж поїзного радіозв’язку. Ці мережі переважно працюють із використанням направляючих ліній різних типів [6].

Нормативними документами України для радіоелектронних засобів залізничного транспорту виділено смуги 151,725–154 МГц і 155–156 МГц [12]. Чинне регулювання радіочастотного спектра здійснює План, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України № 1340, поточна редакція якого діє з 04.03.2026 р. [12]. Діапазон близько 156 МГц (УКХ) традиційно використовують для станційного, поїзного, та ремонтно-оперативного технологічного радіозв'язку на залізничному транспорті; довжина електромагнітної хвилі в цьому діапазоні становить приблизно 1,9 м, що зумовлює ефективне наведення завад на кабельні траси, вводи-виводи та конструктивні елементи шаф автоматики.

На сьогодні радіозасоби працюють із частотною модуляцією в симплексному режимі, і параметри регульовані ДСТУ 4384:2003. У цих же смугах частот можуть працювати радіозасоби цифрового конвенціального стандарту DMR за вокодерними технологіями.

Спеціально для залізниць у Плані виділені смуги для організації стільникових мереж стандарту GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway) зі смугами 875,400 – 880 МГц і 920– 925 МГц. На цей час системи стандарту GSM-R не працюють в Україні, але широко використовувані для організації радіоканалів керування рухом поїздів в Європі.

Для широкосмугових систем LTE виділені частоти в діапазонах 1800 МГц і 2600 МГц із шириною смуги до 20 МГц, що дає змогу передавати більші обсяги

інформації в системах керування рухом поїздів.

На сьогодні системи GSM-R не завжди відповідають вимогам сучасних комп'ютерізованих систем управління. Тому перспективним є впровадження широкосмугових систем LTE (Long Term Evolution) і FRMCS (Future Railway Mobile Communication System). Але ці системи поки знаходяться на етапі дослідної експлуатації.

Для залізничного транспорту з метою впровадження 5G FRMCS передбачено зайняти частину діапазону, яку зараз використовують для GSM-R (смуга 4 МГц у діапазоні 900 МГц) або діапазон 1900-1910 МГц, що необхідно враховувати для випробування перспективних систем МПЦ.

Діючі рівні стійкості до завад радіочастотного поля, згідно з ДСТУ EN 50121-4, становлять у діапазоні 80–800 МГц 10 В/м за 80-відсоткової амплітудної модуляції синусоїдою 1 кГц. Найпотужнішими джерелами радіочастотних завад у цьому діапазоні на залізниці є службові стаціонарні та возимі (мобільні) радіостанції: за типовими технічними характеристиками стаціонарних і возимих радіостанцій залізничного радіозв'язку, що застосовують в Україні, потужність несучої частоти передавачів становить до 10 Вт; точне значення для конкретного типу обладнання підлягає уточненню за відомчою технічною документацією.

Згідно з рішенням Національної комісії з електронних комунікацій, для аналогових і цифрових радіозасобів УКХ радіозв'язку встановлені максимальні потужності передавачів для стаціонарних, возимих і носимих радіостанцій відповідно 25, 10, 5 Вт.

Такі самі норми діють і для цифрових радіозасобів, і для передавачів цифрових радіозасобів, стандарту DMR, які дозволені в мережах залізничного радіозв'язку. На станціях одночасно можуть діяти декілька стаціонарних радіостанцій різних мереж (до 5-10 мереж). Їх розміщення відповідає частотно-територіальному плану. Радіостанції возимих абонентів можуть довільно переміщуватися в межах всієї станції (до 10-15 локомотивів). Це може створювати значну напруженість випромінюваних полів. У деяких випадках можлива одночасна дія декількох передавачів, які діють поблизу поста ЕЦ. За одночасної дії декількох випромінювачів сумарну напруженість поля визначають як корінь квадратний із суми квадратів напруженостей окремих джерел. При цьому дія окремого джерела може не викликати збоїв у роботі апаратури, а за спільної дії може не бути забезпечена стійкість роботи автоматики.

Тривалість дії завади може бути незначною, але викликати порушення, наприклад, із ввімкненням на передавання радіостанції в разі проїзду поблизу обладнання. Тому необхідно оцінити напруженість поля, яка може бути утворена.

Для інженерного оцінювання порядку величин напруженості електричного поля E використовують спрощену класичну залежність для дальньої зони випромінювання неспрямованого джерела [13]:

$$E = \sqrt{(30 \cdot P \cdot G)} / r, \qquad (1)$$

де P — вихідна потужність передавача, Вт;

G — коефіцієнт підсилення антени відносно ізотропного випромінювача в лінійних одиницях, 1 – для носимих (портативних), 2 – для возимих і стаціонарних радіозасобів;

r — відстань від антени до об'єкта, м.

За формулою, напруженість поля не залежить безпосередньо від частоти коливань, але параметри використовуваних антен та умови поширення радіохвиль можуть залежати від частоти.

Потужність возимих радіостанцій технологічного радіозв'язку звичайно встановлена 10 Вт. Для мереж стільникового радіозв'язку загального користування максимальна потужність передавачів базових станцій зазвичай складає 20 Вт.

Наведену залежність використовують лише як спрощену інженерну оцінку порядку величини у випадках, де припущення дальньої зони є прийнятним. На відстанях порядку десятків сантиметрів, особливо поблизу металевих шаф, кабелів і реальної портативної антени, вона не має бути трактована як точний прогноз локального поля; такі сценарії потребують натурних вимірювань або спеціального випробування.

Тоді відповідно напруженість поля, наприклад на відстані 1 м із використанням неспрямованої антени, за потужності 10 Вт становитиме E = 24,5 В/м. За потужності 25 Вт значення напруженості поля складає E = 38,7 В/м. Зі збільшенням відстані напруженість поля буде відповідно меншою, наприклад на відстані 3 м для потужності 10 Вт складе E = 8,16 В/м.

Однак стаціонарну антену зазвичай розміщують на щоглі чи даху, тоді як портативну радіостанцію оперативний персонал може заносити безпосередньо до приміщення поста ЕЦ і використовувати біля відкритої шафи або пульта. Для потужності 4–5 Вт спрощена модель уже на відстані близько 1 м дає рівень понад 10 В/м, а з подальшим наближенням вказує на швидке зростання потенційної інтенсивності впливу. Числові значення для відстаней близько 0,3 м і менше для діапазону 150–156 МГц (довжина хвилі близько 1,9 м) у цій роботі не розглядають як валідовані значення поля і мають бути підтверджені вимірюваннями. Слід зазначити, що межа застосовності моделі дальньої зони залежить від довжини хвилі: для суттєво коротших хвиль мобільного та Wi-Fi діапазонів (п. 1.5) умовна межа дальньої зони настає на значно менших абсолютних відстанях, тому оцінка на відстані 0,3 м для цих діапазонів є методологічно іншим випадком і не суперечить цьому застереженню.

Але за сумарної дії двох джерел напруженість поля зросте. Наближено сумарний рівень поля визначають як корінь квадратний із суми квадратів амплітуд напруженості, утворених окремими джерелами з випадковими фазами.

$$E_{\Sigma} = \sqrt{E_i^2}. \qquad (2)$$

Отже, із впливом випромінювання двох локомотивних радіостанцій за потужності 10 Вт для визначених раніше значень напруженість поля завад досягає вже 34,6 В/м.

Аналіз цих показників свідчить про необхідність корекції нормативної бази та умов тестових випробувань засобів залізничної автоматики і підвищення нормативу несприйнятливості.

Частотне середовище 150–156 МГц не обмежено лише залізничним технологічним радіозв'язком. Чинний План розподілу і користування радіочастотним спектром України передбачає використання рухомою радіослужбою загальних користувачів смуги 150,05–168,5 МГц, водночас смуги 151,725–154 МГц і 155–156 МГц окремо призначені для радіообладнання АТ «Укрзалізниця» [12]. Це означає, що в безпосередній близькості від залізничних об'єктів потенційно можуть перебувати і радіозасоби інших користувачів суміжного УКХ-діапазону. Сам факт належності обладнання до дозволеного частотного діапазону не означає право стороннього користувача працювати на частотах, призначених для АТ «Укрзалізниця»; конкретні робочі частоти визначають умовами користування спектром.

На роботу пристроїв СЦБ можуть впливати і радіозасоби сторонніх користувачів, які можуть знаходитися в безпосередній близькості від них.

1.1. Розрахункові зони перевищення випробувального рівня 10 В/м для сторонніх УКХ-передавачів 150–156 МГц

Проєкт prEN 50121-4:2025 [14] зберігає призначення стандарту для апаратури залізничної сигналізації і телекомунікацій, зокрема обладнання постів централізації, колійних шаф, залізничних

переїздів та іншого обладнання, пов’язаного з безпекою руху, і передбачає оновлення вимог щодо несприйнятливості. Це підтверджує актуальність частотно- та сценарно-орієнтованого підходу, але не усуває необхідності врахування фактичного національного електромагнітного середовища.

Смугу 150–156 МГц доцільно розглядати як один із пріоритетних об'єктів національної адаптації вимог ЕМС. Її специфіка полягає не в тому, що європейські стандарти не охоплюють цю частоту: вона входить до широкої смуги випробувань RF-полем. Особливість полягає в поєднанні саме на залізницях України технологічного радіозв'язку УКХ-діапазону, портативних передавачів персоналу, можливості їх безпосереднього наближення до апаратури СЦБ і наявності інших дозволених УКХ-засобів у суміжному частотному просторі. Тому доцільно не підвищувати рівень несприйнятливості в усьому діапазоні 80–800 МГц, а перевірити натурними вимірюваннями необхідність спеціального випробувального сценарію саме для 150–156 МГц.

1.2. Національна специфіка смуги 150–156 МГц: контрольована RF-зона навколо апаратури СЦБ

Із позицій технологічних норм ЕМС-проєктування доцільно вводити поняття контрольованої RF-зони навколо критичної апаратури СЦБ. Її межа не має механічно дорівнювати розрахунковим 1,7 або 2,5 м, а бути встановлена за результатами випробувань конкретного типу обладнання. Для SIL 3/SIL 4 така зона може бути використана для регламентації передавання з портативної УКХ-радіостанції під час відкриття шафи, діагностики та ремонтних робіт.

На відстанях близько десятків сантиметрів структура поля істотно залежить від конструкції антени, металевих поверхонь шафи, кабельних вводів і взаємного розташування обладнання. Тому значення, отримані за формулою дальньої зони в цій області, потрібно розглядати лише як індикатор потенційно інтенсивного локального впливу. Для сценаріїв «радіостанція на шафі», «радіостанція біля пульта» і «електромеханік із передавачем біля відкритої електроніки» необхідні натурні вимірювання або спеціальні випробування з реальною антеною.

За формулою (1), розрахункова межа E = 10 В/м становить приблизно 1,55 м для 4 Вт, 1,73 м для 5 Вт, 2,45 м для 10 Вт і 3,87 м для 25 Вт. Ці відстані не є санітарними, безпечними або нормативними мінімальними відстанями. Вони визначають лише розрахункові області можливого перевищення базового випробувального рівня 10 В/м і можуть бути використані для вибору точок натурних вимірювань і формування ЕМС-зон об'єкта (рис. 1).

Для діапазону 150–156 МГц принципово важливо враховувати не лише штатні параметри передавача, а і реальні сценарії його просторового зближення з електронною апаратурою. Портативну радіостанцію потужністю 4–5 Вт може використовувати електромеханік під час пошуку несправності біля відкритої релейної або електронної шафи; вона може бути тимчасово розміщена на поверхні шафи; знаходитися біля клавіатури, миші, монітора або пульта ДСП; використана працівниками вагонного чи колійного господарства поблизу робочого місця (рис. 2).

На рис. 2 показано такі сценарії: розміщення радіостанції на шафі; біля АРМ ДСП; використання електромеханіком під час діагностики біля відкритої шафи. Рисунок задає сценарії для ЕМС-випробувань, а не фіксовані значення напруженості поля.

Такі ситуації не слід трактувати як гарантовані значення поля в конкретній точці, однак вони є обґрунтовано передбачуваними експлуатаційними сценаріями, які потрібно враховувати для ЕМС-проєктування та випробувань.

