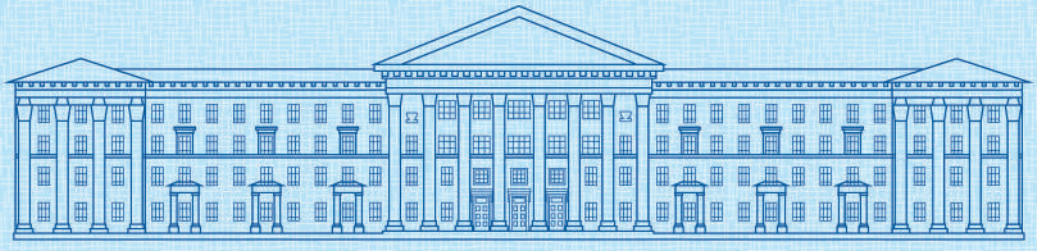
ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

№ 1(113)

2026

Український державний університет науки і технологій

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 1 (113) 2026

Виходить 4 раза на рік ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

Автоматизовані та телематичні системи на транспорті
Екологія та промислова безпека
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси
Залізнична колія та автомобільні дороги
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Машинобудування
Рухомий склад і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2026

Засновник:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ Козаченко Д. М., доктор технічних наук
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА Банніков Д. О., доктор технічних наук
ВИПУСКОВИЙ РЕДАКТОР Колесникова Т. О., кандидат наук із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:
Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., УДУНТ (Україна); Богдявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., УДУНТ (Україна); Вакуленко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., УДУНТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський державний технічний університет (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., УДУНТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнєцов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Мурадян Л. А., УДУНТ (Україна); Очкасов О. Б., УДУНТ (Україна); Сохацький А. В., Університет митної справи та фінансів (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., УДУНТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютькін О. Л., УДУНТ (Україна); Шинкаренко В. І., УДУНТ (Україна).

Журнал зареєстровано Національною Радою України з питань телебачення і радіомовлення, рішення № 924 від 28.09.2023 р. Ідентифікатор медіа: R30-01395.
Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 25.03.2026 р., протокол № 8

Видавець Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022 р.

Адреса засновника та редакції вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: stp.journal@ust.edu.ua;
сайт журналу: http://stp.ust.edu.ua/

Видання публікується з 1936 р.:
1936–1993 рр. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
2013–2022 рр. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
з 2023 р. – «Наука та прогрес транспорту»

© Український державний університет науки і технологій, 2026

Ukrainian State University of Science and Technologies

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 1 (113) 2026

Once a quarter ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

Automated and Telematic Systems on Transport
Ecology and Industrial Safety
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport, Power Systems and Complexes
Railroad and Roadway Network
Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling
Material Science
Mechanical Engineering
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro
2026

Founder:
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief — Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Deputy Chief Editor — Bannikov D. O., Doctor of Technical Sciences
Executive Editor — Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS:
Avramovic Z. Ž. , Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., USUST (Ukraine); Bodnar B. E., USUST (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Cygler J., Szkola Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., USUST (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., USUST (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Muradian L. A., USUST (Ukraine); Ochkasov O. B., USUST (Ukraine); Sokhatsky A. V., University of customs and finances (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., USUST (Ukraine); Shinkarenko V. I., USUST (Ukraine); Sładkowski A., Politechnika Slaska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., USUST (Ukraine); Vakulenko I. O., USUST (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine)

Journal was registered — Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 924 dated 28.09.2023. Media identifier: R30-01395
Edition is included in category B «List of scientific specialized publications of Ukraine» by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine no. 409 from 17.03.2020 (technical sciences).
Journal is registered in the International Catalogue of periodicals: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Українiка наукова, etc.
Published according to the Academic Council decision of the University from 25.03.2026, Protocol no. 8

Publisher — Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro)
Certificate of Publisher ДК no. 7709 from 14.12.2022

Address of Founder — Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: stp.journal@ust.edu.ua; journal site: http://stp.ust.edu.ua/

Edition is being published since 1936:
1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
2013–2022 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
since 2023 – «Наука та прогрес транспорту»

© Ukrainian State University of Science and Technologies, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.259.2:004.032.26

К. В. ГОНЧАРОВ[1*], Р. В. РИБАЛКА[2*], Т. М. СЕРДЮК[3*]

[1*]Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта k.v.honcharov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0432-1077
[2*]Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта r.v.rybalka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7444-0517
[3*]Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта t.m.serdiuk@ust.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-2609-4071

Застосування згорткової нейронної мережі для класифікації кодів автоматичної локомотивної сигналізації

Мета. Обґрунтування вибору типу та параметрів штучної нейронної мережі для класифікації кодових сигналів автоматичної локомотивної сигналізації АЛСН за наявності завад та спотворень часових параметрів кодів. **Методика.** Для досягнення поставленої мети виконано порівняльний аналіз різних типів штучних нейронних мереж. Було встановлено, що для класифікації кодів АЛСН найбільш придатною є одновимірна згорткова мережа, яка ефективно виявляє характерні часові ознаки сигналів, потребує менше даних для навчання, стійка до шумів, забезпечує стабільну класифікацію навіть при зсуві сигналу в часі. Були проведені розрахунки кількості параметрів мережі залежно від її конфігурації: кількості шарів, згорткових фільтрів та кількості нейронів у повнозв'язаних шарах. Для навчання мережі використовували синтезовані дані: до еталонних сигналів «З», «Ж», «ЧЖ» додавався шум та вносились випадкові зміни часових параметрів (тривалості імпульсів і пауз). Було синтезовано 1000 реалізацій для кожного кодового сигналу АЛСН. Програмний код для підготовки даних, тренування мережі та класифікації сигналів був написаний мовою Python із використанням бібліотек TensorFlow, Keras, Scipy.signal та NumPy. **Результати**. Відповідно до отриманої залежності між конфігурацією нейронної мережі та точністю класифікації для розпізнавання кодів АЛСН була обрана мережа, яка містить три згорткові шари, шар Dense з 16-ти нейронів та вихідний шар з трьох нейронів. Працездатність запропонованої нейронної мережі була підтверджена результатами класифікації синтезованих сигналів з низьким відношенням сигнал/шум та сильним спотворенням форми, а також реальних сигналів АЛСН. **Наукова новизна.** Авторами цієї роботи вперше проведене комплексне дослідження ефективності різних типів штучних нейронних мереж для класифікації кодів автоматичної локомотивної сигналізації АЛСН в умовах інтенсивних завад та часових спотворень, що дозволило обґрунтувати вибір конфігурації одновимірної згорткової нейронної мережі та встановити залежності між параметрами моделі (кількістю шарів, фільтрів, нейронів) та точністю класифікації. **Практична значимість**. Впровадження цифрового локомотивного приймача сигналів АЛСН із класифікатором на базі запропонованої згорткової нейронної мережі замість застарілої релейної апаратури дозволить зменшити експлуатаційні витрати, підвищити завадостійкість та надійність системи АЛСН за рахунок стійкого розпізнавання кодів в умовах інтенсивних завад та спотворень часових параметрів кодових сигналів.

Ключові слова: автоматична локомотивна сигналізація; часові ознаки сигналів; завадостійкість; спотворення часових параметрів кодів; згорткова нейронна мережа; розпізнавання коду АЛСН; глибоке навчання; точність класифікації

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Вступ

Система автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) є складовою комплексу технічних засобів, які забезпечують безпеку руху поїздів. Така система виконує дублювання сигналів колійних світлофорів у кабіні машиніста, здійснює контроль швидкості руху поїзда, перевірку пильності машиніста та автоматичне екстрене гальмування у разі порушення умов безпеки руху. В Україні застосовується система автоматичної локомотивної сигналізації неперервної дії з числовим кодуванням АЛСН, яка відповідно до показань колійних світлофорів забезпечує передачу через рейкову лінію на локомотив одного з трьох кодових сигналів: «*З*», «*Ж*» або «*ЧЖ*». Сигнал АЛСН наводиться у локомотивних котушках, фільтрується та підсилюється. Після цього відбувається дешифрування отриманого коду та вмикання відповідного сигналу на локомотивному світлофорі [18].

На сьогодні використовується переважно релейна апаратура АЛСН, яка є застарілою та потребує значних експлуатаційних витрат. У роботі [1] в результаті аналізу статистики відмов АЛСН було визначено, що основною причиною відмов є зношеність апаратури. Перш за все це стосується локомотивного дешифратора, який виконує розпізнавання отриманого коду. Також було встановлено, що причинами збоїв в системі АЛСН зокрема є спотворення часових параметрів коду, намагніченість рейок та нестабільне живлення [1, 10]. Крім цього, в рейковій лініі діють потужні завади (гармоніки тягового струму, імпульсні завади, що виникають в результаті різноманітних комутаційних процесів тощо), які спотворюють сигнал АЛСН та за певних умов також можуть призвести до збоїв [11].

Існують кілька напрямів удосконалення системи автоматичної локомотивної сигналізації. Перший з них пов’язаний із застосуванням більш сучасних та ефективних методів передачі команд на локомотив. В роботі [2] запропоновано для передачі даних через рейкову лінію використовувати завадостійкий код Файра та квадратурну фазову маніпуляцію QPSK, а в роботі [13] – застосовувати широкосмугові сигнали, сформовані за допомогою ортогональних кодів Уолша, та бінарну фазову маніпуляцію BPSK. Впровадження таких рішень дозволить підвищити інформативність та завадостійкість системи АЛС, проте вимагає значних фінансових витрат, що пов’язано з необхідністю повної заміни колійної та локомотивної апаратури.

Інший напрям удосконалення системи АЛСН передбачає впровадження більш ефективних методів і засобів обробки та дешифрування кодових сигналів. В роботі [12] для розпізнавання коду, отриманого локомотивним приймачем, пропонується проводити аналіз сигналу в частотній та часовій області за допомогою перетворення Фур’є та Wavelet перетворення. Авторами роботи [7] синтезований оптимальний приймач сигналів АЛСН на тлі адитивних завад трьох типів: імпульсних, неперервних синусоїдальних та гаусового шуму.

Сучасні нейромережеві технології дозволяють вирішувати складні задачі класифікації різноманітних об’єктів, в тому числі – розпізнавання кодів автоматичної локомотивної сигналізації. В роботі [5] розроблено нейромережеву модель для розпізнавання тривалості імпульсів та інтервалів в кодових сигналах АЛСН. Автор роботи [10] для виявлення спотворень сигналів АЛСН пропонує застосовувати адаптивну систему нейронечіткого логічного висновку (ANFIS) та ентропію Шеннона енергії вейвлет-пакетів (WPESE). В роботі [15] для захисту автоматичної локомотивної сигналізації від завад запропоновано метод обробки сигналів, в якому застосовується алгоритм оптимізації PSO та глибока нейронна мережа DBN. Таким чином, на сьогодні існують різноманітні рішення застосування штучної нейронної мережі (ШНМ) для обробки та дешифрування кодів автоматичної локомотивної сигналізації. Проте в роботах за даним напрямом немає обґрунтування щодо вибору типу та параметрів штучної нейронної мережі: кількості та типу шарів, кількості нейронів у кожному шарі, типу функції активації тощо.