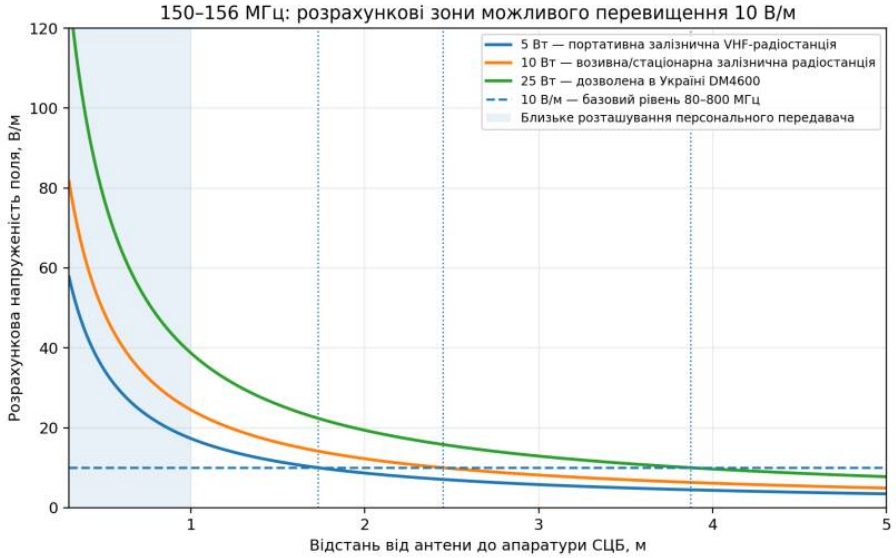


Рис. 1. Розрахункові зони можливого перевищення рівня 10 В/м для УКХ-передавачів 150–156 МГц



Рис. 2. Характерні експлуатаційні сценарії локального впливу портативної УКХ-радіостанції 150–156 МГц на апаратуру СЦБ

1.3. Частотно-диференційовані рівні несприйнятливості та сучасні мобільні джерела

Для проєктувальників і розробників важливо зіставляти локальні експлуатаційні RF-впливи не з одним універсальним числом, а з частотно-диференційованими рівнями несприйнятливості. У EN 50121-4:2016 / IEC 62236-4:2018 для випроміненого RF-поля застосовують, зокрема, рівні 10 В/м у смузі 80–800 МГц, 20 В/м у 800–1000 МГц, 10 В/м у 1,4–2,0 ГГц, 5 В/м у 2,0–2,7 ГГц і 3 В/м у 5,1–6,0 ГГц. Випробування у верхніх смугах

призначені, зокрема, для імітації завад від цифрових засобів зв'язку. Проєкт prEN 50121-4:2025 оновлює вимоги щодо несприйнятливості для сучасної сигнальної і телекомунікаційної апаратури, але сам принцип залишається частотно- і сценарно-орієнтованим.

На окрему увагу потребує IEC 61000-4-39, який установлює відтворювані випробування несприйнятливості електричного та електронного обладнання до RF-передавачів, що використовувані в безпосередній близькості, у загальному діапазоні 9 кГц–6 ГГц [15]. Для сучасних мобільних терміналів цей стандарт дає методично коректну основу випробувань на близькій відстані і допомагає не екстраполювати залежність 1/r у санти-метрову область. Для VHF 150–156 МГц у цій роботі спеціальний випробувальний сценарій запропоновано визначати окремо за результатами натурного дослідження реальної антени та конфігурації апаратури СЦБ.

Мобільні телефони, 4G/5G і Wi-Fi – це не національна особливість України, однак вони є корисним нормативним прецедентом: стандарт уже визнає, що характерні радіоджерела в різних частотних областях потребують різних випробувальних рівнів. Саме тому для української смуги 150–156 МГц доцільно поставити окреме питання про репрезентативність базових 10 В/м, оскільки тут існують штатні портативні і стаціонарні залізничні передавачі та можливі сторонні VHF-джерела, здатні працювати на дуже малих відстанях від апаратури СЦБ.

На рис. 3 наведені норми на стійкість до випроміненого RF-поля, за ДСТУ EN 50121-4 / IEC 62236-4. Смугу 150–156 МГц виділено як характерний для залізниць України УКХ-сценарій, який у чинному стандарті входить до широкого діапазону 80–800 МГц із рівнем 10 В/м.

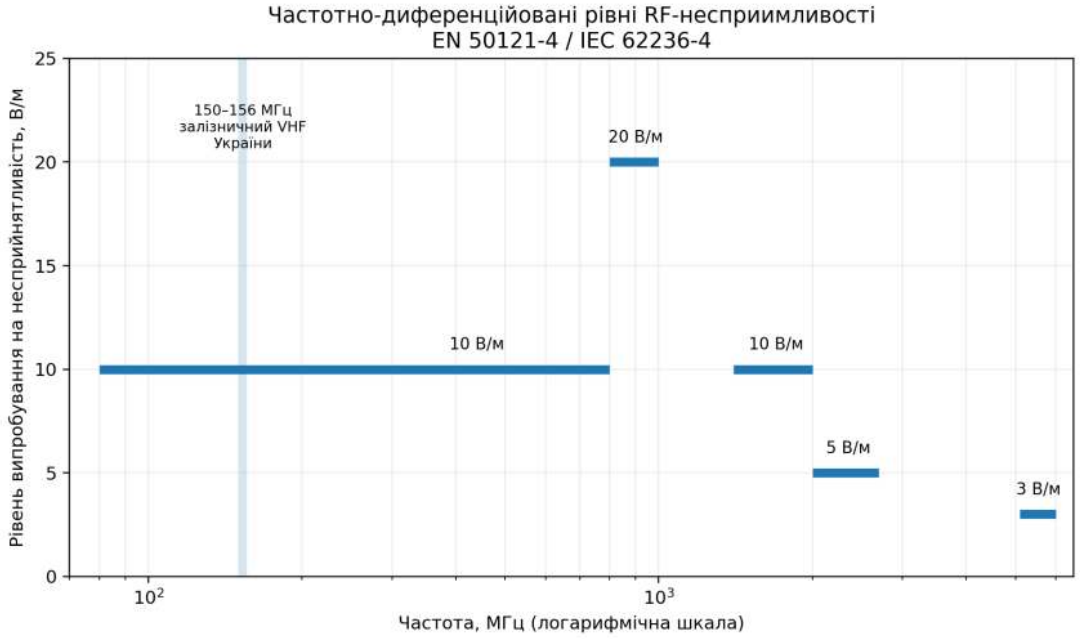


Рис. 3. Частотно-диференційовані рівні випробувань на несприйнятливість до випроміненого RF-поля, за ДСТУ EN 50121-4 / IEC 62236-4

На рис. 4 наведено порівняння базового рівня 10 В/м з розрахунковою напруженістю поля на відстані 1 м для УКХ-передавачів 150–156 МГц: 5 Вт – 17,3 В/м; 10 Вт — 24,5 В/м; 25 Вт — 38,7 В/м. Розрахунок використано як оцінювання порядку величини, а не як результат натурного вимірювання.

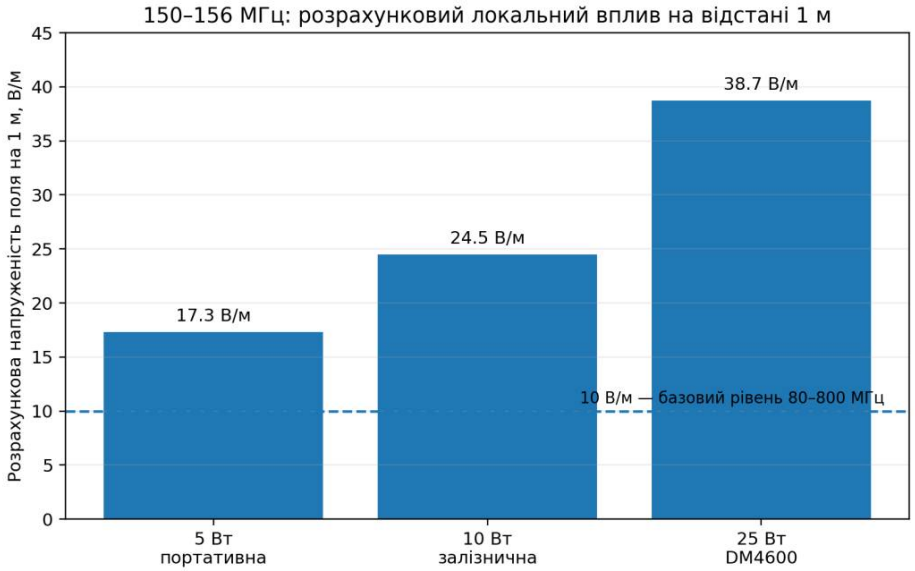


Рис. 4. Порівняння базового нормативного рівня 10 В/м із розрахунковою напруженістю поля на відстані 1 м для УКХ-передавачів 150–156 МГц

Для практичного проєктування ці два рисунки потрібно розглядати спільно. Перший показує, які рівні стандарт вважає репрезентативними для різних частотних областей, а другий — в українському УКХ-сценарії навіть документально обґрунтовані потужності передавачів можуть давати на характерних відстанях розрахункові значення, вищі за 10 В/м. Це не є достатньою підставою для негайного встановлення нового нормативного рівня; воно є підставою для натурного RF-моніторингу на постах ЕЦ, переїздах, біля релейних та електронних шаф і подальшого встановлення спеціального національного випробувального сценарію, якщо вимірювання підтвердять систематичне перевищення.

1.4. Близько розташовані мобільні передавачі біля периферії АРМ та функціональна безпечність

Окремим експлуатаційним сценарієм є використання мобільного телефона або службової портативної радіостанції безпосередньо біля периферійних пристроїв автоматизованого робочого місця ДСП. Телефон може лежати на столі на відстані 0,1–0,2 м від клавіатури, маніпулятора «миша», монітора, інтерфейсного кабелю, USB-порту або іншого елемента введення-виведення. Під час технічного обслуговування аналогічна ситуація можлива біля відкритої шафи, кабельних джгутів, роз'ємів і плат електронної апаратури.

Для систем СЦБ периферійний пристрій не потрібно розглядати лише як побутовий аксесуар. Якщо клавіатура, маніпулятор, сенсорний пристрій або їхній інтерфейс бере участь у формуванні чи підтвердженні команди керування, електромагнітне збурення такого каналу потенційно може впливати на виконання функції системи. Це не означає, що RF-вплив автоматично призводить до

небезпечної команди: причинний ланцюг має бути встановлений аналізом небезпек і випробуваннями. Однак для апаратури, що реалізує функції SIL 3/SIL 4, периферію, кабелі та реальну конфігурацію АРМ доцільно включати до меж об'єкта EMC-верифікації.

Оцінювання на рис. 5 виконано за формулою (1) для G = 1 (ізотропне наближення для антени термінала) і максимальних потужностей передавача, типових для відповідного класу обладнання: 2 Вт для GSM900, 1 Вт для GSM1800, 0,25 Вт для UMTS2100, 0,2 Вт для LTE2600, 0,1 Вт для Wi-Fi 2,4/5 ГГц [16]. На відстані 0,3 м такі попередні інженерні оцінки для несприятливих умов радіозв'язку показали, що локальні рівні від мобільних терміналів можуть бути порівнянними з частотно-специфічними рівнями ДСТУ EN 50121-4 або перевищувати їх (рис. 5). Ці дані використані тут лише як загальноєвропейський нормативний прецедент частотно-залежного нормування і не є центральним результатом статті. Фактична потужність телефона залежить від технології, алгоритму керування потужністю і умов мережі, тому характерні сценарії потрібно перевіряти вимірюванням. Аналогічний за фізичною природою, хоча інший за прикладною галуззю, ефект близького впливу портативних передавачів на чутливу електроніку добре задокументований емпірично для медичного обладнання: контрольоване дослідження на 61 одиниці критичного медичного обладнання зафіксувало 48 випадків електромагнітних завад від мобільних телефонів другого і третього покоління з медіанною відстанню виникнення завади близько кількох сантиметрів (діапазон від 0,1 до 300 см) [17]; систематичний огляд подібних досліджень підтверджує клінічну значущість цього ефекту [18]. Це підтверджує, що близький вплив портативного передавача на електронне обладнання є не гіпотетичним, а емпірично підтвердженим в іншій предметній галузі сценарієм, що виправдовує застосування методології випробувань на близькій відстані (IEC 61000-4-39) і для апаратури СЦБ.

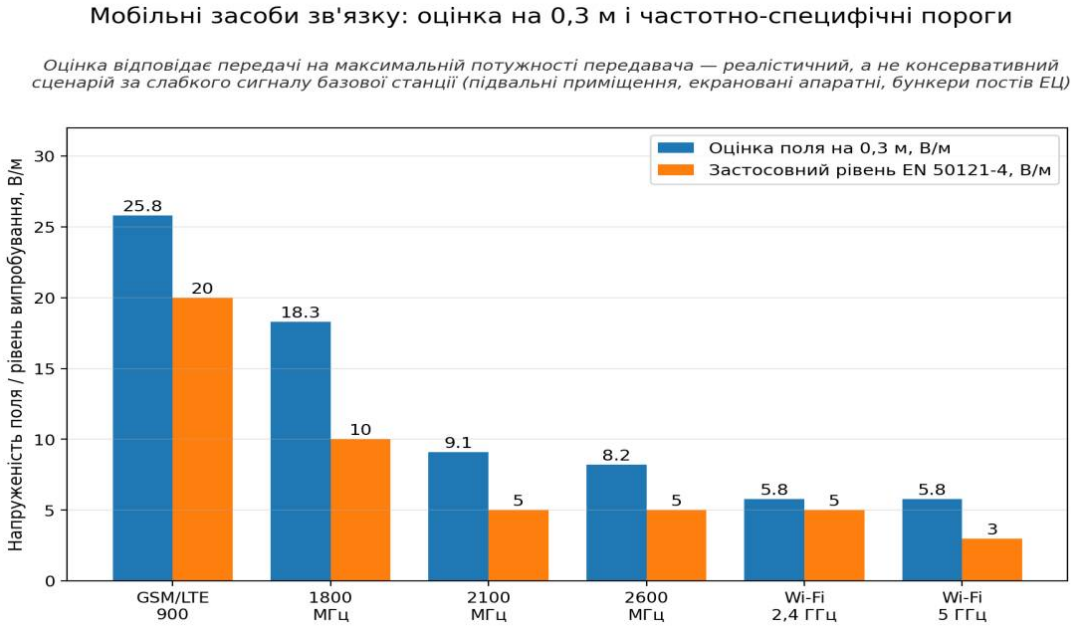


Рис. 5. Порівняння інженерної оцінки поля мобільних засобів зв'язку на відстані 0,3 м з частотно-специфічними рівнями ДСТУ EN 50121-4

На рис 5 сині стовпчики – оцінений рівень поля за максимальної потужності передавача; помаранчеві — відповідний нормативний рівень. Максимальна потужність відповідає реалістичному, а не консервативному сценарію слабкого сигналу базової станції, типовому для підвальних приміщень, екранованих апаратних і бункерів постів ЕЦ. Графік ілюструє необхідність порівнювати кожну технологію з порогом саме її частотної смуги.