Мета

Метою роботи є обґрунтування вибору типу та параметрів штучної нейронної мережі для класифікації кодових сигналів автоматичної локомотивної сигналізації за наявності завад та спотворень часових параметрів кодів.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Методика

Особливості сигналів АЛСН. В системі автоматичної локомотивної сигналізації АЛСН використовуються амплітудно-модульовані сигнали, які забезпечують передачу на локомотив одного із трьох кодів: «*З*», «*Ж*» або «*ЧЖ*». Кожен кодовий сигнал має свої часові ознаки: кількість імпульсів, тривалість імпульсів та пауз. Так для коду «*З*» передаються три імпульси в кодовому циклі, а для коду «*Ж*» – два імпульси. В коді «*ЧЖ*» цикл містить тільки один імпульс, проте тривалість циклу вдвічі менша ніж для інших кодів. Сигнали АЛСН формує кодовий колійний трансмітер, тип якого визначає тривалість кодового циклу. В табл. 1 представлені часові параметри різних кодових сигналів: тривалості імпульсів t_{i1}, t_{i2}, t_{i3} пауз t_{n1}, t_{n2}, t_{n3} та тривалості циклу $T_ц$ [18].

На залізничних ділянках з автономною тягою та електротягою постійного струму застосовуються сигнали АЛСН з несучою частотою 50 Гц, а на ділянках з електротягою змінного струму – 25 Гц або 75 Гц. Для цифрової обробки сигналу АЛСН необхідно виконати його дискретизацію та перетворити на вектор вибіркових значень (відліків сигналу). Необхідний інтервал дискретизації $T_д$ визначається відповідно до теореми Котельникова:

$$T_д \le \frac{1}{2 f_{\max}}, \qquad (1)$$

де f_{max} – максимальна частота спектра сигналу АЛСН.

Спектр амплітудно-модульованого сигналу містить несучу частоту та верхню і нижню бічну смуги. В даній роботі були проведені розрахунки амплітудного спектра для різних кодів АЛСН. За результатами розрахунків встановлено, що ефективна ширина кожної бічної смуги складає 7…8 Гц. Тоді для максимальної несучої частоти 75 Гц верхня границя спектру складає 83 Гц. Визначимо необхідну кількість відліків сигналу АЛСН за один кодовий цикл:

$$N \ge 2 f_{\max} T_ц, \qquad (2)$$

де $T_ц$ – тривалість кодового циклу.

Відповідно до виразу (2) при застосуванні трансмітера КПТШ-5 для цифрової обробки сигналу АЛСН необхідно обирати не менше ніж 267 відліків на цикл, а при застосуванні КПТШ–7 – не менше 309 відліків на цикл.

Таким чином, перед застосуванням штучної нейронної мережі необхідно виконати попередню обробку отриманого сигналу АЛСН: 1) за допомогою засобів циклової синхронізації виділити один кодовий цикл; 2) виконати дискретизацію сигналу та сформувати вектор відліків для одного циклу, який буде передаватись на входи нейронної мережі. Обираємо 500 відліків на цикл, що відповідає вимогам (2).

Порівняльний аналіз різних типів ШНМ. Штучна нейронна мережа представляє собою систему взаємопов'язаних вузлів (штучних нейронів), які приблизно моделюють нейрони біологічного мозку. Кожен штучний нейрон приймає сигнали від інших нейронів, знаходить їх зважену суму, обчислює передавальну функцію та передає результуючий сигнал до наступної групи нейронів. Входи мають різну синаптичну вагу, яка є мірою сили вхідних зв'язків та визначається під час навчання ШНМ [4, 6, 9].

Залежно від архітектури та способу з'єднання нейронів більшість відомих ШНМ можна розділити на два класи: рекурентні мережі та мережі прямого поширення. Рекурентні мережі мають зворотні зв'язки, що дозволяє їм зберігати інформацію про попередні стани. Це забезпечує можливість врахувати попередні відліки сигналу, моделювати динамічні процеси, розпізнавати шаблони, що залежать від історії [6, 9]. Проте наявність зворотних зв'язків може призвести до втрати стійкості рекурентної мережі. Тому такі мережі не можна використовувати в системі АЛСН та інших системах, які забезпечують безпеку руху поїздів.

В мережах прямого поширення сигнали передаються тільки в одному напрямку: від входу до виходу, без зворотних зв'язків і циклів. Це забезпечує гарантовану стійкість, передбачуваність поведінки та високу швидкодію. До такого класу, зокрема, відносяться повнозв'язані мережі та згорткові мережі [6, 9]. ШНМ цих двох типів придатні для класифікації кодів АЛСН.

Повнозв'язана мережа типу Багатошаровий перцептрон (англ. Multilayer Perceptron – MLP) містить вхідний шар, один або кілька прихованих шарів і вихідний шар. При цьому кожен нейрон попереднього шару з'єднується з усіма нейронами наступного шару. Вхідний шар мережі MLP

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

виконує функцію інтерфейсу між сигналом АЛСН та нейронною мережею. Кількість нейронів у вхідному шарі дорівнює розміру вхідного вектора. Приховані шари виконують аналіз часової структури сигналу та виявлення закономірностей, характерних для конкретних кодів АЛСН. Кожен нейрон прихованого шару обчислює зважену суму всіх вхідних сигналів після чого до результату застосовується нелінійна функція активації (наприклад, сигмоїд або ReLU). Вихідний шар містить три нейрони та відповідно три виходи, що відповідає кількості кодів АЛСН [6, 9].

Недоліком мережі MLP є велика кількість параметрів (вагових коефіцієнтів та зсувів), значення яких визначаються під час навчання. Чим більше параметрів, тим більше час навчання ШНМ, більші вимоги до обчислювальних ресурсів та менше швидкість роботи. Останнє є особливо критичним для систем реального часу, таких як система АЛСН.

Таблиця 1

Часові параметри кодів АЛСН

Table 1

Time parameters of ALSN codes

Тип трансмітера	Код АЛСН	Часові параметри кодів, с						
		$t_{і1}$	$t_{п1}$	$t_{і2}$	$t_{п2}$	$t_{і3}$	$t_{п3}$	$T_ц$
КПТШ–5	«З»	0,35	0,12	0,22	0,12	0,22	0,57	1,6
	«Ж»	0,38	0,12	0,38	0,72	–	–	1,6
	«ЧЖ»	0,23	0,57	0,23	0,57	–	–	1,6
КПТШ–7	«З»	0,35	0,12	0,24	0,12	0,24	0,79	1,86
	«Ж»	0,35	0,12	0,6	0,79	–	–	1,86
	«ЧЖ»	0,3	0,63	0,3	0,63	–	–	1,86

Крім цього, за великої кількості параметрів нейронної мережі та недостатньому обсязі тренувальних даних збільшується ризик перенавчання, тобто ШНМ добре вивчить навчальні дані, але не буде працювати в реальних умовах.

Згорткова штучна нейронна мережа. Структурна схема одновимірної згорткової нейронної мережі (англ. Convolutional Neural Network – CNN), яка дозволяє класифікувати коди АЛСН, зображена на рис. 1. На вхід мережі подається одновимірний вектор з 500 відліків сигналу, що відповідає одному кодовому циклу. Мережа CNN містить згорткові шари, шари Pooling, шар Flatten та повністю зв’язані шари [8, 3, 14, 17].

Кожен згортковий шар має кілька фільтрів, які виявляють різні часові ознаки сигналу. Кількість фільтрів визначає кількість локальних ознак сигналу, а розмір ядра кожного фільтра – довжину часового вікна, в межах якого «витягуються» локальні ознаки. Фільтр виконує одновимірну згортку вхідного сигналу з ядром. На рис. 2 показано приклад виконання згортки для фільтра з трьохелементним ядром. Кожен елемент результату згортки розраховується як сума попарних добутків елементів ядра та відповідної ділянки вхідного сигналу. Після обчислення одного значення ядро зміщується вздовж вхідного вектора і процес повторюється для наступного сегмента.

Перший згортковий шар нейронної мережі виявляє прості часові ознаки сигналу: фронт імпульсу, зріз, імпульс, паузу. Наступні згорткові шари виявляють більш складні часові структури, наприклад, поєднання імпульсу і паузи заданої тривалості або поєднання кількох імпульсів і пауз.

Під час навчання згорткової мережі виникає проблема внутрішнього коваріантного зсуву, коли ваги згорткового шару постійно змінюються. Це змінює розподіл вхідних сигналів для наступних шарів, змушуючи їх безперервно адаптуватися до нових умов, що значно уповільнює процес навчання. У зв’язку із цим після згоркового шару розташовується шар Batch

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Normalization. Принцип його дії полягає в тому, що для кожного Batch (підмножини навчальних даних) обчислюється середнє значення та дисперсія, на основі яких вхідні дані центруються та масштабуються до стандартного нормального розподілу. Це дозволяє отримати вищі швидкості навчання та прискорити збіжність. Після кожного згорткового шару, доповненого Batch Normalization, йде шар Pooling, який зменшує кількість даних, зберігаючи найбільш значущі ознаки та забезпечуючи інваріантність до невеликих зсувів у вхідному сигналі. Наприклад, шар Max Pooling 2 зменшує кількість елементів удвічі: з кожної пари елементів обирається той, що має більше значення. Після згорткових та пулінгових шарів розміщується класифікаційний блок, який містить шар Flatten та повнозв'язані шари (Dense шари).

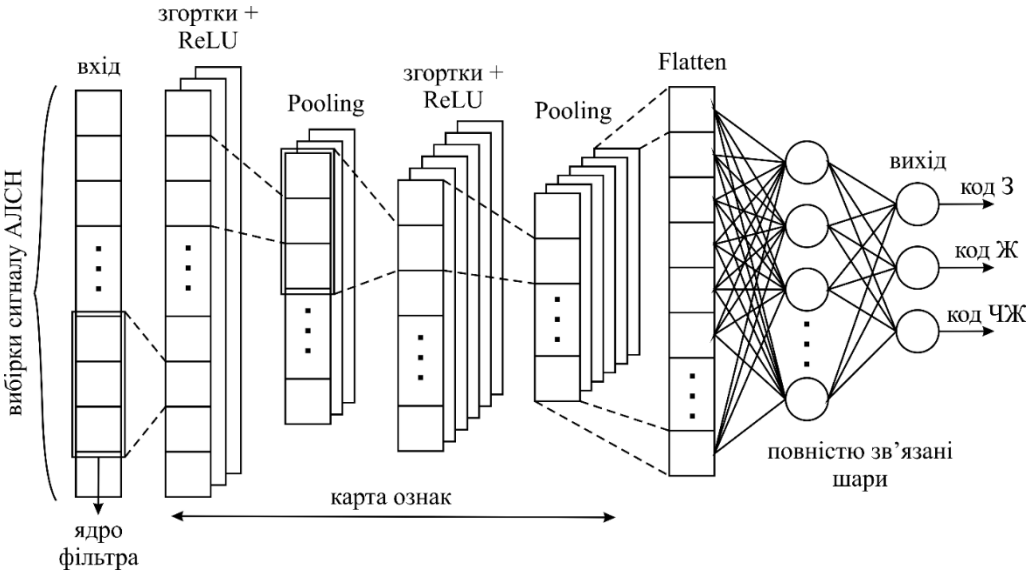


Рис. 1. Згорткова нейронна мережа 1D–CNN

Fig. 1. Convolutional neural network 1D–CNN

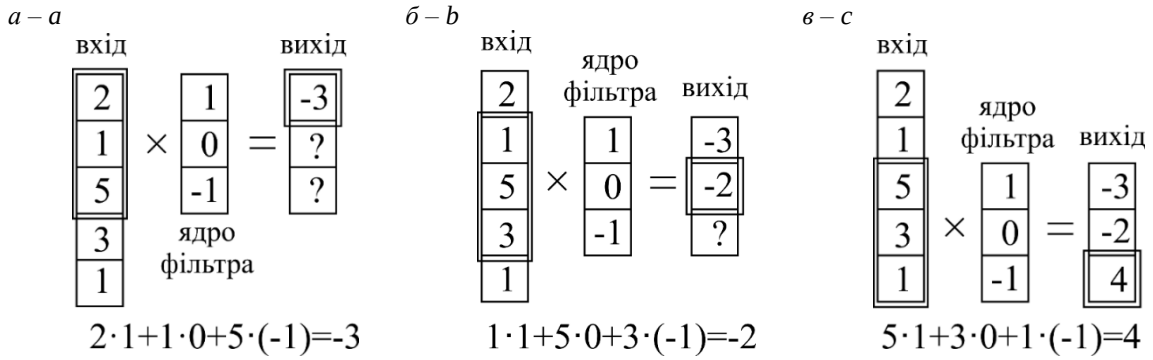


Рис. 2. Приклад визначення першого (*а*), другого (*б*) та третього (*в*) елементів одновимірної згортки

Fig. 2. Example of defining the first *(a)*, second *(b)* and third *(c)* elements of a one-dimensional convolution

Шар Flatten перетворює багатовимірний тензор даних у одновимірний вектор. Dense шари збирають разом всі розрізнені ознаки, виявлені згортковими шарами, та виконують фінальну класифікацію.