Для відстаней 0,1–0,2 м принципово важливо не продовжувати розрахунок за законом 1/r. IEC 61000-4-39 спеціально призначений для оцінювання несприйнятливості електричного та електронного обладнання до RF-передавачів у безпосередній близькості; для частот понад 26 МГц під близькою відстанню зазвичай розуміють відстань не більше 200 мм. Тому сценарії «телефон біля миші/клавіатури», «радіостанція біля кабелю» і «передавач біля відкритої шафи» доцільно переводити з розрахункової постановки в постановку відтворюваного випробування на близькій відстані (рис. 6).

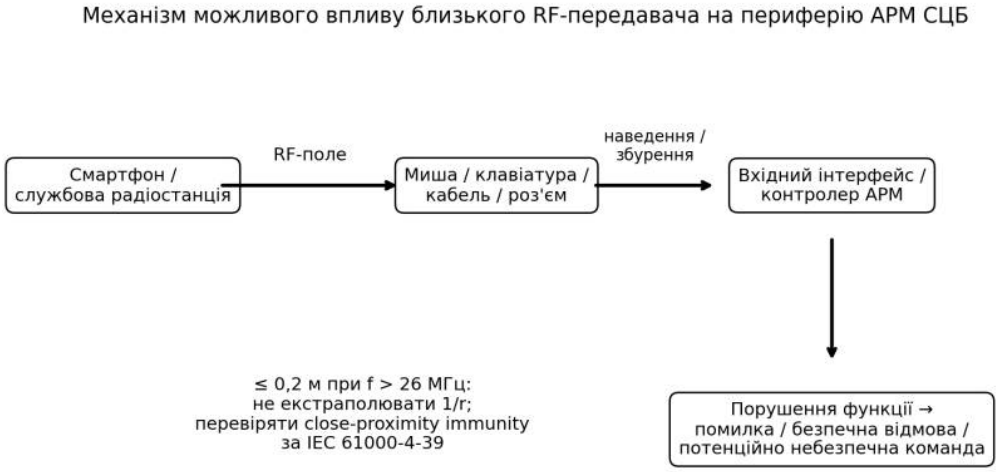


Рис. 6. Сценарій близького RF-впливу на АРМ СЦБ: мобільний телефон або портативна радіостанція → периферія (миша, клавіатура, кабель, роз'єм) → інтерфейс контролера → функція системи

Для відстаней до 0,2 м на частотах понад 26 МГц доцільно перевіряти за IEC 61000-4-39, а не екстраполяцією залежності 1/r.

Із позицій функціональної безпечності слід доводити не те, що мобільний телефон «створює небезпечну команду», а те, що передбачуваний RF-вплив не призводить до небезпечного порушення функції. Якщо клавіатура, маніпулятор, кабель або інший елемент периферії бере участь у формуванні чи підтвердженні команди, його доцільно включати до ЕМС-конфігурації випробувань разом із центральною апаратурою.

Попередній національний нормативний досвід також є корисним прецедентом: ДСТУ 4178-2003 і ДСТУ 4151 передбачали окреме випробування завадою від цифрових радіотелефонів 900/1890 МГц із більш реальними параметрами завад. Цю історичну вимогу не потрібно механічно відновлювати; її значення полягає в самому принципі окремого врахування характерного локального RF-джерела.

1.5. Практичні наслідки трирівневого підходу для ЕМС-проєктування та регламенту експлуатації

Для персональних передавачів просторове рознесення не може бути єдиним конструктивним захистом, оскільки працівник може піднести телефон або портативну радіостанцію до будь-якого елемента АРМ чи відкритої шафи незалежно від початкового компонування. Тому мінімальні відстані доцільно розглядати передусім як експлуатаційне обмеження, а технічну стійкість підтверджувати випробуванням реальної конфігурації обладнання, кабелів і периферії.

Конструктивні заходи (екранування, фідерні лінії, bonding, фільтрація) зберігають ефективність лише за умови їх справності протягом життєвого циклу. Тому запропонований підхід має три взаємопов’язані рівні: 1) Національний додаток визначає характерні RF-сценарії та процедуру встановлення випробувальних рівнів; 2) галузеві норми ЕМС-проєктування задають конструктивні заходи; 3) регламент експлуатації встановлює обмеження для персональних передавачів і періодичну перевірку кабелів, екранів і з’єднувачів.

2. Сторонні УКХ-радіозасоби як складова зовнішнього електромагнітного середовища

Офіційним рішенням НКРЗІ від 10.01.2013 р. № 5 визначено можливим застосування в Україні, зокрема, возимо-стаціонарної радіостанції Motorola DM4600 типу MBA304N у смугах 150,05–156,7625; 156,8375–162,75 і 163,2–168,5 МГц із вихідною потужністю Рв = 25 Вт [19]. Перша з цих смуг охоплює досліджуваний у роботі інтервал 150–156 МГц і частотно суміжна з каналами технологічного залізничного радіозв'язку. Тому як обґрунтовано передбачуваний зовнішній сценарій доцільно розглядати знаходження автомобіля або стаціонарного об'єкта, обладнаного УКХ-радіостанцією цього класу, поблизу переїзду, поста ЕЦ чи іншої апаратури СЦБ. За формулою (1), для P = 25 Вт і G = 2 розрахункова напруженість на відстані 1 м становить близько 38,7 В/м, тобто приблизно у 3,9 раза перевищує рівень 10 В/м. Розрахункове значення знижується до 10 В/м приблизно на відстані 3,9 м. Ці значення характеризують порядок величини за моделлю дальньої зони і не мають бути трактовані як точний опис ближнього поля. Значення 25 Вт у цій роботі використовують як документально підтверджений для України розрахунковий сценарій, а не як фізично максимально можливу потужність професійних УКХ-передавачів. Існують високопотужні виконання радіостанцій цього класу; за інших нормативно допустимих конфігурацій більша потужність означатиме збільшення розрахункової напруженості поля. Тому проєктний аналіз конкретного об'єкта має спиратися на фактично допустимі та обґрунтовано передбачувані джерела поблизу об'єкта.

Наведений сценарій не означає, що сторонній користувач має право передавати на частотах, призначених для залізничного радіозв'язку: за таке порушення законодавством України передбачена відповідальність [20]. Його значення для ЕМС полягає в іншому: потужний дозволений УКХ-передавач може фізично опинитися поблизу переїзду, поста ЕЦ, релейної шафи або кабельної траси. Тому для оцінювання фактичного електромагнітного середовища доцільно враховувати не лише штатні залізничні передавачі, а й обґрунтовано передбачувані зовнішні джерела та підтверджувати розрахункові оцінки натурними вимірюваннями.

Систематичне документування фактичного радіочастотного середовища є усталеною європейською практикою: зокрема, у Німеччині реєстрацію випромінювальних установок і моніторинг електромагнітного поля ведуть на постійній основі профільним регулятором [21]. Пріоритетними місцями натурного RF-

моніторингу для залізниць України доцільно вважати переїзди, горловини станцій, території біля постів ЕЦ і шафи СЦБ на перегонах поблизу автомобільних чи технологічних проїздів. Саме в цих локаціях можливе зближення стороннього транспортного радіозасобу з апаратурою, кабельними трасами або шафами СЦБ на відстані близько кількох метрів.

Фактична напруженість поля залежить від потужності передавача, параметрів та орієнтації антени, відстані до апаратури, взаємного розташування антени і кабельних трас, а також від відбиттів від металевих конструкцій рухомого складу та інфраструктури. Наведені розрахунки є оцінкою порядку величин за спрощеною моделлю дальньої зони і не враховують екранування корпусом апаратури чи будівлею поста, тому потребують верифікації натурними вимірюваннями на характерних об'єктах. Тим не менш, отримане перевищення нормованого рівня в кілька разів є достатньою підставою для того, щоб не розглядати діапазон 150–156 МГц як випадкове стороннє явище, а трактувати його як характерну, регулярно повторювану складову експлуатаційного середовища залізничної інфраструктури, що потребує окремого аналізу функціональної безпечності апаратури СЦБ як із позиції апаратного, так і програмного забезпечення, особливо в місцях близького розташування стаціонарних, локомотивних і носимих радіостанцій відносно апаратури, кабельних трас, шаф та інших елементів системи.

3. Відкритий СВ-діапазон (Citizens Band) 27 МГц: від випроміненого поля до синфазної кондуктивної завади на кабельних портах

Для 27 МГц характер ризику відрізняється від УКХ 150–156 МГц насамперед механізмом проникнення завади. На цій частоті довгі кабелі та джгути СЦБ можуть ефективно перетворювати зовнішнє RF-поле на наведений синфазний сигнал на портах. Тому основним об’єктом оцінювання є не лише поле біля корпусу, а ланцюг «зовнішнє поле – кабельна структура – синфазна напруга – порт апаратури».

Окрему групу електромагнітних впливів становлять сторонні радіопередавальні засоби в СВ-діапазоні 27 МГц [22]. Для цієї частоти пряме перенесення критерію 10 В/м із випробування ДСТУ EN 50121-4 у смузі 80–800 МГц методологічно некоректне. Водночас 27 МГц входить до робочої смуги IEC 61000-4-6 (150 кГц–80 МГц), який оцінює несприйнятливість до кондуктивних завад, індукованих радіочастотними полями на кабелях живлення, сигналу та заземлення [23]. Тому для СЦБ доцільно розглядати ланцюг «зовнішнє поле – кабельна структура – синфазна наведена напруга – порт апаратури».

Для інженерного опису переходу від поля до наведеної завади може бути використана узагальнена залежність напруги кондуктивної завади (синфазної RF-напруги на порту) від напруженості поля, ефективної довжини кабелю (антени) і коефіцієнта зв'язку Kc, що враховує орієнтацію, екранування, прокладання кабелю, заземлення та навколишні провідні конструкції.

Стан ґрунту, баласту і заземлювальних кіл, у тому числі сезонне промерзання, доцільно розглядати як фактор зміни комплексного імпедансу зворотного/заземлювального шляху і, відповідно, коефіцієнта зв'язку Kc. Залежність питомого опору ґрунту від вологості та промерзання добре задокументована в літературі із заземлювальних пристроїв: лабораторні та польові дослідження фіксують багаторазове зростання питомого опору ґрунту з переходом від вологого до мерзлого стану [24, 25], а міжнародний стандарт IEC 61936-1 для проєктування електроустановок вище 1 кВ безпосередньо приписує використовувати масштабний коефіцієнт 5–6 для «зимового» опору ґрунту в холодних регіонах порівняно з «літнім»

[26]. Без натурних даних для конкретного об'єкта некоректно механічно переносити ці узагальнені коефіцієнти на розрахунок коефіцієнта зв'язку Кс для кабельних трас СЦБ; натомість для Національного додатка і технологічних норм доцільно передбачити перевірку найгірших сезонних станів об'єкта за аналогічною логікою.

Довжина електромагнітної хвилі на частоті 27 МГц становить приблизно 11,1 м, а чвертьхвильовий резонансний розмір – близько 2,8 м, півхвильовий – близько 5,6 м. Це означає, що ефективними приймальними «антенами» для завад цього діапазону є не апаратура як така, а кабелі й джгути сигнальних кіл, проводи електроживлення обладнання та інші протяжні провідні елементи шаф і постів СЦБ, довжина яких (від одиниць до кількох десятків метрів) відповідає резонансним розмірам або їхнім кратним у зазначеному діапазоні. На відміну від гігагерцових діапазонів, де резонансні розміри вимірювані сантиметрами, а ефективне наведення потребує спеціально узгоджених антенних структур, на 27 МГц звичайна нештатна кабельна проводка здатна діяти як паразитна антена без будь-якого спеціального узгодження, що суттєво підвищує практичну значущість цього діапазону для кондуктивного проникнення завади в порти апаратури СЦБ через наведену на кабель ЕРС, а не лише через безпосередній випромінений вплив на корпус пристрою.

Нормативно допустима потужність СВ-обладнання (зазвичай одиниці ват) не має бути автоматично ототожнена з найгіршим передбачуваним впливом на конкретному об’єкті. На рис. 7, крім нормативного рівня 4 Вт, наведено ілюстративні сценарії 20, 30 і 100 Вт: вони не відповідають дозволеній потужності стандартного СВ-обладнання, а відображають добре відому на практиці ситуацію використання нештатно форсованих (модифікованих) СВ-передавачів і підсилювачів, потужність яких може в декілька разів і на порядки перевищувати нормативну. Ці значення наведено виключно для ілюстрації чутливості розрахункової напруженості поля до потужності джерела ($E \sim \sqrt{P}$) і не є оцінкою типової чи очікуваної інтенсивності впливу. У цій роботі не встановлено довільний «максимальний» рівень випромінювання для нештатних конфігурацій; достатність випробувального сценарію для 27 МГц запропоновано визначати за натурними вимірюваннями та оцінюванням наведеної синфазної напруги.