Вихідний Dense шар містить три нейрони, кожен з яких відповідає одному з трьох можливих кодів АЛСН. На вихідному шарі використовується функція активації Softmax, яка перетворює вихідні значення у ймовірності кожного класу:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

$$p_k = \frac{e^{y_k}}{\sum_{j=1}^{3} e^{y_j}}, \qquad (3)$$

де y_k – зважена сума вхідних сигналів для k-го нейрона вихідного шару; p_k – ймовірність належності сигналу до k-го коду; $k = 1…3$.

Класифікація отриманого коду АЛСН здійснюється шляхом порівняння ймовірностей на виходах нейронної мережі.

Одновимірна згорткова мережа (1D–CNN) має суттєво менше параметрів у порівнянні з MLP, ефективно виявляє характерні часові ознаки (патерни) сигналів, потребує менше даних для навчання, стійка до шумів і невеликих спотворень сигналу, забезпечує стабільну класифікацію навіть при зсуві сигналу в часі [14].

Загальне число параметрів згорткової нейронної мережі залежить від кількості шарів та кількості фільтрів в кожному згортковому шарі, розміру ядра фільтрів та числа нейронів у повнозв'язаних шарах. Розрахуємо кількість параметрів мережі 1D–CNN, яка містить один згортковий шар Conv1D(8,7), шари Batch Normalization, Max Pooling 2, Flatten, повнозв'язані шари Dense(8) та Dense(3).

Згортковий шар Conv1D(8,7) має 8 фільтрів з розміром ядра 7. З урахуванням зміщення кожен фільтр має 8 параметрів. Таким чином загальна кількість параметрів для такого шару дорівнює 8·8 = 64. Вхідний згортковий шар перетворює вектор з 500 відліків сигналу АЛСН на двовимірний масив розміром (500,8). Після Max Pooling 2 розмір масиву дорівнює (250,8). Шар Flatten змінює цей масив на одновимірний вектор розміром 250·8 = 2000. Кількість параметрів шару Dense(8), що складається з 8 нейронів, з урахуванням зміщення для кожного нейрона дорівнює 2000·8 +8 =16008. Вихідний шар Dense(3) має 8·3 + 3 = 27 параметрів. Таким чином, загальна кількість параметрів даної мережі CNN дорівнює 64 + 16008 +27 = 16099.

Аналогічно були проведені розрахунки кількості параметрів нейронної мережі з одним (CNN–1), двома (CNN–2) і трьома (CNN–3) згортковими шарами та різною кількістю нейронів у повнозв'язаному шарі. Результати наведені у табл. 2.

Навчання нейронної мережі. В рамках даної роботи була розроблена модель мережі 1D–CNN, яка дозволяє класифікувати сигнали АЛСН. Структура мережі зображена на рис. 1. Програмний код для підготовки даних, тренування мережі та класифікації сигналів був написаний мовою Python із використанням бібліотек TensorFlow, Keras, Scipy.signal та NumPy [9].

Для навчання мережі використовували синтезовані дані: до еталонних сигналів «*З*», «*Ж*» та «*ЧЖ*» додавався шум та вносились випадкові зміни часових параметрів (тривалості імпульсів і пауз). Було синтезовано 3000 реалізацій сигналів АЛСН: 1000 реалізацій для кожного коду. Половина сигналів формувались для кодового циклу КПТШ–5, інша половина – для циклу КПТШ–7.

Синтез даних проводили за наступним алгоритмом:

1) задати параметри сигналу АЛСН: тривалість кодового циклу, частоту несучого сигналу;

2) сформувати вектор з 500 значень несучого сигналу, що відповідає одному кодовому циклу АЛСН;

3) задати патерни кодових сигналів «*З*», «*Ж*», «*ЧЖ*» (кількість імпульсів в циклі, тривалість імпульсів та пауз);

4) сформувати еталонні сигнали «*З*», «*Ж*» та «*ЧЖ*»;

5) для кожного коду АЛСН сформувати масив з 1 000 реалізацій спотворених сигналів. При цьому до еталонних сигналів з амплітудою 1,0 додати адитивний гаусовий шум із середньоквадратичним відхиленням 0,5 та випадковим чином змінити тривалості імпульсів і пауз сигналу АЛСН з максимальним відхиленням до 20% від нормативного значення;

6) сформувати об'єднану матрицю синтезованих сигналів та відповідний вектор міток класів;

7) виконати перемішування даних;

8) розділити синтезовані дані на навчальний набір (80 %) та валідаційний набір (20 %).

Під час навчання згорткової нейронної мережі використано метод оптимізації Adam (Adaptive Moment Estimation), який автоматично адаптує швидкість навчання для кожного параметра окремо та є ефективним для «зашумлених» даних. В якості функції втрат обрано розріджену категоріальну крос-ентропію (sparse categorical cross-entropy) [6].

Було проведене навчання мереж 1D–CNN з різною конфігурацією: з одним, двома та трьома згортковими шарами, з різною кількістю нейронів у Dense-шарі. Отримана точність класифікації наведена у табл. 3.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

Таблиця 2

Кількість параметрів для різних моделей згорткових нейронних мереж

Table 2

Number of parameters for different convolutional neural network models

Шари нейронної мережі	Кількість параметрів для різних моделей CNN								
	шар Dense на 8 нейронів			шар Dense на 16 нейронів			шар Dense на 32 нейрони		
	CNN–1	CNN–2	CNN–3	CNN–1	CNN–2	CNN–3	CNN–1	CNN–2	CNN–3
Conv1D(8,7)	64	64	64	64	64	64	64	64	64
Pool(2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Conv1D(16,5)		656	656	–	656	656	–	656	656
Pool(2)	–	0	0	–	0	0	–	0	0
Conv1D(32,3)	–	–	1568	–	–	1568	–	–	1568
Pool(2)	–	–	0	–	–	0	–	–	0
Flatten	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dense	16 008	16 008	16 008	32 016	32 016	32 016	64 032	64 032	64 032
Dense(3)	27	27	27	51	51	51	99	99	99
Загальна кількість параметрів	16 099	16 755	18 323	32 131	32787	34 355	64 195	64 851	66 419

Таблиця 3

Точність класифікації на тренувальних та валідаційних даних

Table 3

Classification accuracy on training and validation data

Тип даних	Модель згорткової нейронної мережі								
	шар Dense на 8 нейронів			шар Dense на 16 нейронів			шар Dense на 32 нейрони		
	CNN-1	CNN-2	CNN-3	CNN-1	CNN-2	CNN-3	CNN-1	CNN-2	CNN-3
Точність на тренувальних даних	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Точність на валідаційних даних	97,5 %	98,7 %	99,1 %	98,8 %	99,6 %	100 %	99,1 %	100 %	100 %

Результати

Відповідно до результатів розрахунку, які представлені у табл. 2, для кожного наступного згорткового шару мережі 1D–CNN кількість параметрів суттєво збільшується, що пов’язано зі збільшенням розміру вхідних даних. Найбільшу кількість параметрів має перший шар Dense, причому збільшення кількості нейронів у цьому шарі призводить до значного зростання числа параметрів.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

За результатами навчання мережі 1D–CNN, які представлені у табл. 3, для всіх моделей мережі точність на тренувальних даних склала 100 %, тобто моделі повністю «вивчили» тренувальний набір. Збільшення кількості нейронів у шарі Dense з 8 до 16 призвело до помітного підвищення точності на валідаційних даних. Використання більшого числа згорткових шарів також забезпечує вищу точність валідації. При застосуванні шару Dense на 16 та 32 нейрони на валідаційному наборі була отримана точність класифікації 100 %. Це показує, що класи кодових сигналів АЛСН добре відокремлюються. З урахуванням результатів досліджень, які наведені у табл. 2 та 3, пропонуємо застосовувати для класифікації кодів АЛСН мережу CNN–3 з трьома згортковими шарами та шаром Dense на 16 нейронів. Використання більш складної конфігурації мережі через більшу кількість параметрів призведе до збільшення часу навчання, зменшення швидкості роботи та створює ризик перенавчання моделі.

Для перевірки здатності запропонованої моделі узагальнювати та класифікувати дані були синтезовані нові реалізації сигналів АЛСН, які не використовувались для навчання і валідації. Для цього за допомогою модуля Scipy.signal еталонні сигнали АЛСН відфільтрували смуговим фільтром зі смугою пропускання 45…55 Гц, що призводило до спотворення фронту і зрізу імпульсів. Дослідження проводили для частоти несучого сигналу 50 Гц. До отриманих сигналів додавали гаусовий шум різного рівня.

На рис. 3 зображені отримані реалізації сигналів АЛСН при відношенні сигнал/шум 10 децибел, а на рис. 4 – при відношенні нуль децибел. На даних рисунках також представлені результати класифікації сигналів згортковою мережею. У правому нижньому куті кожного графіка на рис. 3 та рис. 4 наведені ймовірності кожного класу, а у правому верхньому куті – результат передбачення. Відповідно до отриманих результатів запропонована згорткова нейронна мережа зі стовідсотковою ймовірністю класифікує коди АЛСН навіть при дуже низькому відношенні сигнал/шум та сильному спотворенні форми сигналу.

а – a

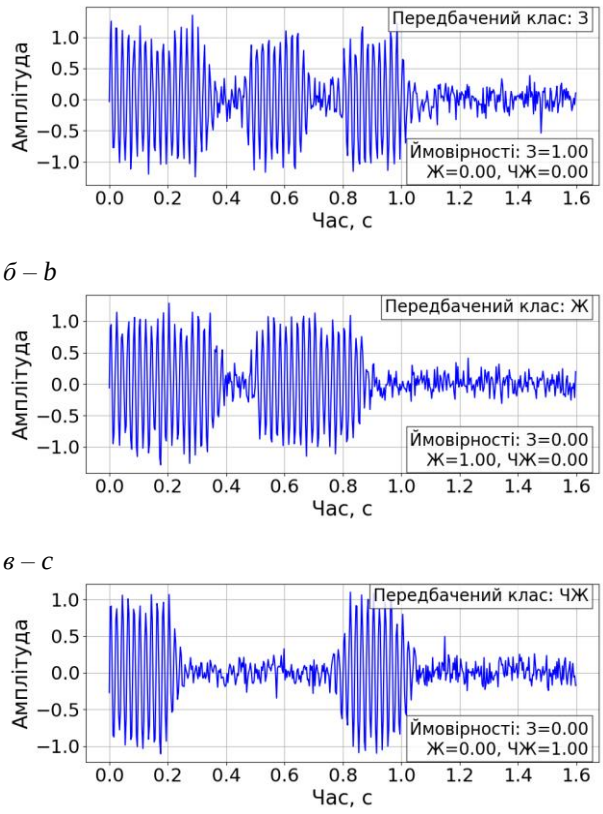


Рис. 3. Результати класифікації спотворених та «зашумлених» кодів «*З*» (*а*), «*Ж*» (*б*), «*ЧЖ*» *(в)* при відношенні сигнал/шум 10 дБ

Fig. 3. Classification results of distorted and «noisy» codes «*Z*» *(a)*, «*Zh*» *(b)*, «*ChZh*» *(c)* at a signal-to-noise ratio of 10 dB

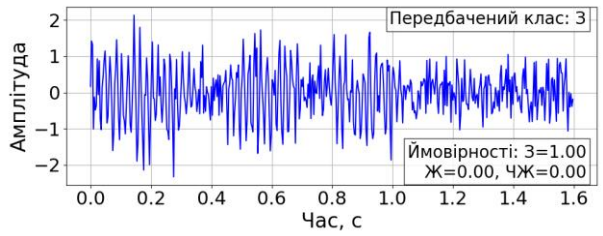
В роботі також було виконано тестування згорткової нейронної мережі на реальних сигналах АЛСН. Для цього проведено вимірювання сигналів на живильному та релейному кінці у кодових рейкових колах змінного струму [16]. Для дослідження використовували цифровий USB-осцилограф Hantek 6254 BC, який має частотну смугу пропускання до 250 МГц, частоту дискретизації до 1 ГГц, вхідний імпеданс 1 МОм, вертикальну роздільну здатність 8 біт. В результаті вимірювань було отримано 30 записів сигналів з різними кодами АЛСН. З кожного запису виділяли масив значень, який відповідає одному кодовому циклу. Далі шляхом лінійної інтерполяції цей масив перетворювали на одновимірний вектор з 500 елементів, який використовувався для класифікації. В підсумку для всіх

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

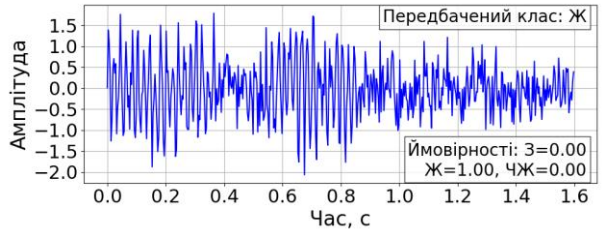
ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

сигналів нейронна мережа безпомилково визначила класи кодів АЛСН. На рис. 5 як приклад показаний результат класифікації кодового сигналу «*ЧЖ*».

а – a



б – b



в – c

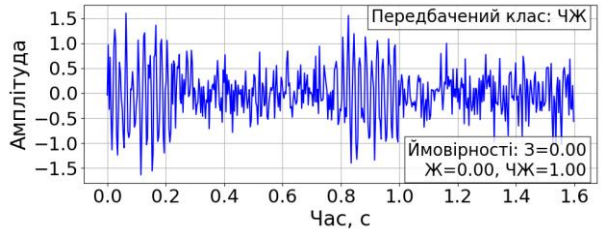


Рис. 4. Результати класифікації спотворених та «зашумлених» кодів «*З*» (*а*), «*Ж*» (*б*), «*ЧЖ*» *(в)* при відношенні сигнал/шум 0 дБ

Fig. 4. Classification results of distorted and «noisy» codes «*Z*» *(a)*, «*Zh*» *(b)*, «*ChZh*» *(c)* at a signal-to-noise ratio of 0 dB

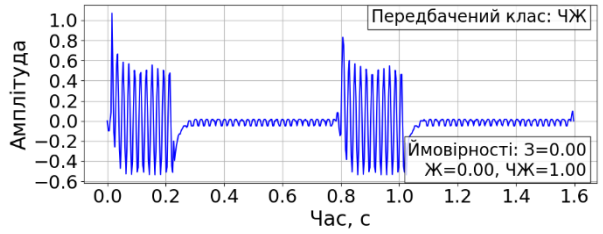


Рис. 5. Результат класифікації реального кодового сигналу «*ЧЖ*»

Fig. 5. The result of classification of the real code signal «*ChZh*»

Таким чином, результати тестування запропонованої нейронної мережі на синтезованих та реальних даних підтверджують її здатність виконувати класифікацію кодів АЛСН, зокрема за наявності сильних завад та спотворень часових параметрів.

Наукова новизна та практична значимість

Авторами цієї роботи вперше проведене комплексне дослідження ефективності різних типів штучних нейронних мереж для класифікації кодів автоматичної локомотивної сигналізації АЛСН в умовах інтенсивних завад та часових спотворень, що дозволило обґрунтувати вибір конфігурації одновимірної згорткової нейронної мережі та встановити залежності між параметрами моделі (кількістю шарів, фільтрів, нейронів) та точністю класифікації.

Впровадження цифрового локомотивного приймача сигналів АЛСН із класифікатором на базі запропонованої згорткової нейронної мережі замість застарілої релейної апаратури дозволить зменшити експлуатаційні витрати, підвищити завадостійкість та надійність системи АЛСН за рахунок стійкого розпізнавання кодів в умовах інтенсивних завад та спотворень часових параметрів кодових сигналів.

Висновки

1. Однією з основних причин відмов системи автоматичної локомотивної сигналізації АЛСН є зношеність застарілої релейної апаратури. Збої в системі також можуть відбуватись через спотворення часових параметрів коду, намагніченість рейок, нестабільне живлення, вплив різноманітних завад, які діють в рейковій лінії.

2. Один із напрямків удосконалення локомотивної апаратури АЛСН пов’язаний із застосуванням штучної нейронної мережі для розпізнавання кодових сигналів. Рекурентні нейронні мережі мають зворотні зв’язки, що може призвести до втрати стійкості. У зв’язку із цим такі мережі не можна використовувати в системі АЛСН та інших системах, які забезпечують безпеку руху поїздів. Серед мереж прямого поширення найбільш придатною для класифікації кодів АЛСН є одновимірна згорткова мережа 1D–CNN, яка ефективно виявляє характерні часові ознаки сигналів, потребує менше даних для

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

навчання, стійка до шумів, забезпечує стабільну класифікацію навіть при зсуві сигналу в часі.

3. В результаті дослідження залежності між параметрами моделі мережі 1D–CNN (кількістю шарів, фільтрів, нейронів) та точністю класифікації було встановлено, що для розпізнавання кодів АЛСН доцільно застосовувати наступну конфігурацію мережі: три згорткових шари, доповнені шарами Batch Normalization та Max Pooling 2, шар Dense з 16-ти нейронів та вихідний шар з трьох нейронів. Під час тестування на синтезованих та реальних даних запропонована нейронна мережа точно класифікувала коди АЛСН навіть при дуже низькому відношенні сигнал/шум та сильному спотворенні форми сигналу.

4. Дана робота передбачає проведення подальших досліджень за наступними напрямами: дослідження спотворень часових параметрів кодів автоматичної локомотивної сигналізації та завад, що діють в рейковій лінії; проведення вимірювань кодів АЛСН та отримання великого масиву експериментальних даних для навчання нейронної мережі на реальних сигналах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гололобова О. О, Буряк С. Ю., Гаврилюк В. І., Маркуль Р. В., Афанасов А. М., Білухін Д. С. Визначення причин порушень у роботі автоматичної локомотивної сигналізації. *Наука та прогрес транспорту.* 2021. № 6(96). С. 5–13. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/257914
2. Гончаров К. В., Рибалка Р. В., Маловічко В. В. Підвищення ємності та завадостійкості каналу передачі даних в системі автоматичної локомотивної сигналізації. *Наука та прогрес транспорту.* 2025. № 4(112). С. 5–16. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2025/338389
3. Машкіна І. В., Носенко Т. І., Мельник І. Ю. Застосування одновимірних згорткових нейронних мереж для ідентифікації слабких радіоактивних сигналів у системах динамічного моніторингу. *Кібербезпека : освіта, наука, техніка*. 2025. Том 3, № 31. С. 780–791. DOI: https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1074
4. Наконечний М. В., Івахів О. В., Наконечний Ю. М. *Вступ до поглибленого навчання та нейромережеве керування* : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2024. 354 с.
5. Сотник В. О., Бабаєв М. М., Чепцов М. М. Нейромережева модель розпізнавання тривалості імпульсів та інтервалів кодів АЛСН. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2013. № 36. С. 67–79.
6. Aggarwal C. C. *Neural Networks and Deep Learning* : textbook. Cham : Springer International Publishing, 2023. 553 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-29642-0
7. Ananieva O., Babaiev M., Blyndiuk V., Davidenko M. Development of a Device for the Optimal Reception of Signals Against the Background of an Additive Three-component Interference. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, № 9(98). P. 6–13. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.159310
8. Cai W., Zhu X., Bai K., Ye A., Zhang R. An explainable dual-mode convolutional neural network for multivariate time series classification. *Knowledge-Based Systems*. 2024. Vol. 299. Art. 112015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.112015
9. Chollet F., Watson M. *Deep Learning with Python*. Manning Publications Co, 2025. 648 p.
10. Havryliuk V. Detecting of Signal Distortions in Cab Signaling System Using ANFIS and WPESE. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. (Istanbul, 7–11 Sep. 2020). Istanbul, 2020. P. 231–236. DOI: https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263165
11. Havryliuk V. Investigation of the Influence of Traction Current Harmonics on Automatic Locomotive Signaling. *2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. (Chania, July 2025). Chania, 2025. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169221
12. Hololobova O. O., Havryliuk V. I. Application of Fourier transform and Wavelet decomposition for decoding the continuous automatic locomotive signaling code. *Science and Transport Progress*. 2017. № 1(67). С. 7–17. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2017/92771
13. Honcharov K. V., Rybalka R. V. Multi-Valued Automatic Cab Signaling System Based on the CDMA Technology. *Science and Transport Progress*. 2021. № 6(96). С. 14–21. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/258171
14. Kiranyaz S., Avci O., Abdeljaber O., Ince T., Gabbouj M., Inman D. J. 1D convolutional neural networks and applications : A survey. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 151. Art. 107398. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107398

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

15. Liu S., Yang S., Liu C., Liu T., Xiong Q. Research on Anti-interference Algorithm for Cab Signal Demodulation Based on Deep Learning. *2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. (Shenzhen, 13 December 2020). Shenzhen, China. 2020. P. 248–254. DOI: https://doi.org/10.1109/icarcv50220.2020.9305349
16. Serdiuk T., Serchenko M., Profatylov V., Botnarevscaia R., Mandaris D., Smirnov A. Monitoring Electromagnetic Interference and Code Current in the Station Interlocking System. *IEEE 2025 Asia-Pacific International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*. (Taipei, 19 May 2025). Taipei, 2025. P. 156–159. DOI: https://doi.org/10.1109/apemc62958.2025.11051974
17. Taherkhani A., Cosm G., McGinnity T. M. A Deep Convolutional Neural Network for Time Series Classification with Intermediate Targets. *SN Computer Science*. 2023. Vol. 4, Iss. 6. Art. 832. DOI: https://doi.org/10.1007/s42979-023-02159-4
18. Theeg G., Vlasenko S. *Railway Signalling and Interlocking. International Compendium*. Hamburg : Eurailpress, 2009. 448 p.