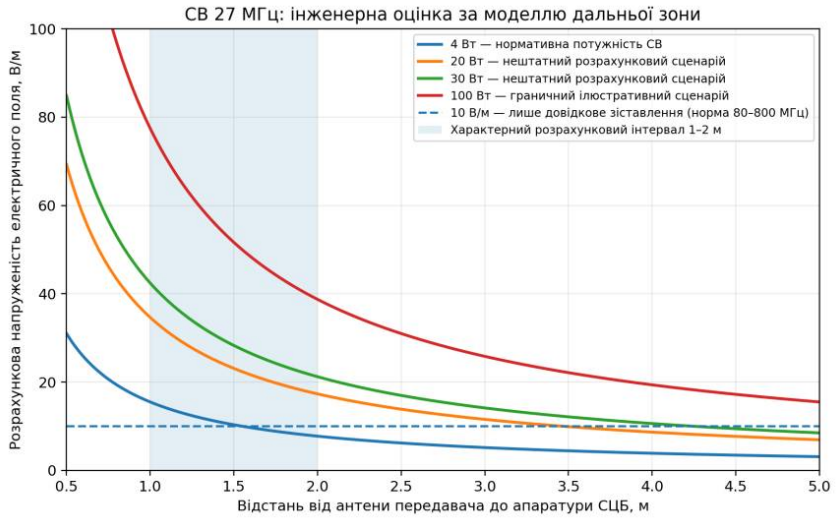


Рис. 7. Розрахункова напруженість електричного поля стороннього СВ-передавача 27 МГц для характерних потужностей

На рис. 7 і в таблиці значення 10 В/м наведено лише як довідкове зіставлення, оскільки цей рівень ДСТУ EN 50121-4 стосується випробування випроміненим полем у смузі 80–800 МГц. Частота 27 МГц входить до сфери IEC 61000-4-6 (150 кГц–80 МГц), де нормовано кондуктивну заваду, індуковану RF-полями на кабелях на рівні 10 В [23].

Таблиця

Порогові рівні несприйнятливості, застосовні (безпосередньо чи за аналогією) для частоти 27 МГц, згідно з ДСТУ EN 50121-4 [5]

Тип впливу на порту апаратури СЦБ	**Метод впливу**	**Нормований поріг**	**Формальна застосовність на 27 МГц**
Випромінене поле (вільний простір)	Антена в екранованій камері / ТЕМ-комірка	10 В/м	За аналогією (норма для 80–800 МГц)
Кондуктивна завада (наведена на провід)	Інжекція через струмовий затискач на кабель	10 В	Формально застосовний (норма для 0,15–80 МГц)

Для відповідальних систем СЦБ ця обставина має принципове значення. Нормативне обмеження потужності стороннього передавача не гарантує, що обладнання СЦБ протягом усього життєвого циклу не зазнає більш інтенсивного локального електромагнітного впливу. Тому для обґрунтування вимог щодо систем SIL 3/SIL 4 доцільно розрізняти нормативно допустиме радіочастотне середовище та обґрунтовано передбачувані зовнішні впливи, що можуть виникнути в реальних умовах експлуатації.

Мобільні телефони, 4G/5G і Wi-Fi доцільно згадувати як загальноєвропейський, а не унікальний для України клас локальних RF-джерел. Їхня роль у цій роботі полягає насамперед у підтвердженні загального принципу: реальний рівень впливу визначений не лише потужністю, а і частотою та відстанню до апаратури. Для українського Національного додатка більш специфічними залишаються вузькосмугові 2,13/2,15 МГц і УКХ 150–156 МГц; 27 МГц доцільно розглядати як окремий сценарій переходу випроміненого поля в кондуктивну синфазну заваду.

4. Європейський прецедент інфраструктурної адаптації RF-вимог: ProRail

Настанова ProRail RLN00007 (Нідерланди) є безпосереднім прикладом доповнення базових вимог EN 50121-4 з урахуванням реального залізничного радіочастотного середовища. Для радіочастотного поля, за IEC 61000-4-3, вона встановлює 20 В/м на визначених частотах передавання у смузі 380–470 МГц замість базових 10 В/м; обґрунтування безпосередньо пов’язане з впливом портативних засобів радіозв’язку (portofoon). Крім того, RLN00007 заповнює частотні проміжки 1,0–1,4 ГГц рівнем 10 В/м і 2,7–5,1 ГГц рівнем 3 В/м [8].

Цей приклад не означає, що рівень 20 В/м потрібно автоматично перенести на українську смугу 150–156 МГц. Його значення методологічне: інфраструктурний оператор може встановлювати додаткові частотно-специфічні RF-вимоги, коли базовий стандарт недостатньо репрезентує характерні локальні передавачі. Для України конкретний рівень має бути визначений натурним RF-моніторингом на типових об’єктах СЦБ.

5. Від Національного додатка до технологічних норм ЕМС-проєктування

Національна специфіка полягає не в самій наявності потужних радіопередавачів – такі джерела існують і в Європі, а в конкретному поєднанні частотного плану, історично сформованого технологічного УКХ-зв'язку, сторонніх рухомих передавачів, геометрії їхнього можливого зближення з об'єктами СЦБ і сезонних умов заземлення. Для порівняння, у ЄС Railway Mobile Radio гармонізовано насамперед у смугах 874,4–880,0 МГц, 919,4–925,0 МГц і 1900–1910 МГц [27]. Тому національна адаптація має виходити з виміряного українського електромагнітного середовища, а не з припущення про відсутність аналогічних джерел у Європі.

Національний додаток до ДСТУ EN 50121-4 доцільно використовувати для визначення характерних електромагнітних впливів і випробувальних сценаріїв. Однак забезпечення ЕМС конкретного поста ЕЦ, переїзду, шафи автоблокування або іншого об'єкта є також проєктним завданням. Тому, крім Національного додатка, доцільно розробити галузеві технологічні норми ЕМС-проєктування, які встановлюватимуть ЕМС-зонування об'єкта; мінімальні відстані до передавальних антен; правила трасування та рознесення силових, сигнальних і радіочастотно вразливих кіл; вимоги щодо екранів, зонування і заземлення; захист портів; урахування сезонних станів ґрунту/баласту; порядок натурних вимірювань і верифікації ухвалених рішень. Для проєктувальника до ЕМС-карти об'єкта доцільно включати також таблицю частотно-залежних нормативних рівнів несприйнятливості та перелік локальних передавачів персоналу, зокрема портативних УКХ-радіостанцій і мобільних засобів зв'язку, із зазначенням сценаріїв мінімального просторового рознесення та способу їх верифікації.

Для систем різного рівня функціональної безпечності недоцільно механічно встановлювати різні значення Вольт на метр лише за номером SIL. Натомість зі зростанням критичності функції має зростати повнота доказу. Для SIL 3/SIL 4 доцільно документувати ланцюг «джерело завади – механізм зв'язку – порт – реакція обладнання – вплив на відповідальну функцію безпеки – захисний захід – верифікація» і включати результати до доказової бази Safety Case конкретного застосування.

Для практичного застосування запропонованого підходу проєктувальник має формувати для об'єкта ЕМС-карту: джерело і частота -> максимальна обґрунтовано передбачувана потужність -> геометрія/відстань -> механізм зв'язку -> порт обладнання -> функція безпеки -> захисний захід -> спосіб верифікації. Для УКХ 150–156 МГц основними заходами є ЕМС-зонування, просторове рознесення, екранування та перевірка сценаріїв використання портативних передавачів персоналом.

Результати та обговорення

Виконані інженерні розрахунки показують, що в діапазоні 150–156 МГц рівень 10 В/м може бути перевищений за реалістичних сценаріїв близького розташування штатних залізничних і дозволених в Україні сторонніх УКХ-передавачів. Для 27 МГц число 10 В/м використовують лише як довідкове зіставлення, оскільки норматив ДСТУ EN 50121-4 для випроміненого поля 10 В/м формально встановлений у смузі 80–800 МГц. Для 27 МГц застосовним є кондуктивний метод IEC 61000-4-6, тому пряме чисельне зіставлення Вольт на метр і Вольт не допускають. В усіх випадках розрахунки за формулою (1) є оцінюванням порядку величини та потребують підтвердження натурними вимірюваннями.

Отримані результати дають підставу для двох конкретних пропозицій. По-перше, для смуги 150–156 МГц доцільно відокремити спеціальний національний випробувальний сценарій, а його рівень установлювати за результатами натурних вимірювань на постах ЕЦ, переїздах і біля

шаф автоматики. Такий принцип має європейський інфраструктурний прецедент у ProRail RLN00007, де для характерної смуги портативного радіозв'язку застосовано 20 В/м замість базових 10 В/м [8]. По-друге, для 27 МГц доцільно нормувати не механічно перенесене значення Вольт на метр, а сценарій переходу зовнішнього поля в синфазну кондуктивну заваду на кабельних портах.

Обидва напрями узгоджені із загальним ризик-орієнтованим підходом щодо формування Національного додатка до ДСТУ EN 50121-4: не механічне підвищення рівня в усьому діапазоні, а формування процедури, яка встановлює, чи є базовий рівень репрезентативним для конкретного об'єкта і його інтерфейсів.

Практичний наслідок для проєктувальника полягає в тому, що ЕМС-аналіз має охоплювати не лише центральну апаратуру, а весь функціональний ланцюг введення-виведення, якщо його порушення може вплинути на функцію безпеки. Мобільні телефони та портативні радіостанції при цьому розглядають як передбачувані локальні джерела RF-впливу, а не як доведену причину відмови.

На окрему увагу в обговоренні заслуговує перспектива щодо мобільних телефонів і портативних радіостанцій персоналу. Навіть у разі ухвалення оновленого проєкту prEN 50121-4:2025 у Європі та гармонізованого з ним національного стандарту в Україні оновлені частотно-диференційовані рівні несприйнятливості, за наявною інформацією про проєкт, залишаються орієнтованими на типову відстань джерела завади (зазвичай від 1 м і більше, за методикою IEC 61000-4-3) і не покривають сценарії безпосереднього близького розташування персонального пристрою (одиниці — десятки сантиметрів) біля периферії АРМ ДСП чи відкритої апаратури СЦБ. Тому навіть за умови гармонізації продуктового стандарту проблема ЕМС і функціональної безпечності для сценаріїв близького розташування мобільних телефонів і портативних радіостанцій персоналу біля апаратури СЦБ, найімовірніше, залишатиметься актуальною і потребуватиме розв'язання не на рівні продуктового стандарту, а додатково на рівні організаційного регламенту, що обмежує використання особистих засобів радіозв'язку в безпосередній близькості від відкритої апаратури та периферії АРМ; верифікаційного випробування реальної конфігурації периферії, кабелів і портів апаратури за методологією випробувань на близькій відстані (IEC 61000-4-39) для відстаней до 0,2 м; включення функціонального ланцюга «периферія – інтерфейс – команда керування» до меж об'єкта ЕМС-верифікації для систем SIL 3/SIL 4. Навіть якщо майбутня редакція EN 50121-4 чи гармонізованого з нею національного стандарту розширить частотно-диференційовані рівні до неперервного покриття у смузі до 6 ГГц, це закриє прогалини між сусідніми смугами випробувань, але не вирішить сценарій безпосереднього близького розташування мобільного телефона чи портативної радіостанції біля апаратури СЦБ: будь-який продуктовий рівень несприйнятливості розраховують для типової відстані джерела, а не для контакту на рівні одиниць сантиметрів, тому організаційні та верифікаційні заходи, запропоновані вище, залишаються необхідними незалежно від подальшої еволюції продуктового стандарту.

Висновки

Виконано інженерну оцінку відповідності нормованих ДСТУ EN 50121-4 рівнів несприйнятливості апаратури СЦБ фактичному радіочастотному середовищу залізниць України. Розглянуто штатний і сторонній УКХ-радіозв'язок у смузі 150–156 МГц і відкритий СВ-діапазон 27 МГц. Показано, що документально підтверджені для України потужності УКХ-передавачів можуть формувати розрахункові рівні поля, вищі за базовий випробувальний рівень

10 В/м. Для частот 27 МГц запропоновано аналізувати не лише зовнішнє поле, а й синфазні кондуктивні завади, індуковані на кабельних портах. Запропоновано трирівневий підхід: Національний додаток має конкретизувати характерні електромагнітні впливи; галузеві технологічні норми проєктування – правила ЕМС-зонування, рознесення, прокладання кабелів, екранування, заземлення, захисту портів і верифікації рішень з урахуванням функціональної безпечності; регламент експлуатації - обмеження для персональних радіозасобів і перевірку цілісності засобів екранування.

Показано, що для технологічного радіозв'язку 150–156 МГц типові потужності стаціонарних і возимих радіостанцій на характерних відстанях можуть створювати розрахункові рівні, вищі за 10 В/м. Додатково встановлено, що в Україні офіційно допущена для застосування возимо-стаціонарна Motorola DM4600 типу MBA304N потужністю 25 Вт у смузі 150,05–156,7625 МГц [19]. За прийнятою моделлю на відстані 1 м це відповідає приблизно 38,7 В/м. Для 27 МГц розраховані значення напруженості поля не потрібно безпосередньо трактувати як перевищення нормативу 10 В/м, оскільки цей норматив випроміненого поля стосується 80–800 МГц; результати для 27 МГц характеризують потенційну інтенсивність зовнішнього впливу та необхідність окремого випробувального сценарію.

Усі наведені результати є оцінками порядку величини за спрощеною інженерною моделлю і потребують підтвердження натурними вимірюваннями на характерних об’єктах залізничної інфраструктури – станціях, переїздах, постах ЕЦ і шафах автоматики. Особливо це стосується відстаней близько десятків сантиметрів, де структура поля визначається випромінюванням реальною антеною, металевими корпусами, кабелями та взаємним розташуванням.

Обґрунтовано трирівневу модель національної адаптації ЕМС, що доповнює початкову дворівневу структуру експлуатаційним рівнем (розділ 1.5). На першому рівні Національний додаток до ДСТУ EN 50121-4 має визначати характерні для залізниць України частотні смуги, сценарії впливу та процедуру встановлення випробувальних рівнів за результатами натурних вимірювань. На другому рівні галузеві технологічні норми ЕМС-проєктування мають визначати практичні правила розміщення обладнання, рознесення та прокладання кабелів, екранування, заземлення, захисту портів і верифікації рішень з урахуванням функціональної безпечності. На третьому рівні регламент експлуатації і технічного обслуговування має визначати організаційні обмеження для персональних радіозасобів поблизу відкритої апаратури та періодичність перевірки цілісності пасивних засобів захисту (кабелів, екранів, з’єднувачів фідерних ліній), оскільки конструктивний захист втрачає ефективність у разі пошкодження екранування. Для 27 МГц доцільно поєднувати оцінювання зовнішнього поля з аналізом синфазної кондуктивної завади на кабельних портах; можливість установлення окремого польового випробувального рівня для 27 МГц має бути предметом натурних досліджень, а не механічного перенесення 10 В/м із діапазону 80–800 МГц.

Порівняльний аналіз показує, що європейська практика не обмежена єдиним способом адаптації EN 50121-4. У Польщі специфіку УКХ 150–156 МГц переважно враховують через відомчі вимоги щодо радіообладнання, тоді як ProRail у Нідерландах застосовує додатковий інфраструктурний рівень 20 В/м на визначених частотах 380–470 МГц замість базових 10 В/м [8]. Це підтверджує принципову допустимість частотно-специфічного посилення вимог, але конкретний український рівень для 150–156 МГц має

бути встановлений лише після натурного RF-моніторингу.

Окремим висновком є те, що проблема близького розташування мобільних телефонів і портативних радіостанцій персоналу біля апаратури СЦБ (розділи 1.4–1.5) не буде автоматично усунена ухваленням оновленого європейського проєкту стандарту prEN 50121-4:2025 чи гармонізованого з ним національного документа: оновлені частотно-диференційовані рівні несприйнятливості, за задумом, орієнтовані на типові відстані джерела завади, а не на сценарії безпосереднього близького розташування персонального пристрою біля периферії АРМ чи відкритої апаратури. Тому для систем безпеки рівнів SIL 3/SIL 4 продуктовий стандарт доцільно доповнювати організаційним обмеженням використання особистих засобів радіозв'язку поблизу відкритої апаратури; верифікаційним випробуванням периферії, кабелів і портів за методологією IEC 61000-4-39 для відстаней до 0,2 м; включенням функціонального ланцюга «периферія – інтерфейс – команда керування» до меж об'єкта EMC-верифікації. Це узгоджено із запропонованою трирівневою моделлю і залишається чинним незалежно від того, коли і в якому вигляді буде ухвалено prEN 50121-4:2025.

Список використаних джерел

1. Кабінет Міністрів України. (2013). Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту (Постанова № 494 від 11.07.2013, ред. від 03.05.2026). URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/494-2013-%D0%BF
2. Кабінет Міністрів України. (2015). Про затвердження Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту (Постанова № 1194 від 30.12.2015, ред. від 03.05.2026). URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1194-2015-%D0%BF
3. Кабінет Міністрів України. (2022). Про внесення змін до Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту і Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту (Постанова № 53 від 26.01.2022). URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/53-2022-%D0%BF
4. Верховна Рада України. (2026). Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України (Закон України № 4904-IX від 09.06.2026). URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/4904-20
5. ДСТУ EN 50121-4:2019 (EN 50121-4:2016, IDT). (2019). Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Частина 4. Емісія завад і несприйнятливість сигнальної та телекомунікаційної апаратури. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
6. Кустов, В. Ф., & Єлізаренко, А. О. (2026). Нормування і вплив завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц на порти живлення електронних пристроїв СЦБ рівнів SIL 3/4. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 216, 289–314. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362481
7. Sumiła, M. (2016). Dopuszczenie do użytkowania w radiołączności kolejowej w Polsce nowych radiotelefonów VHF. *Prace Instytutu Kolejnictwa*, 149, 33–39.
8. ProRail. (2020). RLN00007. EMC-eisen aan apparatuur nabij alle geëlektrificeerde en niet-geëlektrificeerde baanvakken in beheer bij ProRail (Richtlijn ProRail, versie 007). URL: https://www.tenderned.nl/papi/tenderned-rs-tns/v2/publicaties/407577/documenten/13539830/content
9. IEC 62236-4:2018. (2018). Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus. Geneva: IEC.

10. Midya, S., & Thottappillil, R. (2008). An overview of electromagnetic compatibility challenges in European Rail Traffic Management System. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(5), 515–534. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.11.001

11. Dudoyer, S., Deniau, V., Adriano, R., Ben Slimen, N., Rioult, J., Meyniel, B., & Berbineau, M. (2012). Study of the susceptibility of the GSM-R communications face to the electromagnetic interferences of the rail environment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54(3), 667–676. DOI: https://doi.org/10.1109/TEMC.2011.2169677

12. Кабінет Міністрів України. (2023). Про затвердження плану розподілу і користування радіочастотним спектром в Україні (Постанова № 1340 від 19.12.2023). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1340-2023-%D0%BF

13. Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: Analysis and design (4th ed.). John Wiley & Sons.

14. prEN 50121-4:2025. (2025). Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus. Brussels: CENELEC.

15. IEC 61000-4-39:2017. (2017). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-39: Testing and measurement techniques – Radiated fields in close proximity – Immunity test. Geneva: IEC.

16. 3GPP; IEEE 802.11. (б. д.). TS 38.101-1; TS 36.101. User Equipment (UE) radio transmission and reception — maximum output power classes for GSM, UMTS, LTE and Wi-Fi terminal equipment.

17. Van Lieshout, E. J., van der Veer, S. N., Hensbroek, R., Korevaar, J. C., Vroom, M. B., & Schultz, M. J. (2007). Interference by new-generation mobile phones on critical care medical equipment. *Critical Care*, 11(5), R98. DOI: https://doi.org/10.1186/cc6115

18. Lawrentschuk, N., & Bolton, D. M. (2004). Mobile phone interference with medical equipment and its clinical relevance: A systematic review. *The Medical Journal of Australia*, 181(3), 145–149. DOI: https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.2004.tb06205.x

19. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації. (2013). Про визначення можливим застосування радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв на території України (Рішення № 5 від 10.01.2013, додаток, поз. 3). URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vr005864-13

20. Верховна Рада України. (2024). Про внесення змін до деяких законів України щодо імплементації норм законодавства Європейського Союзу з питань роумінгу (Закон України № 3727-IX від 22.05.2024). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3727-20; Кодекс України про адміністративні правопорушення, ст. 146. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/ show/80731-10

21. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (б. д.). EMF-Monitoring: Anzeigen nach BEMFV. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/ Fachthemen/Telekommunikation/Technik/EMF/start.html

22. Безліцензійний радіозв'язок: довідковий матеріал щодо смуг радіочастот CB, LPD, PMR в Україні. (б. д.). URL: https://shop.micro-gis.com/radio-without-licenses_ua

23. IEC 61000-4-6:2023. (2023). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-6: Testing and measurement techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields. Geneva: IEC.

24. Coelho, V. L., Piantini, A., Almaguer, H. A. D., Coelho, R. A., Boaventura, W. D. C., & Paulino, J. O. S. (2015). The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems. *Electric Power Systems Research*, 118, 76–82. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027

25. Reffin, M. S., Abdul Ali, A. W., Mohamad Nor, N., Ahmad, N. N., Syed Abdullah, S. A., Mahmud, A., & Hanaffi, F. (2019). Seasonal influences on the impulse characteristics of grounding systems for tropical countries. *Energies*, 12(7), 1334. DOI: https://doi.org/10.3390/en12071334

26. IEC 61936-1:2021. (2021). Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC – Part 1: AC. Geneva: IEC.

27. European Commission. (2021). Commission Implementing Decision (EU) 2021/1730 of 28 September 2021 on the harmonised use of the paired frequency bands 874,4–880,0 MHz and 919,4–925,0 MHz and of the unpaired frequency band 1900–1910 MHz for Railway Mobile Radio (as amended by Implementing Decision (EU) 2026/291). URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2021/1730/oj/eng

References

1. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2013). Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlamentu bezpeky infrastruktury zaliznychnoho transportu [On approval of the Technical Regulation on the safety of railway transport infrastructure] (Resolution No. 494 of 11.07.2013, as amended on 03.05.2026). Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/go/494-2013-%D0%BF [in Ukrainian].

2. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2015). Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlamentu bezpeky rukhomoho skladu zaliznychnoho transportu [On approval of the Technical Regulation on the safety of railway rolling stock] (Resolution No. 1194 of 30.12.2015, as amended on 03.05.2026). Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/go/1194-2015-%D0%BF [in Ukrainian].

3. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2022). Pro vnesennia zmin do Tekhnichnoho rehlamentu bezpeky infrastruktury zaliznychnoho transportu i Tekhnichnoho rehlamentu bezpeky rukhomoho skladu zaliznychnoho transportu [On amendments to the Technical Regulation on the safety of railway transport infrastructure and the Technical Regulation on the safety of railway rolling stock] (Resolution No. 53 of 26.01.2022). Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/go/53-2022-%D0%BF [in Ukrainian].

4. Verkhovna Rada Ukrainy. (2026). Pro bezpeku ta interoperabelnist na zaliznychnomu transporti Ukrainy [On safety and interoperability in railway transport of Ukraine] (Law of Ukraine No. 4904-IX of 09.06.2026). Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/go/4904-20 [in Ukrainian].

5. DSTU EN 50121-4:2019 (EN 50121-4:2016, IDT). (2019). Zaliznychnyi transport. Elektromahnitna sumisnist. Chastyna 4. Emisiia zavad i nespryiniatlyvist syhnalnoi ta telekomunikatsiinoi aparatury [Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 4. Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus]. Kyiv: DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].

6. Kustov, V. F., & Yelizarenko, A. O. (2026). Normuvannia i vplyv zavad poiznoho radiozviazku 2,13 i 2,15 MHz na porty zhyvlennia elektronnykh prystroiv STsB rivniv SIL 3/4 [Standardization and influence of train radio interference at 2.13 and 2.15 MHz on power ports of SIL 3/4 signalling electronic devices]. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 216, 289–314. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362481 [in Ukrainian].

7. Sumiła, M. (2016). Dopuszczenie do użytkowania w radiołączności kolejowej w Polsce nowych radiotelefonów VHF [Approval of new VHF radiotelephones for use in railway radio communication in Poland]. *Prace Instytutu Kolejnictwa*, 149, 33–39 [in Polish].

8. ProRail. (2020). RLN00007. EMC-eisen aan apparatuur nabij alle geëlektrificeerde en niet-geëlektrificeerde baanvakken in beheer bij ProRail [EMC requirements for equipment near all electrified and non-electrified track sections managed by ProRail] (ProRail Guideline, version 007). Retrieved from: https://www.tenderned.nl/papi/tenderned-rs-tns/v2/publicaties/407577/documenten/13539830/content [in Dutch].

9. IEC 62236-4:2018. (2018). Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus. Geneva: IEC [in English].

10. Midya, S., & Thottappillil, R. (2008). An overview of electromagnetic compatibility challenges in European Rail Traffic Management System. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(5), 515–534. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.11.001 [in English].

11. Dudoyer, S., Deniau, V., Adriano, R., Ben Slimen, N., Rioult, J., Meyniel, B., & Berbineau, M. (2012). Study of the susceptibility of the GSM-R communications face to the electromagnetic interferences of the rail environment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54(3), 667–676. DOI: https://doi.org/10.1109/TEMC.2011.2169677 [in English].

12. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2023). Pro zatverdzhennia planu rozpodilu i korystuvannia radiochastotnym spektrom v Ukraini [On approval of the plan for the allocation and use of the radio frequency spectrum in Ukraine] (Resolution No. 1340 of 19.12.2023). Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1340-2023-%D0%BF [in Ukrainian].

13. Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: Analysis and design (4th ed.). John Wiley & Sons [in English].

14. prEN 50121-4:2025. (2025). Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus. Brussels: CENELEC [in English].

15. IEC 61000-4-39:2017. (2017). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-39: Testing and measurement techniques – Radiated fields in close proximity – Immunity test. Geneva: IEC [in English].

16. 3GPP; IEEE 802.11. (n.d.). TS 38.101-1; TS 36.101. User Equipment (UE) radio transmission and reception — maximum output power classes for GSM, UMTS, LTE and Wi-Fi terminal equipment [in English].

17. Van Lieshout, E. J., van der Veer, S. N., Hensbroek, R., Korevaar, J. C., Vroom, M. B., & Schultz, M. J. (2007). Interference by new-generation mobile phones on critical care medical equipment. *Critical Care*, 11(5), R98. DOI: https://doi.org/10.1186/cc6115 [in English].

18. Lawrentschuk, N., & Bolton, D. M. (2004). Mobile phone interference with medical equipment and its clinical relevance: A systematic review. *The Medical Journal of Australia*, 181(3), 145–149. DOI: https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.2004.tb06205.x [in English].

19. Natsionalna komisiia, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuvannia u sferi zviazku ta informatyzatsii. (2013). Pro vyznachennia mozhlyvym zastosuvannia radioelektronnykh zasobiv ta vyprominiuvalnykh prystroiv na terytorii Ukrainy [On determining the possibility of using radio electronic means and radiating devices on the territory of Ukraine] (Decision No. 5 of 10.01.2013, annex, item 3). Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vr005864-13 [in Ukrainian].