K. V. HONCHAROV[1*], R. V. RYBALKA[2*], T. M. SERDIUK[3*]

[1*]Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail k.v.honcharov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0432-1077
[2*]Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail r.v.rybalka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7444-0517
[3*]Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail t.m.serdiuk@ust.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-2609-4071

Application of Convolutional Neural Network for Classification of Automatic Cab Signalling Codes

Purpose. Justification the selection of architecture and hyperparameters for an artificial neural network designed to classify Automatic Cab Signalling (ALSN) code signals under conditions of intense interference and temporal distortion. **Methodology**. To achieve the purpose, a comparative analysis of different types of artificial neural networks was performed. It was found that for the classification of ALSN codes, a one-dimensional convolutional network (1D-CNN) is the most suitable, as it effectively detects the characteristic temporal features of signals, requires less data for training, is resistant to noise, and provides stable classification even with a signal shift in time. Calculations of the number of network parameters were performed based on its configuration, including the number of layers, convolutional filters, and the number of neurons in fully connected layers. For model training, synthetic data were generated by adding noise and stochastic timing variations to reference signals («Z», «Zh», and «ChZh»). 1000 implementations were synthesized for each ALSN code signal. The program code for data preparation, network training, and signal classification was written in Python using the TensorFlow, Keras, Scipy.signal, and NumPy libraries. **Findings**. Based on the observed correlation between network configuration and recognition accuracy for the ALSN codes, an optimized model was selected featuring three convolutional layers, a 16-neuron Dense layer, and a 3-neuron output layer. The robustness of the proposed network was validated against both heavily distorted synthetic waveforms with low signal-to-noise ratios and empirical ALSN signals. **Originality**. This work represents the first comprehensive study of artificial neural networks efficacy for ALSN code classification under severe interference and temporal distortions. It justifies the specific 1D-CNN configuration and establishes the dependencies between model structural parameters (number of layers, filters, and neurons) and classification accuracy. **Practical value**. Replacing legacy relay-based equipment with the proposed 1D-CNN-based digital receiver will reduce operational expenditures while significantly enhancing the noise immunity and reliability of the ALSN system through stable code recognition in adverse settings, i.e. intensive noise and temporal parameters disturbances of the code signals.

Keywords: automatic cab signalling; time signatures of signals; interference immunity; distorting the time parameters of codes; convolutional neural network; ALSN code recognition; deep learning; classification accuracy

REFERENCES

1. Hololobova, O. O., Buriak, S. Y., Havryliuk, V. I., R. V. Markul, R. V., Afanasov, A. M., & Bilukhin, D. S. (2021). Determination of the Origin of Failures in the Operation of the Automatic Locomotive Signaling. *Science and Transport Progress, (6(96)*, 5-13. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/257914 (in Ukrainian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

2. Honcharov, K. V., Rybalka, R. V., & Malovichko, V. V. (2025). Increasing the Capacity and Interference Immunity of the Data Transmis-sion Channel in the Automatic Cab Signalling System. *Science and Transport Progress, 4(112),* 5-16. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2025/338389 (in Ukrainian)
3. Mashkina, I., Nosenko, T., & Melnyk, I. (2025). Application of one-dimensional convulsive neural networks for identification of weak radioactive signals in dynamic monitoring systems. *Cybersecurity: Education, Science, Technique, 3*(31), 780-791. DOI https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1074 (in Ukrainian)
4. Nakonechnyi, M. V., Ivakhiv, O. V., & Nakonechnyi, Yu. M. (2024). *Vstup do pohlyblenoho navchannia ta neiromerezheve keruvannia*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky. (in Ukrainian)
5. Sotnyk, V. O., Babaiev, M. M., & Cheptsov, M. M. (2013). Neiromerezheva model rozpiznavannia tryvalosti impulsiv ta intervaliv kodiv ALSN. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT, 36*, 67-79. (in Ukrainian)
6. Aggarwal, C. C. (2023). *Neural Networks and Deep Learning.* Cham: Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-29642-0 (in English)
7. Ananieva, O., Babaiev, M., Blyndiuk, V., & Davidenko, M. (2019). Development of a Device for the Optimal Reception of Signals Against the Background of an Additive Three-component Interference. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2*(9(98), 6-13. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.159310 (in English)
8. Cai, W., Zhu, X., Bai, K., Ye, A., & Zhang, R. (2024). An explainable dual-mode convolutional neural network for multivariate time series classification. *Knowledge-Based Systems, 299*, 112015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.112015 (in English)
9. Chollet, F., & Watson, M. (2025). *Deep Learning with Python.* Manning Publications Co. (in English)
10. Havryliuk, V. (2020, September). Detecting of Signal Distortions in Cab Signalling System Using ANFIS and WPESE. In *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* (pp. 231-236), Istanbul, Turkey. DOI: https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263165 (in English)
11. Havryliuk, V. (2025, July). Investigation of the Influence of Traction Current Harmonics on Automatic Locomotive Signaling. In *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)* (pp. 1-6), Chania, Crete, Greece. DOI: https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169221 (in English)
12. Hololobova, O. O., & Havryliuk, V. I. (2017). Application of Fourier transform and Wavelet decomposition for decoding the continuous automatic locomotive signaling code. *Science and Transport Progress, 1(67),* 7-17. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2017/92771 (in English)
13. Honcharov, K. V., & Rybalka, R. V. (2021). Multi-Valued Automatic Cab Signalling System Based on the CDMA Technology. *Science and Transport Progress, 6(96),* 14-21. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/258171 (in English)
14. Kiranyaz, S., Avci, O., & Abdeljaber, O. (2021). 1D convolutional neural networks and applications : A survey. *Mechanical Systems and Signal Processing, 151*, 107398. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107398 (in English)
15. Liu, S., Yang, S., Liu, C., Liu, T., & Xiong, Q. (2020, December). Research on Anti-interference Algorithm for Cab Signal Demodulation Based on Deep Learning. In *2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)* (pp. 248-254). Shenzhen, China. DOI: https://doi.org/10.1109/icarcv50220.2020.9305349 (in English)
16. Serdiuk, T., Serchenko, M., Profatylov, V., Botnarevscaia, R., Mandaris, D., & Smirnov, A. (2025, May). Monitoring Electromagnetic Interference and Code Current in the Station Interlocking System. In *IEEE 2025 Asia-Pacific In-ternational Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (APEMC)* (pp. 156-159). Taipei, Taiwan. DOI: https://doi.org/10.1109/apemc62958.2025.11051974 (in English)
17. Taherkhani, A., Cosm, G., & McGinnity, T. M. (2023). A Deep Convolutional Neural Network for Time Series Classification with Intermediate Targets. *SN Computer Science, 4*(6), 832. DOI: https://doi.org/10.1007/s42979-023-02159-4 (in English)
18. Theeg, G., & Vlasenko, S. (2009). *Railway Signalling and Interlocking. International Compendium*. Hamburg: Eurailpress. (in English)

Надійшла до редколегії: 01.12.2025
Дата рецензування: 22.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353830
© К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка, Т. М. Сердюк, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

UDC 628.356.3:519.87

M. M. BILIAIEV[1*], A. O. CHIRKOV[2]

[1*]Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882
[2]Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail diit.hydro.eco@gmail.com, ORCID 0009-0005-4326-2881

Hierarchy of Mathematical Models for Calculating Aeration Tanks

Purpose. Aeration tanks are widely used in wastewater treatment. Complex processes of mass transfer of impurities, activated sludge, and oxygen occur in an aeration tank. Therefore, it is very important to have specialized mathematical models that allow for a comprehensive consideration of complex multifactorial processes in aeration tanks. The aim of this work is to identify the advantages and disadvantages of mathematical models used to evaluate the efficiency of water treatment in aeration tanks, as well as to develop numerical models for analyzing the operation of aeration tanks. **Methodology.** System analysis methods used in accordance with hydrodynamics and mass transfer models in wastewater treatment tasks in aeration tanks. The solution of the hydrodynamics problem is based on the use of potential flow model. Mass transfer equations that take into account convective and diffusive transport are used to describe the process of impurity movement in an aeration tank. The development of numerical models is based on the use of the method of splitting modeling equations. **Findings.** Numerical models for calculating the efficiency of water purification in an aeration tank have been developed and implemented in software. These models are a modern tool for mathematical modeling of complex, multifactorial mass transfer processes in aeration tanks. **Originality.** Based on a systematic analysis, the advantages and disadvantages of the models used to analyze the efficiency of aeration tanks have been identified. The construction of effective numerical models for calculating hydrodynamics and mass transfer in aeration tanks has been considered. **Practical value.** The proposed numerical models of hydrodynamics and mass transfer in aeration tanks can be useful for rapid assessment of the efficiency of wastewater treatment in aeration tanks.

Keywords: aeration tank; water treatment; numerical modeling; hydrodynamics; mass transfer; treatment facilities

Introduction

Determining the efficiency of wastewater treatment in aeration tanks plays a particularly important role in assessing the efficiency of water treatment throughout the entire technological line at aeration stations [2–5]. The complexity of the wastewater treatment process in aeration tanks (the impact on the treatment process of oxygen concentration in different parts of the facility, activated sludge concentration, wastewater flow velocity, etc.) significantly complicates the process of constructing mathematical models for calculating aeration tanks. Therefore, in practice, mathematical models with varying degrees of simplification are used [6–10]. An analysis of sources devoted to the development of mathematical models of aeration tank operation shows that the most effective approach for theoretical analysis of aeration tank operation is the use of numerical models [1, 7–10].

Purpose

To identify the advantages and disadvantages of mathematical models used to evaluate the efficiency of water purification in aeration tanks: to develop numerical models for analyzing the operation of aeration tank.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352713
© M. M. Biliaiev, A. O. Chirkov, 2026

Methodology

In this work, system analysis methods and numerical modeling were used to evaluate the efficiency of aeration tanks.

In practice, empirical models are widely used to solve various engineering problems related to evaluating the efficiency of different treatment facilities. With regard to problems related to evaluating the efficiency of aeration tanks, an example of such a model is the following empirical model, which determines the duration of aeration [4]:

$$t = \frac{L_a - L_t}{a \cdot (1 - S_l)\rho},$$

where L_a is BOC_t – wastewater entering the facility; L_t is BOC_t – wastewater leaving the facility S_l – ash content of activated sludge; ρ – oxidation rate; a – activated sludge dose.

Another approach is to use first-order differential equations to describe (with varying degrees of detail) the reactions in the aeration tank (Bertoks):

1) first-order reaction:

$$\frac{dS}{dt} = k_0 XS;$$

2) zero-order reaction:

$$\frac{dS}{dt} = k_1 X;$$

3) mixed-order reaction:

$$\frac{dS}{dt} = kXS,$$

where X – concentration of microorganisms; k, k_0 k_1 – empirical parameters; S – substrate concentration.

Regarding the models considered, the following should be noted: the models make it possible to perform estimates without the aid of a computer, require a small amount of «input» information, and do not require highly qualified specialists for their application. However, these models do not take into account the hydrodynamics of the flow in the aeration tank and the distribution of active sludge, oxygen, and impurities in the structure.