20. Verkhovna Rada Ukrainy. (2024). Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo implementatsii norm zakonodavstva Yevropeiskoho Soiuzu z pytan rouminhu [On amendments to certain laws of Ukraine regarding the implementation of European Union legislation on roaming] (Law of Ukraine No. 3727-IX of 22.05.2024). Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3727-20; Kodeks Ukrainy pro administratyvni pravoporushennia [Code of Ukraine on Administrative Offenses], art. 146. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10 [in Ukrainian].

21. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (n.d.). EMF-Monitoring: Anzeigen nach BEMFV [EMF monitoring: Notifications under BEMFV]. Retrieved from: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Technik/EMF/start.html [in German].

22. Bezlitsenziinyi radiozviazok: dovidkovyi material shchodo smuh radiochastot CB, LPD, PMR v Ukraini [License-free radio communication: Reference material on CB, LPD and PMR radio frequency bands in Ukraine]. (n.d.). Retrieved from: https://shop.micro-gis.com/radio-without-licenses_ua [in Ukrainian].

23. IEC 61000-4-6:2023. (2023). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-6: Testing and measurement techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields. Geneva: IEC [in English].

24. Coelho, V. L., Piantini, A., Almaguer, H. A. D., Coelho, R. A., Boaventura, W. D. C., & Paulino, J. O. S. (2015). The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems. *Electric Power Systems Research*, 118, 76–82. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027 [in English].

25. Reffin, M. S., Abdul Ali, A. W., Mohamad Nor, N., Ahmad, N. N., Syed Abdullah, S. A., Mahmud, A., & Hanaffi, F. (2019). Seasonal influences on the impulse characteristics of grounding systems for tropical countries. *Energies*, 12(7), 1334. DOI: https://doi.org/10.3390/en12071334 [in English].

26. IEC 61936-1:2021. (2021). Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC – Part 1: AC. Geneva: IEC [in English].

27. European Commission. (2021). Commission Implementing Decision (EU) 2021/1730 of 28 September 2021 on the harmonised use of the paired frequency bands 874,4–880,0 MHz and 919,4–925,0 MHz and of the unpaired frequency band 1900–1910 MHz for Railway Mobile Radio (as amended by Implementing Decision (EU) 2026/291). Retrieved from: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2021/1730/oj/eng [in English].

Кустов Віктор Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-9773-5470. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.
Єлізаренко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-8567-7576. E-mail: elizarenko1@ukr.net.

Viktor F. Kustov, PhD (Tech.), Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-9773-5470. Тел.: +38(057) 730-10-32.
E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.
Andriy O. Yelizarenko, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-8567-7576.
E-mail: elizarenko1@ukr.net.

Дата надходження статті: 31.08.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 23.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

УДК 656.022

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ» ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ TEL TSI

Д-р техн. наук К. А. Трубчанінова, канд. техн. наук В. М. Запара, д-р філософії К. О. Тарасов, асп. С. Г. Сеник

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF ENSURING INFORMATION INTEROPERABILITY OF JSC UKRZALIZNYTSIA'S AUTOMATED SYSTEMS IN ACCORDANCE WITH TEL TSI REQUIREMENTS

Dr. Sc. (Tech.) K. Trubchaninova, PhD (Tech.) V. Zapara, PhD K. Tarasov, postgraduate student S. Senyk

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.374156

Анотація. *Інтеграція залізничної системи України до європейського транспортного простору потребує забезпечення сумісності не лише технічних, а й інформаційних процесів. TEL TSI встановлює спільні вимоги щодо обміну даними між учасниками перевізного процесу, тоді як значна частина необхідної інформації вже формується в автоматизованих системах АТ «Укрзалізниця», але може відрізнятися за структурою, семантикою та способом подання.*

У роботі запропоновано підхід для організації двосторонньої інформаційної взаємодії автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» з TEL TSI із застосуванням програмного інтеграційного шлюзу. Розроблено класифікацію інформаційних відповідностей, що включає пряму відповідність, кодове або форматне перетворення, перетворення за додатковою умовою, агрегування, обчислення нового значення та відсутність необхідних даних. Формалізовано правила функціонування шлюзу та запропоновано показники інформаційного покриття, необхідності перетворення, розрахунку і відсутності даних. Попередню апробацію виконано на прикладі подій, передбачених повідомленням WagonStatusMessage. Запропонований підхід дає змогу оцінити інформаційну готовність існуючих систем до реалізації вимог TEL TSI і визначити необхідні напрями їхньої подальшої інтеграції.

Ключові слова: *інтероперабельність, TEL TSI, залізничний транспорт, інформаційна взаємодія, прикордонні перевезення.*

Abstract. *The integration of the Ukrainian railway system into the European transport space requires not only technical and operational compatibility but also interoperability of information processes and data exchange. The introduction of the Telecommunication and Telematics Applications for Railways Technical Specification for Interoperability (TEL TSI) establishes common requirements for the exchange of information between participants in the rail transportation process. At the same time, a significant part of the information required by TEL TSI is already generated and stored in the automated information systems of JSC "Ukrzaliznytsia". However, these data may differ in structure, codes, formats, and conditions of use, which complicates their direct application for cross-border information exchange.*

The paper proposes a formalized approach to organizing two-way information interaction between the

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Трубчанінова К. А., Запара В. М., Тарасов К. О., Сеник С. Г., 2026.

automated systems of JSC "Ukrzaliznytsia" and the TEL TSI environment through a software integration gateway. The gateway is intended to receive data from existing information systems, normalize and validate them, determine the context of the transportation process, apply the required transformation rules, and generate information objects and messages in accordance with TEL TSI requirements. A classification of information correspondences has been developed, including direct correspondence, code or format conversion, conversion based on additional conditions, aggregation of data from several sources, calculation of a new value, and absence of a required data source. For each type, the corresponding processing procedure and conditions for its application are defined.

To assess the information readiness of existing systems, indicators of information coverage, transformation requirements, calculation requirements, and absence of required data are proposed. The practical applicability of the approach was preliminarily tested using the WagonStatusMessage process. The analysis showed that information analogues can be identified in the JSC "Ukrzaliznytsia" information environment for 9 of 11 event types, corresponding to 81.8% event coverage. The obtained result characterizes only the coverage of events and does not represent a complete assessment of technical or information readiness. The proposed approach provides a basis for identifying information gaps, determining the required data transformations, and planning further integration of Ukrainian railway information systems with the TEL TSI environment.

Keywords: *interoperability, TEL TSI, rail transport, information interaction, cross-border transportation.*

Вступ. Поглиблення інтеграції залізничного транспорту України до європейського транспортного простору зумовлює необхідність приведення його функціонування до вимог інтероперабельності. Ухвалення Закону України «Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України» від 9 червня 2026 року № 4904-IX сформувало нормативне підґрунтя для цього процесу. Відповідно до Закону, інтероперабельність визначена як здатність залізничної системи та її підсистем гарантувати безпеку і безперебійність руху з належним рівнем експлуатаційної ефективності завдяки технічній, функціональній, операційній і нормативній сумісності [1].

Як відомо, важливою складовою інтероперабельності є узгоджений інформаційний обмін між учасниками перевізного процесу. Його забезпечення потребує сумісності даних, що використовують під час планування перевезень, формування поїздів, управління рухом, оформлення перевізних документів та інших технологічних процесів.

Новий етап розвитку інформаційної інтероперабельності пов'язаний з ухваленням Commission Implementing Regulation (EU) 2026/253 від 6 лютого 2026 року, яким запроваджено єдину технічну специфікацію TEL TSI і скасовано попереднє окреме регулювання телематичних застосунків для пасажирських TAP TSI і вантажних TAF TSI перевезень [2]. TEL TSI встановлює спільні вимоги щодо обміну даними та передбачає використання узгодженої семантики, ERA Ontology, спільних довідкових даних (common reference data), а також моделей даних і повідомлень.

Водночас в АТ «Укрзалізниця» уже функціонує комплекс автоматизованих систем, у яких формована значна частина інформації, необхідна для перевізного процесу. До них належать АСК ВП УЗ-Є, АСК ПП УЗ, технічні та нормативно-довідкові бази даних, а також системи оперативного управління рухом. Зокрема, АСК ВП УЗ-Є розглядають як базове інформаційне середовище управління вантажними перевезеннями, у якому накопичувані оперативні дані про об'єкти перевізного процесу [10].

Тому актуальним є визначення того, які інформаційні елементи, необхідні відповідно до TEL TSI, уже сформовані в автоматизованих системах АТ «Укрзалізниця», у якому вигляді вони подані та яких перетворень потребують для забезпечення інформаційної сумісності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання інтероперабельності розглядають у сучасних дослідженнях як важливу умову розвитку та підвищення ефективності транспортних систем. У роботі [3] інтероперабельність визначено як один із принципів організації системи інтермодальних перевезень.

Безпосередньо питання впровадження технічних специфікацій розглянуто в роботі [4]. У ній показано значення TSI для забезпечення сумісності залізничних систем і необхідність їх упровадження в Україні як складової інтеграції до європейського залізничного простору.

Подальші дослідження зосереджені на цифровій взаємодії різних інформаційних систем, у роботі [5] розглянуто створення спільного підходу для організації даних європейського залізничного сектору. У науковій праці [6] автори показали, що для ефективного обміну недостатньо лише забезпечити доступ до інформації - дані також мають бути узгодженими та зрозумілими для різних систем.

Питання узгодження інформації з різних джерел і нормативних документів на основі різних підходів запропоновано в роботах [7-9], де для взаємодії існуючих систем передбачено використання проміжного рівня інтеграції та спільної моделі даних. Подібний напрям розвивають у європейських проєктах LINX4RAIL і LINX4RAIL-2 [10].

Отже, проведені дослідження сформували підходи щодо забезпечення технічної та цифрової інтероперабельності, узгодження даних і створення механізмів взаємодії між різними інформаційними системами.

Водночас, у проаналізованих роботах не вирішено завдання визначення способів отримання конкретних інформаційних елементів TEL TSI з існуючих автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» і кількісного оцінювання готовності наявного інформаційного середовища до такого обміну. Зокрема, необхідно визначити, чи може інформація бути передана безпосередньо, чи потребує вона перетворення, уточнення залежно від умов перевезення, об'єднання даних із декількох джерел, розрахунку нового значення або взагалі відсутня.

Визначення мети та завдань дослідження. Метою дослідження є розроблення формалізованого підходу щодо забезпечення інформаційної взаємодії між автоматизованими системами АТ «Укрзалізниця» і телематичним середовищем TEL TSI через визначення відповідності між інформаційними елементами та оцінювання готовності існуючих інформаційних ресурсів до реалізації вимог інтероперабельності.

Для досягнення поставленої мети необхідно визначити принципи інформаційної взаємодії автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» із TEL TSI і функціонування програмного інтеграційного шлюзу; формалізувати відповідність між інформаційними елементами двох середовищ і класифікувати її за характером необхідного перетворення; запропонувати показники оцінювання інформаційної відповідності та виявлення інформаційних розривів; виконати апробацію запропонованого підходу на одному з інформаційних процесів TEL TSI.

Основна частина дослідження. Аналіз функціональних вимог TEL TSI показує, що інформація, необхідна для реалізації передбачених специфікацією процесів, не може бути отримана з однієї автоматизованої системи.

Інформаційне середовище АТ «Укрзалізниця» доцільно розглядати як сукупність взаємопов'язаних інформаційних

джерел, до яких у межах цього дослідження віднесено АСК ВП УЗ-Є, АСК ПП УЗ, технічні бази даних, системи оперативного управління та контролю руху поїздів, а також нормативно-довідкові бази даних.

Безпосереднє підключення кожної із зазначених систем до зовнішнього TEL TSI середовища призводило б до необхідності створення значної кількості окремих інтерфейсів, дублювання процедур зіставлення і перетворення та ускладнювало подальше супроводження інформаційної взаємодії. Тому автори запропонували використовувати проміжний програмний інтеграційний шлюз, структурну схему якого наведено на рисунку.



Рис. Структурна схема двосторонньої інформаційної взаємодії автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» із середовищем TEL TSI

Програмний шлюз виконує функції отримання даних з існуючих систем, їх нормалізації, визначення контексту перевізного процесу, застосування правил інформаційного перетворення, валідації та формування інформаційних об'єктів і повідомлень відповідно до вимог TEL TSI.

При цьому TEL TSI не зводить інформаційну сумісність лише до єдиного формату передавання. Регламент передбачає використання спільних довідкових даних (common reference data) та узгодженої семантики даних (common semantics), що забезпечує єдине розуміння змісту інформації всіма учасниками обміну. Тому для забезпечення інформаційної взаємодії недостатньо лише встановити технічний формат передавання даних, а необхідно визначити, як саме інформаційні елементи, що вже формовані в автоматизованих системах АТ «Укрзалізниця», співвідносяться з інформаційними елементами TEL TSI і яких перетворень вони потребують. Для цього доцільно формалізувати інформаційну відповідність між двома середовищами.

Для початку позначимо множину інформаційних елементів, доступних в інформаційних системах АТ «Укрзалізниця», як U:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\} , \qquad (1)$$

де u_i – окремий інформаційний елемент систем УЗ;

m – загальна кількість інформаційних елементів, які аналізують.

Множину інформаційних елементів, необхідних для реалізації TEL TSI, представимо як E:

$$E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_m\} \ , \qquad (2)$$

де e_j – окремий інформаційний елемент TEL TSI;

m – загальна кількість таких елементів.