Balance models are more effective. To describe the wastewater treatment process in an aeration tank, they look like this [10]:

$$W \cdot dX = dt \cdot Q_x(t) \cdot X_{in}(t) - dt \cdot Q_x(t) \cdot X + dt \cdot \mu \cdot W \cdot X - dt \cdot K_d \cdot W \cdot X \; ; \quad (1)$$

$$W \cdot dS = dt \cdot Q_s(t) \cdot S_{in} - dt \cdot Q_s(t) \cdot S(t) - dt \cdot \frac{\mu}{Y} \cdot W \cdot X \; ; \quad (2)$$

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{S + K_s}, \quad (3)$$

where K_s is the *Monod* coefficient; $\mu_{\max}$ is the coefficient; $X_{in}(t)$ is the concentration of activated sludge entering the aeration tank; $S_{in}(t)$ is the concentration of substrate entering the facility; W is the reactor volume; $Q_s(t)$ is the substrate flow rate; $Q_x(t)$ is active sludge flow rate; K_d– active sludge decay coefficient; t – time; X – concentration of active sludge in the reactor; S – substrate concentration in the structure; μ – coefficient; Y – parameter.

Balance models (1)–(3) have the following advantages:

1. They take into account a significant number of factors that influence the wastewater treatment process in an aeration tank.

2. Under certain assumptions, they allow for an analytical solution, i.e., an exact solution to the problem.

3. The models can be used to quickly calculate the efficiency of water treatment in an aeration tank.

4. The models can be used to «tune» more powerful, numerical models.

However, these models also have certain disadvantages:

1. The practical application of models requires their solution on a computer.

2. The application of models requires information about certain constants, which is difficult to obtain.

For rapid assessment of oxygen concentration in an aeration tank, 2D models of hydrodynamics and mass transfer can be used [1]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial v\mathrm{C}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \sum Q_i \delta(x - x_i)\delta(y - y_i); \quad (4)$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352713
© M. M. Biliaiev, A. O. Chirkov, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}=0; \quad (5)$$

$$u=\frac{\partial P}{\partial x},\ v=\frac{\partial P}{\partial y};$$

$$\frac{dC}{dt}=K_{La}(C_s-C)-r, \quad (6)$$

where C – oxygen concentration in wastewater; K_{La} – mass transfer coefficient [11, 12]; C_s – maximum value of dissolved oxygen concentration in wastewater; r *is* the oxygen consumption rate by activated sludge [3]; P – velocity potential; u, v – components of the wastewater flow velocity in the aeration tank; t – time; μ_x, μ_y – diffusion coefficients.

Let us consider the boundary conditions for the modeling equations:

1. At the inlet to the facility: $C = C_{in}$,
where C_{in} is the oxygen concentration in the wastewater stream at the inlet to the aeration tank.

2. At the outlet of the facility: $C(i, j) = C(i+1, j)$, where $C(i+1, j)$ is the oxygen concentration value in the last cell; $C(i, j)$ is the oxygen concentration in the previous cell.

3. On solid surfaces:

$$\frac{\partial C}{\partial n}=0,$$

where n is the unit normal to the surface.

Initial conditions: at $t = 0$: $C = C_0$, where C_0 is the known oxygen concentration.

For the hydrodynamics equation (5), the boundary conditions are given in [1].

This two-dimensional model has the following advantages:

1. It takes into account the hydrodynamics of flow in the structure.

2. It allows determining the oxygen concentration in different parts of the aeration tank.

3. It can be used for rapid assessment of the oxygen regime in the aeration tank.

However, the model has the following disadvantages:

1. It allows determining the hydrodynamics of the flow only in a two-dimensional representation.

2. It allows determining the oxygen concentration only in a two-dimensional representation.

More powerful are 3D models of hydrodynamics and mass transfer in the aeration tank:

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial uS}{\partial x}+\frac{\partial vS}{\partial y}+\frac{\partial wS}{\partial z}=$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial S}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial S}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial S}{\partial z}\right);$$

$$\frac{\partial X}{\partial t}+\frac{\partial uX}{\partial x}+\frac{\partial vX}{\partial y}+\frac{\partial wX}{\partial z}=$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial X}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial X}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial X}{\partial z}\right);$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}=0;$$

$$u=\frac{\partial P}{\partial x},v=\frac{\partial P}{\partial y},w=\frac{\partial P}{\partial z};$$

$$\frac{dX}{dt}=\mu X-K_d X;$$

$$\frac{dS}{dt}=-\frac{\mu}{Y}X;$$

$$\mu=\mu_{\max}\cdot\frac{S}{S+K_s}.$$

where K_d – active sludge decay coefficient; t – time; $X(x, y, z, t)$ – concentration of active sludge in the bioreactor; $S(x, y, z, t)$ – concentration of substrate in the bioreactor; $\mu_{x,y,z}(t)$, $\mu_{\max}$, Y, K_s – parameters; $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ – components of the water flow velocity in the bioreactor in the direction of the x, y, z axes, respectively; μ_x, μ_y, μ_z – diffusion coefficients in the direction of the x, y, z axes, respectively.

The boundary conditions for these equations are similar to the boundary conditions for two-dimensional equations.

The three-dimensional model of hydrodynamics and mass transfer has the following advantages:

1. It allows determining the velocity field in the structure and the concentration in three dimensions.

2. The concentrations of activated sludge and impurities are taken into account for the analysis of treatment efficiency.

3. The disadvantages of the model are that the hydrodynamics model does not take into account the viscosity of the wastewater flow in the aeration tank.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352713
© M. M. Biliaiev, A. O. Chirkov, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Two-dimensional and three-dimensional equations only allow for numerical solutions. Thus, to integrate a two-dimensional mass transfer equation, the following splitting is performed:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}=0;$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right);$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\sum Q_i\delta(x-x_i)\delta(y-y_i).$$

Next, finite difference equations are constructed in the following form:

– step №1 ($k = n+1/2$):

$$\frac{C_{i,j}^{k}-C_{i,j}^{n}}{\Delta t}+L_x^+C^k+L_y^+C^k=0;$$

– step №2 ($k = n+1/2$):

$$\frac{C_{i,j}^{n+1}-C_{i,j}^{k}}{\Delta t}+L_x^-C^{n+1}+L_y^-C^{n+1}=0.$$

The form of the operators $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-$ is discussed in [1].

The second splitting equation is integrated as follows («conditional approximation scheme»):

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-C_{i,j}^{n}}{\Delta t}=\left[\mu_x\frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}\right]+\left[\mu_y\frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}\right],$$

$$\frac{C_{pi,j}^{n+1}-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t}=\left[\mu_x\frac{C_{i+1,j}^{n+1}-C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2}\right]+\left[\mu_y\frac{C_{i,j+1}^{n+1}-C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2}\right].$$

Numerical integration for the velocity potential is performed using the «conditional approximation scheme».

The values of the components of the water flow velocity vector in the aerotank are determined as follows:

$$u=\frac{P_{i+1,j}-P_{i,j}}{\Delta x},\ v=\frac{P_{i,j+1}-P_{i,j}}{\Delta y}.$$

The three-dimensional equation for the velocity potential is written as follows:

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}$$

where t is the fictitious time.

Next, Samarsky's method is used for numerical integration of the equation. The two-step splitting scheme has the following form:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2}-P_{i,j,k}^{n}}{0,5\Delta t}=\frac{P_{i+1,j,k}^{n}-P_{i,j,k}^{n}}{\Delta x^2}+\frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2}+P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2}+\frac{P_{i,j+1,k}^{n}-P_{i,j,k}^{n}}{\Delta y^2}+\frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2}+P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2}+\frac{P_{i,j,k+1}^{n}-P_{i,j,k}^{n}}{\Delta z^2}+\frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2}+P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1}-P_{i,j,k}^{n+1/2}}{0,5\Delta t}=\frac{P_{i+1,j,k}^{n+1}-P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}+\frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2}+P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2}+\frac{P_{i,j+1,k}^{n+1}-P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2}+\frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2}+P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2}+\frac{P_{i,j,k+1}^{n+1}-P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2}+\frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2}+P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2}.$$

The calculation based on the difference equations ends when the following condition is met:

$$\left|P_{i,j,k}^{n+1}-P_{i,j,k}^{n}\right|\le\varepsilon,$$

where ε – small number; n – iteration number (number of steps of time).

The boundary condition of no flow on solid walls is implemented by using fictitious difference cells.

For numerical integration of the three-dimensional mass transfer equation, the splitting scheme is used as for the two-dimensional case.

The solution of the initial equation is broken down into a series of steps:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352713
© M. M. Biliaiev, A. O. Chirkov, 2026

– first step (k = 1/4):

$$\frac{C_{ijk}^{n+k}-C_{ijk}^{n}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^+C^k+L_y^+C^k+L_z^+C^k\right)+$$

$$+\frac{\sigma}{2}C_{ijk}^{n}=0; \quad (7)$$

– second step ($k = n$+1/2; $c = n$+1/4):

$$\frac{C_{ijk}^{k}-C_{ijk}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^-C^k+L_y^-C^k+L_z^-C^k\right)+$$

$$+\frac{\sigma}{2}C_{ij}^{k}=0; \quad (8)$$

– third step ($k = n$+3/4; $c = n$+1/2):

$$\frac{C_{ijk}^{k}-C_{ijk}^{c}}{\Delta t}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix} M_{xx}^-C^c+M_{xx}^+C^k+ \\ +M_{yy}^-C^c+M_{yy}^+C^k+ \\ +M_{zz}^-C^c+M_{zz}^+C^k \end{pmatrix}; \quad (9)$$

– fourth step ($k=n$+1; $c=n$+3/4):

$$\frac{C_{ijk}^{k}-C_{ijk}^{c}}{\Delta t}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix} M_{xx}^-C^k+M_{xx}^+C^c+ \\ +M_{yy}^-C^k+M_{yy}^+C^c+ \\ +M_{zz}^-C^k+M_{zz}^+C^c \end{pmatrix}. \quad (10)$$

The form of the operators $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-, \ldots$ is discussed in [1].

A distinctive feature of all developed numerical models is that the calculation of unknown quantities is performed at each step of the decomposition using explicit formulas.

Findings

Numerical models have been developed to simulate the operation of an aeration tank. The models take into account convection and diffusion processes. The basis for the development of numerical models is the splitting method, which allows the solution of the problem to be reduced to a sequential solution of an equation that has a simpler form.

Originality and practical value

Based on a systematic analysis, the advantages and disadvantages of the models used to analyze the efficiency of aeration tanks have been identified. The development of effective numerical models for calculating hydrodynamics and mass transfer in aeration tanks has been considered. The proposed numerical models of hydrodynamics and mass transfer in aeration tanks can be useful for rapid assessment of the efficiency of wastewater treatment in aeration tanks.

Conclusions

The development of 2D and 3D numerical models of aeration tank operation was considered. These models can be used for operational analysis of water purification, taking into account the hydrodynamics of flow in the treatment plant.

In the future, this scientific direction should be developed in the field of 3D CFD model development for analyzing the complex operation of an «aeration tank+ secondary clarifier».

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Біляєв М. М., Козачина В. А., Гунько О. Ю., Лемеш М. В. *Комп'ютерне моделювання процесів біологічної очистки стічних вод* : монографія. Дніпро : Журфонд, 2023. 186 с.
2. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення* : навч. посіб. Київ : ІВНВКП «Укргеліотек», 2010. 272 с.
3. Епоян С. М., Смірнова Г. М., Корінько І. В., Пашкова С. П., Сорокіна В. Ю., Вевелєр Г. *Водовідведення і очищення стічних вод міста* : навч. посіб. Харків : Видавнича група «РА Каравела», 2003. 144 с.
4. Ковальчук В. А. *Очистка стічних вод* : навч. посіб. Рівне : ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. 622 с.
5. Олійник О. Я, Айрапетян Т. С. Моделювання очисних стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповідь НАН України.* 2015. № 5. С. 55–60. DOI: https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055
6. Alharbi A. O. M. The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2016. Vol. 94, Iss. 2. P. 347–348. DOI: https://doi.org/10.1017/S0004972716000411

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352713
© M. M. Biliaiev, A. O. Chirkov, 2026

7. Babaei A., Azadi R., Jaafarzadeh N., Alavi N. Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic biofilm Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013. Vol. 10, Iss. 1. Art. 20. DOI: https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20
8. Dapelo D., Bridgeman J. A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*. 2020. Vol. 81, Iss. 8. P. 1646–1657. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2020.086
9. Mocanu C. R., Mihaillescu R. Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 74, Iss. 2. P. 191–198.
10. Pereda M., Zamarreno J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)* (Corfu, 20-23 June 2011). Corfu, 2011. P. 1128–1133. DOI: https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027
11. Painmanakul P., Wachirasak J., Jamnongwong M., Hebrard G. Theoretical Prediction of Volumetric Mass Transfer Coefficient (KLA) for Designing Aeration Tank. *Engineering Journal*. 2009. Vol. 13, No. 3. P. 13–28. DOI: https://doi.org/10.4186/ej.2009.13.3.13
12. Vanags J., Suleiko A. Oxygen Mass Transfer Coefficient Application in Characterisation of Bioreactors and Fermentation Processes. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2022. Vol. 59, Iss. 5. P. 21–32. DOI: https://doi.org/10.2478/lpts-2022-0038

М. М. БІЛЯЄВ[1*], А. О. ЧІРКОВ[2]

[1*]Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882
[2]Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта diit.hydro.eco@gmail.com, ORCID 0009-0005-4326-2881

Ієрархія математичних моделей для розрахунку аеротенків

Мета. Аеротенки мають широке застосування при очистці стічних вод. Процес очищення стічних вод в аеротенку має дуже складний характер з точки зору математичного опису. В аеротенку відбуваються складні процеси масопереносу домішки, активного мулу, кисню. На процес очистки води в аеротенку суттєво впливає гідродинаміка течії стічних вод, місце подачі кисню, розмір повітряних бульбашок, наявність різного роду перешкод в очисній споруді. Тому для практики дуже важливо мати спеціалізовані математичні моделі, що дозволяють комплексно враховувати складні багатофакторні процеси в аеротенках. Метою роботи є визначення переваг та недоліків математичних моделей, що використовуються для оцінювання ефективності очистки води в аеротенках, а також розробка чисельних моделей для аналізу роботи аеротенків. **Методика.** Методи системного аналізу, використані відповідно до моделей гідродинаміки та масопереносу в задачах очистки стічних вод в аеротенках. Рішення задачі гідродинаміки базується на використанні моделі потенціальної течії. Для опису процесу руху домішки в аеротенку використовуються рівняння масопереносу, що враховують конвективний та дифузійний перенос. Побудова чисельних моделей базується на використанні методу розщеплення моделюючих рівнянь. **Результати.** Розроблено та здійснено програмну реалізацію чисельних моделей розрахунку ефективності очистки води в аеротенку, що являють собою сучасний інструмент математичного моделювання складних, багатофакторних процесів масопереносу в аеротенках. **Наукова новизна.** На основі системного аналізу визначені недоліки та переваги моделей, шо використовуються для аналізу ефективності роботи аеротенків. Розглянуто побудову ефективних чисельних моделей для розрахунку гідродинаміки та масопереносу у аеротенках. **Практична значимість.** Запропоновані чисельні моделі гідродинаміки та масопереносу в аеротенках можуть бути корисними для експрес оцінювання ефективності очистки стічних вод в аеротенках.

Ключові слова: аеротенк; очистка води; чисельне моделювання; гідродинаміка; масоперенос; очисні споруди

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352713
© M. M. Biliaiev, A. O. Chirkov, 2026

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Kozachyna, V. A., Gunko, O. Yu., & Lemesh, M. V. (2023). *Kompyuterne modelyuvannya procesiv biologichnoyi ochystky stichnyx vod*. monografiya. Dnipro, Ukraine: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., Larkina, H. M., Polishchuk, O. V., & Prohulnyi, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiia i intensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia.* Kyiv, Ukraine: IVNVKP «Ukrheliotek». (in Ukrainian)
3. Epoyan, C. M., Smirnova, H. M., Korinko, I. V., Pashkova, S. P., Sorokina, V. Yu., & Vevelier, H. (2003). *Vodovidvedennia i ochyshchennia stichnykh vod mista*. Kharkiv, Ukraine: Vydavnycha hrupa «RA Karavela». (in Ukrainian)
4. Kovalchuk, V. A. (2002). *Ochystka stichnykh vod*. Rivne, Ukraine: VAT «Rivnenska drukarnia». (in Ukrainian)
5. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5*, 55-60. DOI: https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055 (in Ukrainian)
6. Alharbi, A. O. M. (2016). The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society, 94(2)*, 347-348. DOI: https://doi.org/10.1017/s0004972716000411 (in English)
7. Babaei, A., Azadi, R., Jaafarzadeh, N., & Alavi, N. (2013). Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic biofilm Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering, 10*(1), 20. DOI: https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20 (in English)
8. Dapelo, D., & Bridgeman, G. (2020). A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology, 81*(8), 1646-1657. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2020.086 (in English)
9. Mocanu, C. R., & Mihaillescu, R. (2012). Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 74*(2), 191-198. (in English)
10. Pereda, M., & Zamarreno, J. M. (2011, June). Agent-based modeling of an activated sludge process in a batchreactor. In *2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)* (pp. 1128-1133). Corfu, Greece. DOI: https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027 (in English)
11. Painmanakul, P., Wachirasak, J., Jamnongwong, M., & Hebrard, G. (2009). Theoretical Prediction of Volumetric Mass Transfer Coefficient (KLA) for Designing Aeration Tank. *Engineering Journal, 13*(3), 13-28. DOI: https://doi.org/10.4186/ej.2009.13.3.13 (in English)
12. Vanags J., & Suleiko A. (2022). Oxygen Mass Transfer Coefficient Application in Characterisation of Bioreactors and Fermentation Processes. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 59*(5), 21-32. DOI: https://doi.org/10.2478/lpts-2022-0038 (in English)

Received by the editorial board: November 19, 2025
Review date: December 25, 2025
Publication date: March 27, 2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352713
© M. M. Biliaiev, A. O. Chirkov, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК [621.793:519.87]-047.37

В. В. БІЛЯЄВА[1*], О. І. ГУБІН[2], Ю. В. БРАЗАЛУК[3]

[1*]Каф. «Енергетичних систем та енергоменеджменту», Український державний університет науки і технологій, ННІ УДХТУ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 101 19 78, ел. пошта vikabelyaeva604@gmail.com, ORCID 0000-0001-9987-6384
[2]Каф. аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (099) 319 47 91, ел. пошта hubin_o@365.dnu.edu.ua, ORCID 0000-0001-9434-2367
[3]Каф. аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 582 71 71, ел. пошта brazaluk_jv@ukr.net, ORCID 0000-0001-6448-8525

Чисельне дослідження процесу затвердіння тонкого покриття на поверхні тіла

Мета. Плазмове напилення широко застосовується для зміцнення та відновлення робочих поверхонь деталей виробів, що зумовлено сукупністю його техніко-економічних переваг та високою ефективністю процесу. Активне використання цієї технології, зокрема під час обробки деталей широкої номенклатури, обумовлює підвищені вимоги до рівня застосовуваного обладнання та якості вихідних матеріалів. Водночас метод плазмового напилення покриттів має низку обмежень, які водночас слугують потенційним резервом для подальшого вдосконалення технологічних рішень. Ефективним методом розв'язку таких задач є використання математичних моделей. Основна мета роботи полягає у побудові нелінійної математичної моделі затвердіння покриття на поверхні тіла з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик. **Методика.** Математична модель для дослідження процесу затвердіння покриття на поверхні тіла включає в себе рівняння теплопровідності для твердої кірки і основи. Чисельне інтегрування моделюючих рівнянь здійснюється за допомогою неявного різницевого методу з ловлею фронту у вузол сітки. **Результати.** Розроблено комп'ютерну програму, за допомогою якої можливо проведення чисельних досліджень процесів затвердіння титанового та алюмінієвого покриттів на сталевій основі. Наведено результати чисельного моделювання. **Наукова новизна.** Розроблено нелінійну математичну модель для дослідження процесу затвердіння тонкого покриття на поверхні тіла. Модель базується на чисельному інтегруванні рівнянь теплопровідності для твердої кірки і основи та дозволяє визначити зміну в часі температури в різних точках системи «основа – покриття». **Практична значимість.** Розроблена математична модель може бути корисною при дослідженні затвердіння покриття напиленого на поверхню тіла, а також при виборі режимних параметрів процесу плазмового напилення. Вона забезпечує наукове обґрунтування параметрів процесу та режимів роботи застосовуваного обладнання. Модель дозволяє оцінювати динаміку формування теплових полів у процесі затвердіння покриттів.

Ключові слова: плазмове напилення; затвердіння покриття; температурне поле; фронт фазового переходу; математична модель

Вступ

На сучасному етапі науково-технічного прогресу зростають вимоги до міцнісних характеристик конструкційних матеріалів. Покриття, отримані розпиленням матеріалів високотемпературним газовим струменем на підкладку з подальшою термічною обробкою нанесених матеріалів забезпечують необхідні характеристики конструкційних матеріалів та знаходять все більш широке використання. Практичний досвід використання покриттів, накопичений за останні 20–30 років у галузях промисловості, показує, що таким шляхом можна, як правило, в 2–5 разів зменшити знос деталей машин, що експлуатуються в різних умовах. Ефективність технології також підтверджена при захисті виробів від корозії та теплових руйнувань [1, 4].

Плазмове напилення широко застосовується для зміцнення і відновлення робочих поверхонь деталей виробів. До істотних техніко-економічних переваг технології відносяться: висока продуктивність процесу; отримання високоякісного покриття, особливо в умовах загального захисту; наявність великої кількості технологічних факторів, варіювання яких забез-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

печує гнучке регулювання процесу напилення; високий коефіцієнт використання порошкового матеріалу; широка доступність методу як в основному, так і ремонтному виробництві; економічність; невисока вартість найпростішого обладнання; можливість комплексної механізації і автоматизації процесу та ін.

Широке застосування плазмового напилення покриттів, особливо для зміцнення і відновлення робочих поверхонь деталей виробів широкої номенклатури, обумовлює необхідність підвищення рівня застосовуваного обладнання та матеріалів. Метод плазмового напилення покриттів має також ряд недоліків, які по суті є резервом в удосконаленні технології.

У комплект обладнання для плазмового напилення входять наступні вузли: плазмотрон, механізм транспортування порошкових або дротяних матеріалів; пульт управління, в якому зосереджені вимірювальні, регулювальні і блокувальні пристрої; джерело живлення дуги; джерело і приймач охолоджуючої води; комплекс комунікацій, що з'єднує окремі вузли установки і забезпечує підведення до плазмотрону газів, електроенергії, води, що охолоджує.

Струм, плазмоутворюючий газ, вода що охолоджує, які підводяться до установки взаємопов'язані. Взаємозв'язок полягає в тому, що електрична схема включення напруги, що підводиться від джерела струму до плазмового пальнику, заблокована контактами реле тиску, встановленими в системі охолодження водою, а також контактами реле тиску, встановленими в системі харчування плазмоутворюючим газом.