У найпростішому випадку між елементами може існувати однозначна відповідність:

$$u_i \rightarrow \ e_j \ . \qquad (3)$$

Однак така відповідність характерна лише для певної частини даних. В інших випадках для формування інформаційного елемента TEL TSI може знадобитися перетворення наявного значення, урахування додаткових умов, використання довідкової інформації, об'єднання даних із декількох джерел або виконання додаткового розрахунку. Тому для кожного елемента TEL TSI необхідно визначити, які вихідні дані систем УЗ використано для його формування та який спосіб їх обробки необхідний. Залежно від цього запропоновано виділити шість типів інформаційної відповідності, наведених у таблиці.

Таблиця

Класифікація типів інформаційної відповідності

Тип	Вид відповідності	Характер даних	Необхідна дія
D	Пряма відповідність	Необхідне значення вже наявне	Передавання
M	Кодове або форматне перетворення	Дані наявні, але відрізняється спосіб подання	Переформатування
C	Перетворення за додатковою умовою	Значення TEL TSI залежить від додаткових умов	Вибір відповідного значення TEL TSI
A	Агрегування	Дані розподілені між декількома джерелами	Об'єднання
R	Обчислення нового значення	Вихідні дані наявні, готовий результат відсутній	Розрахунок
N	Відсутність необхідного джерела	Наявної інформації недостатньо	Нове або додаткове джерело

За таблицею, до прямої відповідності (*D*) належить випадок, коли інформаційний елемент, необхідний відповідно для TEL TSI, уже існує в одній із систем УЗ і має еквівалентне семантичне значення. У цьому випадку

$$e_j = \ u_i \ . \qquad (4)$$

Назви або технічне подання полів можуть відрізнятися, однак зміст інформації залишається тотожним. Завдання шлюзу полягає переважно в передаванні цього значення до відповідного TEL TSI об'єкта.

Наступний тип (*M*) характеризує ситуацію, коли необхідна інформація існує, але подана за допомогою іншого коду, ідентифікатора, формату або структури, тоді

$$e_j = \ M_j(u_i), \qquad (5)$$

де M_j – функція форматного перетворення.

Якщо перетворення пов'язане з використанням різних систем кодування, відповідність між кодами УЗ і TEL TSI може бути задана множиною пар:

$$M = \{(c_1^{uz}, c_1^{tel}), (c_2^{uz}, c_2^{tel}), \ldots, (c_k^{uz}, c_k^{tel})\}, \quad (6)$$

де c_k^{uz} – код, що використано в інформаційних системах УЗ;

c_k^{tel} – відповідний йому код або ідентифікатор, прийнятий у середовищі TEL TSI.

У цьому випадку первинна інформація не створена, а шлюз лише приводить уже наявне значення до прийнятого TEL TSI подання.

Більш складним є випадок, коли значення TEL TSI неможливо однозначно визначити лише за одним внутрішнім кодом або операцією, тоді використовують перетворення за додатковою умовою (тип *C*):

$$e_j = \mathrm{C}_j(u_i, \gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_p), \quad (7)$$

де C_j – функція перетворення за додатковою умовою;

γ_p – умови, необхідні для вибору відповідного значення TEL TSI.

До таких умов можуть належати роль станції в маршруті перевезення, поточний стан об'єкта, етап виконання перевезення, роль учасника в певній операції та інші характеристики, які уточнюють значення вихідних даних.

Наприклад, у системі УЗ може бути зафіксовано операцію прибуття вагона. Для TEL TSI необхідно додатково визначити, на яку саме станцію він прибув. Якщо це проміжна станція, то формують подію Wagon Arrival, а якщо станція призначення - Wagon Reached Destination.

Наступний тип (*A*) характеризує ситуацію, коли вся інформація, необхідна для формування TEL TSI елемента або об'єкта, існує, однак розподілена між декількома джерелами, у такому випадку

$$e_j = A_j(u_{i1}, u_{i2}, \ldots, u_{ik}), \quad (8)$$

де A_j – функція агрегування.

У цьому випадку шлюз отримує окремі інформаційні елементи з різних автоматизованих систем, поєднує їх і формує єдиний інформаційний об'єкт відповідно до структури TEL TSI.

Тип *R* використовують тоді, коли готового значення в інформаційних системах УЗ немає, однак наявних вихідних даних достатньо для його розрахунку. У цьому випадку програмний шлюз не просто об'єднує вже існуючі відомості, а формує новий інформаційний елемент на основі визначеного алгоритму.

Саме цим тип *R* відрізняється від типу *A*. З агрегуванням усі необхідні значення вже існують у різних джерелах, і шлюз лише поєднує їх в один інформаційний об'єкт. Для застосування типу *R* готового результату немає, тому він має бути розрахований на основі наявної інформації.

Наприклад, до такого типу можуть належати прогнозні характеристики руху. Для визначення прогнозного часу прибуття можна використовувати плановий час, фактичне місцезнаходження поїзда, поточне відхилення від графіка та інші оперативні дані. На основі цих відомостей формують нове прогнозне значення, якого безпосередньо в жодному з вихідних джерел не було.

Останній тип *N* використовують тоді, коли в наявних інформаційних системах УЗ недостатньо даних для формування необхідного елемента TEL TSI. У такому випадку інформацію неможливо отримати ні прямим передаванням, ні перетворенням, ні об'єднанням даних із кількох джерел, ні за допомогою додаткового розрахунку.

Це означає, що проблема полягає вже не в роботі інтеграційного шлюзу, а у відсутності необхідної первинної інформації. Для усунення такого розриву потрібно або підключити додаткове джерело даних, або розширити функціональність існуючої системи, або організувати формування нових інформаційних елементів.

Визначення типу інформаційної відповідності дає змогу встановити характер необхідної дії, однак для роботи програмного шлюзу необхідно також визначити, як саме ця дія має бути виконувана для конкретного інформаційного елемента TEL TSI. Для цього пропонуємо сформувати множину правил:

$$P = \{p_1, p_2, \ldots, p_s\}, \quad (9)$$

де p_s – окреме правило інформаційного перетворення;

s – загальна кількість таких правил.

Для формування конкретного інформаційного елемента TEL TSI e_j із множини U також визначають сукупність необхідних вихідних даних:

$$S_j = \{u_{i1}, u_{i2}, \ldots, u_{ik}\} \subseteq U, \quad (10)$$

де S_j — сукупність інформаційних елементів систем УЗ, необхідних для формування елемента e_j.

Для кожної такої відповідності попередньо встановлюють один із визначених у таблиці типів:

$$t_j \in \{D, M, C, A, R, N\}, \quad (11)$$

де t_j – тип інформаційної відповідності для елемента e_j.

Встановлений тип визначає характер правила, яке необхідно застосувати до вихідних даних. Тому множину правил P доцільно формувати з урахуванням відповідних типів інформаційної відповідності. Для кожного елемента e_j, крім випадку типу N, вибирають конкретне правило p_s, відповідно до якого обробляють вихідні дані.

У загальному випадку формування елемента TEL TSI можна подати як

$$e_j = p_s(S_j, Z, Q), \quad p_s \in P_{t_j}, \quad (12)$$

де Z – додаткові умови, які за необхідності враховують під час обробки даних;

Q – довідкова інформація, необхідна для приведення даних до прийнятих у TEL TSI позначень та ідентифікаторів;

P_{t_j} – група правил, що відповідає встановленому типу інформаційної відповідності t_j.

При цьому використання Z та Q не є обов'язковим для кожного інформаційного елемента, а залежить від характеру його відповідності. Наприклад, для прямої відповідності може бути достатньо лише вихідного значення u_i, тоді як для перетворення за додатковою умовою необхідно також ураховувати відповідні умови Z.

Для типу N правило формування елемента e_j на основі наявної множини U відсутнє, оскільки існуючих даних недостатньо. У такому випадку необхідним є залучення нового або додаткового джерела інформації.

Запропонована класифікація дає змогу не лише визначити спосіб формування окремих інформаційних елементів TEL TSI, а й оцінити, наскільки наявне інформаційне середовище АТ «Укрзалізниця» готове до забезпечення відповідного інформаційного обміну. Після встановлення типу відповідності для кожного інформаційного елемента TEL TSI у межах функціонального блока i визначають кількість елементів, віднесених до кожного з раніше визначених типів D, M, C, A, R та N. При цьому загальна кількість інформаційних елементів L, що оцінюють у межах функціонального блоку i, становить

$$L_i = n_{D,i} + n_{M,i} + n_{C,i} + n_{A,i} + n_{R,i} + n_{N,i}\,, \quad (13)$$

де $n_{D,i},\ldots,n_{N,i}$ – кількість інформаційних елементів відповідного типу у функціональному блоці *i*.

При цьому до *Li* не включають службові елементи, які автоматично формує сам програмний шлюз, а також дані, що отримують із зовнішніх довідкових ресурсів TEL TSI. Їх відсутність у внутрішніх системах УЗ не свідчить про недостатність інформаційного середовища.

Для визначення частки вимог TEL TSI, які можуть бути забезпечені на основі вже наявних в інформаційних системах УЗ даних, запропоновано використовувати коефіцієнт інформаційного покриття K_i^{cov} :

$$K_i^{cov} = \frac{n_{D,i}+n_{M,i}+n_{C,i}+n_{A,i}}{L_i}\,. \quad (14)$$

До чисельника в цьому випадку включені лише ті випадки, коли необхідна первинна інформація вже наявна в системах УЗ: її можна передати безпосередньо, переформатувати, використати з урахуванням додаткової умови або об'єднати з даними інших джерел, при цьому значення коефіцієнта знаходиться в межах від 0 до 1. Чим ближче значення K_i^{cov} до 1, тим більша частина вимог TEL TSI може бути забезпечена на основі вже існуючих інформаційних ресурсів АТ «Укрзалізниця».

Водночас сама наявність інформації ще не означає можливість її безпосереднього використання в TEL TSI. Частина даних може потребувати додаткової обробки програмним шлюзом. Для оцінювання такої потреби запропоновано коефіцієнт необхідності трансформації K_i^{tr} :

$$K_i^{tr} = \frac{n_{M,i}+n_{C,i}+n_{A,i}}{n_{D,i}+n_{M,i}+n_{C,i}+n_{A,i}}\,. \quad (15)$$

Коефіцієнт K_i^{tr} набуває значень у межах від 0 до 1. Чим менше його значення, тим більша частина наявної інформації може бути використана безпосередньо, без додаткової обробки.

Також окремо необхідно врахувати інформаційні елементи типу *R*, для яких готового значення в системах УЗ немає, однак наявних вихідних даних достатньо для його розрахунку**.** Для цього запропоновано коефіцієнт K_i^{calc}:

$$K_i^{calc} = \frac{n_{R,i}}{L_i}\,. \quad (16)$$

Він показує частку вимог TEL TSI, для реалізації яких необхідно не просто передати або перетворити наявну інформацію, а сформувати нове значення через розрахунок.

Зростання K_i^{calc} свідчить про необхідність створення в інтеграційному шлюзі або пов'язаних із ним системах додаткових розрахункових чи прогнозних функцій.

Для визначення частки вимог, для яких не встановлено достатнього джерела даних, запропоновано коефіцієнт K_i^{gap} :

$$K_i^{gap} = \frac{n_{N,i}}{L_i}. \quad (17)$$

Коефіцієнт K_i^{gap}, аналогічно до попередніх, набуває значень у межах від 0 до 1 і характеризує частку інформаційних елементів TEL TSI, для формування яких необхідно підключити додаткове джерело даних, розширити існуючі інформаційні системи або організувати формування нової первинної інформації.

Чим менше значення K_i^{gap}, тим менше інформаційних вимог залишається незабезпеченими. Зростання цього коефіцієнта, навпаки, свідчить про збільшення частки вимог, реалізація яких

неможлива лише за рахунок існуючого інформаційного середовища.

Отже, запропоновані коефіцієнти характеризують різні сторони інформаційної готовності. При цьому для кожного функціонального блока виконуване співвідношення

$$K_i^{cov} + K_i^{calc} + K_i^{gap} = 1. \quad (18)$$

Коефіцієнт K_i^{tr} до цього співвідношення не включений, оскільки він додатково характеризує структуру вже наявної інформації та показує, яка її частка потребує перетворення.

Оскільки кожен із запропонованих коефіцієнтів характеризує окрему сторону інформаційної готовності, для функціонального блока i доцільно використовувати їхню сукупність у вигляді вектора I_i:

$$I_i = (K_i^{cov}, K_i^{tr}, K_i^{calc}, K_i^{gap}). \quad (19)$$

У цьому випадку I_i не є сумою чотирьох показників, а являє собою комплексну характеристику функціонального блока. Включення до неї K_i^{tr} дає змогу, крім загального рівня інформаційного покриття, додатково оцінити обсяг перетворень, необхідних для вже наявної інформації.

Запропоновані показники допомагають оцінювати інформаційну готовність не лише окремого функціонального блока, а й усієї сукупності вимог TEL TSI, включених до дослідження. Для цього результати за окремими блоками доцільно узагальнити з урахуванням кількості інформаційних елементів у кожному з них.

Загальний коефіцієнт інформаційного покриття (K_{cov}^{TEL}) визначають як

$$K_{cov}^{TEL} = \frac{\sum_{i=1}^{z}(n_{D,i}+n_{M,i}+n_{C,i}+n_{A,i})}{\sum_{i=1}^{z} L_i}, \quad (20)$$

де z – кількість функціональних блоків TEL TSI, включених до аналізу.

Отже, показник K_{cov}^{TEL} характеризує частку всіх досліджуваних інформаційних вимог TEL TSI, які можуть бути забезпечені на основі даних, що вже наявні в інформаційному середовищі АТ «Укрзалізниця».

Загальний коефіцієнт необхідності розрахунку K_{cov}^{TEL} визначають як

$$K_{calc}^{TEL} = \frac{\sum_{i=1}^{z} n_{R,i}}{\sum_{i=1}^{z} L_i}. \quad (21)$$

Він показує частку всіх інформаційних елементів TEL TSI, для формування яких наявних вихідних даних достатньо, однак необхідно виконати додатковий розрахунок або сформувати нове прогнозне значення.

Загальний коефіцієнт відсутності необхідних данихK_{gap}^{TEL} визначають як

$$K_{gap}^{TEL} = \frac{\sum_{i=1}^{z} n_{N,i}}{\sum_{i=1}^{z} L_i}. \quad (22)$$

Цей показник показує частку всіх вимог TEL TSI, які не можуть бути реалізовані на основі наявної інформації та потребують підключення додаткових джерел даних або розширення існуючих інформаційних систем.

Оскільки всі інформаційні елементи розподілені між трьома узагальненими групами, їхня сукупна частка становить 100 % загальної кількості оцінюваних елементів. Коефіцієнт K_{tr}^{TEL}, аналогічно до попереднього співвідношення, до загального розподілу не включений, оскільки має додатковий характер.

Для перевірки можливості практичного застосування запропонованого підходу виконано попереднє зіставлення типів подій повідомлення WagonStatusMessage TEL TSI з інформацією про вагонні та поїзні операції, яка формована в інформаційному середовищі АТ «Укрзалізниця».

Відповідно до TEL TSI, повідомлення WagonStatusMessage використовують для інформування про поточне місцезнаходження і стан вантажного вагона. Для нього передбачено 11 типів подій: Wagon Ready To Pull, Wagon Pulled, Wagon Left Origin, Wagon Arrival, Wagon Departure, Wagon Handed Over, Wagon Taken Over, WagonJourneyIrregularity, Wagon Journey Rectified, Wagon Reached Destination і Wagon Delivered [12].

Попередній аналіз показав, що для 9 із 11 типів подій (81,8 %) можуть бути встановлені інформаційні аналоги в середовищі УЗ. Це стосується операцій готовності та забирання вагона, відправлення з початкової станції, прибуття і відправлення на проміжних станціях, фіксації несправності та її усунення, прибуття на станцію призначення і подавання вагона одержувачу. Відповідна інформація про поїзні та вагонні операції формована в АСК ВП УЗ-Є і пов'язаних автоматизованих робочих місцях [11], зокрема через повідомлення про фактичне прибуття і відправлення, а також повідомлення про зміну технічного стану вагона.

Для подій Wagon Handed Over і Wagon Taken Over, що характеризують передавання і приймання вагона між послідовними залізничними підприємствами, однозначне зіставлення з конкретними внутрішніми повідомленнями АСК ВП УЗ-Є у межах використаних джерел потребує додаткового уточнення. При цьому відносити їх до типу *N* недоцільно, оскільки відсутність підтвердження у відкритих джерелах не означає відсутності відповідної інформації в системах УЗ.

Отриманий результат свідчить про те, що значна частина даних про зміни стану вагона, передбачених повідомленням WagonStatusMessage, може бути сформована на основі відомостей, які вже генеровані в автоматизованих системах АТ «Укрзалізниця». Водночас значення 81,8 % характеризує лише покриття передбачених повідомленням подій і не є оцінкою повної інформаційної або технічної готовності до формування WagonStatusMessage, оскільки інші елементи повідомлення на цьому етапі не оцінені.

Проведене зіставлення також підтвердило доцільність виділення типу *C* - перетворення за додатковою умовою. Так, операція прибуття вагона залежно від ролі станції в маршруті може відповідати Wagon Arrival для проміжної станції або Wagon Reached Destination для станції призначення. Аналогічно відправлення з початкової станції відповідає Wagon Left Origin, а з проміжної - Wagon Departure [12].

Отже, проведена апробація підтверджує можливість практичного застосування запропонованого підходу і доцільність його подальшого використання для аналізу повного складу інформаційних елементів TEL TSI.

Висновки. У роботі запропоновано формалізований підхід щодо оцінювання інформаційної готовності автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» до взаємодії з TEL TSI. Визначено принцип побудови інтеграційного шлюзу та розроблено класифікацію інформаційної відповідності, що охоплює пряме передавання, перетворення, урахування додаткових умов, об'єднання, розрахунок і відсутність необхідних даних. Запропоновано систему показників, яка дає змогу оцінити рівень інформаційного покриття і визначити характер перетворень і наявні інформаційні розриви.

Попередня апробація на прикладі WagonStatusMessage показала можливість встановлення інформаційних аналогів для 9 із 11 типів подій (81,8 %), що підтверджує практичну застосовність запропонованого підходу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на повне зіставлення інформаційних елементів TEL TSI із даними автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» та уточнення кількісних показників за всіма функціональними блоками.

Список використаних джерел

1. Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України: Закон України від 09.06.2026 р. № 4904-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4904-20#Text (дата звернення: 01.09.2026).

2. Commission Implementing Regulation (EU) 2026/253 of 6 February 2026 on a technical specification relating to the telematics subsystem of the rail system in the European Union for interoperability of data sharing in rail transport (TEL TSI) and repealing Regulations (EU) No 454/2011 and (EU) No 1305/2014. *Official Journal of the European Union*. 2026. URL: https://data.europa.eu/eli/reg_impl/2026/253/oj (date of access: 31.08.2026).

3. Головко, Т. В., & Демченко, І. С. (2024). Теоретико-методологічні засади організації системи інтермодальних перевезень в умовах інтероперабельності. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 29(1), 64–68. URL: https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i1.300979 (дата звернення: 01.09.2026).

4. Запара, В. М., Оленюк, В. О., & Тимошенко, І. О. (2017). Технічні специфікації з інтероперабельності та їх упровадження у швидкісному русі на залізницях України. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (173). URL: https://doi.org/10.18664/1994-7852.173.2017.118183 (дата звернення: 01.09.2026).

5. Rojas Meléndez, J. A. et al. (2021). Leveraging Semantic Technologies for Digital Interoperability in the European Railway Domain. *The Semantic Web – ISWC*, 12922, 648–664. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-88361-4_38. (date of access: 01.09.2026)

6. Buyle, R. et al. (2021). A Sustainable Method for Publishing Interoperable Open Data on the Web. *Data*, *6*(8), 93. URL: https://doi.org/10.3390/data6080093 (date of access: 01.09.2026).

7. Shynkarenko, V., Zhuchyi, L., & Ivanov, O. (2022). Ontology-Based Semantic Checking of Data in Railway Infrastructure Information Systems. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, *47*(3), 291–319. URL: https://doi.org/10.2478/fcds-2022-0016 (date of access: 01.09.2026).

8. Cecchetti, G. et al. (2023). Toward new generation railway Traffic Management Systems: the contribution of the OPTIMA project. *Transportation Research Procedia*, 72, 3166–3173. URL: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.882 (date of access: 03.09.2026).

9. Cecchetti, G. et al. (2024). A communication platform demonstrator for new generation railway traffic management systems: Testing and validation / *Transportation Engineering*, 15, 100222. URL: https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100222 (date of access: 02.09.2026).

10. European Commission. LINX4RAIL2 – System Architecture and Conceptual Data Model for Railway, Common Data Dictionary and Global System Modelling Specifications. H2020 Project Periodic Reporting. 2023. URL: https://cordis.europa.eu/project/id/101014540/reporting (date of access: 03.09.2026).

11. Kyrychenko H., & Berdnychenko Y. (2024). Automated Control Systems in Railway Transportation. In: International Security Studies: Managerial, Technical, Legal, Environmental, Informative and Psychological Aspects. International collective monograph. (Vol. I.) Oslo : NMBU Research and Education, URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.10821982. (date of access: 03.09.2026).

12. European Union Agency for Railways. ERA Ontology. Version 3.3.4. Release 10 August 2026. European Union Agency for Railways, 2026. URL: https://rinf.data.era.europa.eu/era-vocabulary/ (date of access: 03.09.2026).

References

1. Pro bezpeku ta interoperabel′nist′ na zaliznychnomu transporti Ukrayiny: Zakon Ukrayiny [Law of Ukraine «On Safety and Interoperability in Railway Transport of Ukraine»]. No. 4904-IX of June 9, 2026. (2026). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4904-20#Text

2. Commission Implementing Regulation (EU) 2026/253 of 6 February 2026 on a technical specification relating to the telematics subsystem of the rail system in the European Union for interoperability of data sharing in rail transport (TEL TSI) and repealing Regulations (EU) No 454/2011 and (EU) No 1305/2014. (2026). *Official Journal of the European Union*. https://data.europa.eu/eli/reg_impl/2026/253/oj

3. Golovko, T. V., & Demchenko, I. S. (2024). Teoretyko-metodolohichni zasady orhanizatsiyi systemy intermodal′nykh perevezen′ v umovakh interoperabel′nosti [Theoretical and methodological principles of organizing an intermodal transportation system under interoperability conditions]. *Information and control systems in railway transport*, 29(1), 64–68. https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i1.300979

4. Zapara, V. M., Oleniuk, V. O., & Tymoshenko, I. O. (2017). Tekhnichni spetsyfikatsiyi z interoperabel′nosti ta yikh uprovadzhennya u shvydkisnomu rusi na zaliznytsyakh Ukrayiny. [Technical specifications for interoperability and their implementation in high-speed railways on the railways of Ukraine]. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (173). https://doi.org/10.18664/1994-7852.173.2017.118183

5. Rojas Meléndez, J. A., et al. (2021). Leveraging semantic technologies for digital interoperability in the European railway domain. *The Semantic Web – ISWC*, 12922, 648–664. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88361-4_38

6. Buyle, R., et al. (2021). A sustainable method for publishing interoperable open data on the Web. *Data*, *6*(8), 93. https://doi.org/10.3390/data6080093

7. Shynkarenko, V., Zhuchyi, L., & Ivanov, O. (2022). Ontology-based semantic checking of data in railway infrastructure information systems. *Foundations of Computing and Decision Sciences, 47*(3), 291–319. https://doi.org/10.2478/fcds-2022-0016

8. Cecchetti, G., et al. (2023). Toward new generation railway traffic management systems: The contribution of the OPTIMA project. *Transportation Research Procedia, 72*, 3166–3173. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.882

9. Cecchetti, G., et al. (2024). A communication platform demonstrator for new generation railway traffic management systems: Testing and validation. *Transportation Engineering, 15*, 100222. https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100222

10. European Commission. (2023). *LINX4RAIL2: System architecture and conceptual data model for railway, common data dictionary and global system modelling specifications*. H2020 Project Periodic Reporting. https://cordis.europa.eu/project/id/101014540/reporting

11. Kyrychenko, H., & Berdnychenko, Y. (2024). Automated control systems in railway transportation. In *International security studies: Managerial, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects* (Vol. I). NMBU Research and Education. https://doi.org/10.5281/zenodo.10821982

12. European Union Agency for Railways. (2026). *ERA Ontology* (Version 3.3.4, release August 10, 2026). https://rinf.data.era.europa.eu/era-vocabulary/

Трубчанінова Карина Артурівна, доктор технічних наук, професор кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2078-2647. Тел.: +38 (050) 637-43-26. E-mail: karyna.trubchaninova@kart.edu.ua.

Запара Віктор Мефодійович, кандидат технічних наук, професор кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-9134-1799. Тел.: +38 (068) 954-33-98. E-mail: v.zapara@gmail.com.
Тарасов Кирило Олександрович, доктор філософії, АТ «Укрзалізниця», філія «Локомотивна компанія». ORCID iD: 0000-0001-5976-4169. Тел.: +38 (099) 098-08-11. E-mail: kir.tarasov1998@gmail.com.
Сеник Сергій Григорович, аспірант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: senik@alfa-lex.com.ua.
ORCID iD: 0009-0003-1120-8819.

Trubchaninova Karyna Arturivna, Doctor of Technical Sciences, Professor of the department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCIDiD: 0000-0003-2078-2647.
Tel.: +38 (050) 637-43-26. E-mail: karyna.trubchaninova@kart.edu.ua.
Zapara Viktor Mefodiyovych, PhD (Tech)., professor of the department of freight and commercial management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-9134-1799. Tel.: +38 (068) 954-33-98. E-mail: v.zapara@gmail.com.
Tarasov Kyrylo Oleksandrovych, Doctor of Philosophy, JSC «Ukrzaliznytsia», branch «Locomotive Company». ORCID iD: 0000-0001-5976-4169. Tel.: +38 (099) 098-08-11. E-mail: kir.tarasov1998@gmail.com.
Senyk Serhiy Hryhorovych, postgraduate student, department of freight and commercial management, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: senik@alfa-lex.com.ua. ORCID iD: 0009-0003-1120-8819.

Дата надходження статті: 25.08.2026 р.
Дата прийняття статті до друку: 25.09.2026 р.
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT

Випуск 217

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б» (наказ Міністерства освіти і науки України № 928 від 11 червня 2026 р.).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Усі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Кальченко С. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

Тел.: +38 (057) 730-19-38. E-mail: znp@kart.edu.ua

R30-06150 від 01.05.2025 р. Підписано до друку 28.09.2026 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 43,5. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Феєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.