Плазмове напилення в порівнянні з газополуменевим і дуговим має ряд переваг [4, 5]:

– дозволяє наносити покриття з матеріалів широкого складу (метали, сплави, оксиди, карбіди, нітриди, бориди, пластмаси та їх різні композиції) на різноманітний матеріал основи (метали, кераміка, графіт, пластмаси та ін.);

– плазмові пальники дозволяють в широких межах регулювати енергетичні характеристики плазми, що полегшує отримання покриттів з властивостями, зумовленими вимогами технології;

– використання в плазмових пальниках інертних газів, що не містять кисню, сприяє зменшенню окислення напилюваного матеріалу і поверхні деталі;

– покриття, отримані плазмовим напиленням, за фізико-механічними властивостями перевершують покриття, отримані газополуменевим і дуговим способами напилення.

Технологічний процес відновлення деталей плазмовим напиленням включає наступні операції: підготовка порошку, поверхні деталі, напилення і механічна обробка напилених покриттів [7, 8].

Підготовка порошку полягає в сушінні на деках при температурі 150–200 °С. Для підбору порошків з певною дисперсністю гранул їх слід просівати через сито з розмірами вічок, що відповідають розмірам необхідних гранул.

Підготовці поверхні деталі до напилювання має першочергове значення, оскільки від її якості значною мірою залежить міцність зчеплення частинок порошку з поверхнею деталі [5, 6].

Деталі, що підлягають покриттю, очищають від бруду, масла в миючих препаратах, а потім сушать. Чавунні деталі, що працюють тривалий час в масляному середовищі, при очищенні піддають сушці в шафі або печі при температурі 250–300 ° С. Після очищення (в разі потреби видалення слідів зносу і додання деталі правильної геометричної форми) їх піддають механічній обробці. Основною підготовчою операцією є утворення на поверхні необхідної шорсткості, яка має суттєвий вплив не тільки на міцність зчеплення напилюваного шару з підкладкою, але і на втому відновлюваної деталі.

Найбільш раціональний метод створення шорсткості, що в меншій мірі знижує опір втоми деталі, дробоструйна обробка металевої чавунної крихтою з розміром частинок 1,5–2 мм при тиску повітря 0,5–0,6 МПа. Інші методи отримання на поверхні шорсткості (нарізування різьблення, електроіскрова або електромеханічна обробка, анодно-механічне шліфування) знижують опір втоми деталі. Відновлювану поверхню перед обробкою слід знежирити. Ділянки, прилеглі до поверхні, яка підлягає покриттю, захищають спеціальним екраном [9, 10].

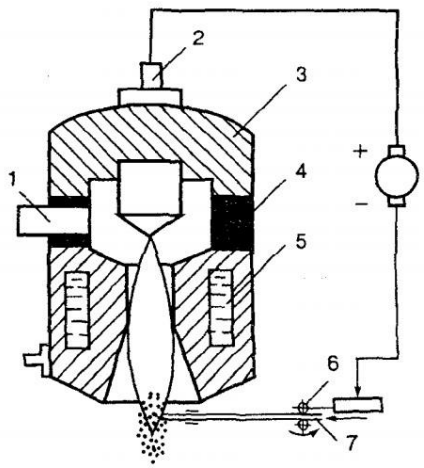
Напилювати покриття слід відразу після дробеструйной обробки, так як вже через 2 години її активність зменшується через збільшення на обробленій поверхні оксидної плівки.

При плазмовому напиленні у якості напилюваних матеріалів застосовують порошки (рис.1, *а*), дроти й прутки (рис. 1, *б*).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

а – a



б – b

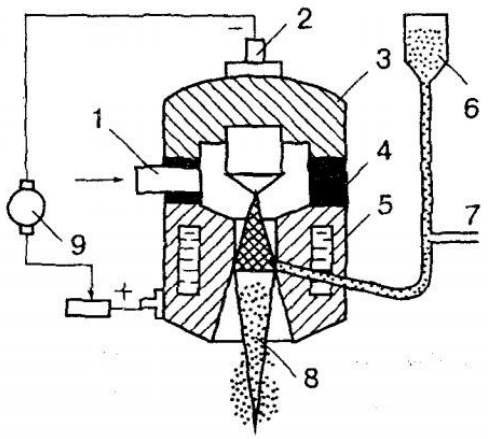


Рис. 1. Схема плазмового напилення
а – порошком; *б* – дротом:
1 – підведення плазмоутворюючого газу;
2 – катод плазмотрона; 3 – корпус катода; *4* – ізолятор;
5 – корпус анода; *6* – порошковий живильник
(механізм подачі дроту, рис. 1, *б*);
7 – підведення газу, що транспортує порошок;
8 – плазмовий струмінь;
9 – джерело живлення

Fig. 1. Plasma spraying scheme
a – powder; *b* – wire:
1 – plasma-forming gas supply; *2* – plasma torch cathode;
3 – cathode housing; *4* – insulator;
5 – anode housing;
6 – powder feeder (wire feed mechanism, Fig. 1, *b*);
7 – gas supply that transports powder;
8 – plasma jet;
9 – power source

Найбільш широкого поширення набула наплавка порошками.

Критерієм, що визначає практичну можливість застосування того чи іншого напиленного шару, є міцність його зчеплення з основним металом. Питання про природу зв'язку між покриттям і основним металом до теперішнього часу залишається спірним. Вважається, що зчеплення напилюваного шару з поверхнею носить чисто механічний характер і ґрунтується на дії сил адгезії, величина яких залежить від кінетичної енергії частинок і надлишкової енергії поверхневого шару. У той же час процес формування частинок з матеріалом підкладки ряд авторів умовно розбивають на три стадії: утворення фізичного контакту; активація контактних поверхонь і утворення міцних хімічних зв'язків на межі розділу частинка-підкладка; розвиток об'ємної взаємодії (релаксаційні процеси, гетеродифузія, утворення нових фаз).

Залежно від властивостей напилених металевих частинок, нагрівання основи, а також способу і режиму напилення, частки можуть досягати підкладки в рідкому, пластичному або твердому стані, тобто міцність зчеплення визначається станом частинки і напилювальної поверхні в кожен конкретний момент. Істотний вплив на формування і міцність зчеплення покриттів надає температура поверхні оброблюваної деталі. Таким чином, крім підготовки поверхні, на якість формування покриття і продуктивність процесу напилення великий вплив мають хімічний склад і властивості порошку, його грануляція, витрата, умови доставки до підкладки, склад газового середовища, кількість теплоти, що передається часткам порошку і деталі [4].

Для здійснення наведених факторів з метою отримання заданих експлуатаційних властивостей покриттів необхідно, щоб порошкові сплави і конструкції плазмотронів відповідали певним вимогам. Оскільки при транспортуванні порошку в плазмовий струмінь утворюється двофазний потік, що складається з частинок порошку і несучого його плазмового струменя, то зазначені фактори слід розглядати в комплексі.

Отже, плазмове напилення є багатоетапним та доволі вартісним процесом, тому важливим і необхідним є математичне моделювання відповідних його стадій.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Мета

Побудова нелінійної математичної моделі затвердіння покриття на поверхні тіла з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик; розробка різницевої схеми для побудованої математичної моделі; створення алгоритму розв'язання задачі та її програмної реалізації; здійснення числових досліджень температурних полів системи основа-покриття та закону руху фронту затвердіння.

Методика

Розглянемо процес затвердіння металевого покриття товщиною δ на поверхні тіла (рис. 2). Покриття нанесено на поверхню методом плазмового напилення і в початковий момент часу знаходиться повністю в рідкому стані, його перегрів над температурою фазового переходу T_f незначний, тому їм будемо нехтувати і вважати, що в початковий момент часу по всій товщині рідкого покриття температура дорівнює T_f. Температура тіла (основи) в початковий момент часу постійна і дорівнює $T_0 < T_f$. Товщина тіла істотно більше товщини покриття, тому тіло вважатимемо напівобмеженим. З моменту часу, наступного за початковим, здійснюється теплообмін теплоровідністю між покриттям і основою. Тепловий контакт між ними будемо вважати ідеальним. Також має місце променевий і конвективний теплообмін з навколишнім середовищем, але він протікає з помітно меншою інтенсивністю ніж з основою, тому їм будемо нехтувати, тобто за рахунок тепловідведення від покриття в основу почнеться процес його затвердіння і охолодження твердої кірки. Об'єм рідкої фази буде скорочуватися при незмінній її температурі T_f. Теплота що надходить в тверду кірку з боку фронту затвердіння $\eta(t)$, дорівнює тепловому ефекту фазового переходу. Для подальшої чисельної реалізації вважатимемо товщину тіла скінченною і рівною $l - \delta$, де l обирається з умови відсутності проникнення тепла на відповідну глибину в основу. Теплофізичні характеристики основи і твердої фази покриття будемо вважати заданими функціями температури.

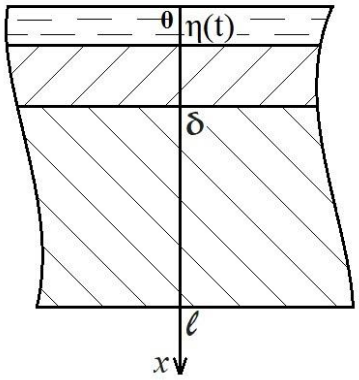


Рис. 2. Тіло з покриттям, що затвердіває на його поверхні

Fig. 2. A body with a coating that hardens on its surface

Математична модель процесу затвердіння покриття на поверхні тіла включає в себе рівняння теплопровідності для твердої кірки і основи:

$$c_1(T_1)\rho_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\right), \quad \eta(t) < x < \delta, \quad 0 < t \le t^* \tag{1}$$

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\right), \quad \delta < x < l, \quad 0 < t < t^* \tag{2}$$

граничні умови:

$$T_1\big|_{x=\eta(t)} = T_f, \quad 0 < t < t^*, \tag{3}$$

$$\lambda_1(T_f)\frac{\partial T_1}{\partial x}\bigg|_{x=\eta(t)} = \rho_1(T_f)L\frac{d\eta}{dt}, \quad 0 < t < t^*, \tag{4}$$

$$T_1\big|_{x=\delta} = T_2\big|_{x=\delta}, \quad 0 < t < t^*, \tag{5}$$

$$\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\bigg|_{x=\delta} = \lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\bigg|_{x=\delta}, \quad 0 < t < t^*, \tag{6}$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x}\bigg|_{x=l} = 0, \quad 0 < t < t^*, \tag{7}$$

і початкові умови:

$$T_2\big|_{t=0} = T_0, \quad \delta \le x \le l, \tag{8}$$

$$\eta\big|_{t=0} = \delta, \tag{9}$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

де x – просторова координата; t– поточний час; t^* – момент закінчення процесу затвердіння, який визначається з рівняння $\eta(t^*)=0$; $T_k(x,t)$ – температурні поля; λ_k – коефіцієнти теплопровідності; c_k – теплоємності; *к = 1* – відповідає твердій кірці покриття; *к = 2* – основі; L – теплота затвердіння матеріалу покриття.

Гранична умова (4) є умовою Стефана і характеризує баланс тепла на фронті фазового переходу. Математична модель (1) – (9) є задачею Стефана, з якої визначаються температурні поля $T_k(x,t)$ і закон руху фронту затвердіння $\eta(t)$ [2].

Проміжки $0\le x\le\delta$, $\delta\le x\le l$ розіб'ємо відповідно на N_1 і N_2 частин з кроками $h_1=\dfrac{\delta}{N_1}$ і $h_2=\dfrac{l-\delta}{N_2}$, тоді координати вузлів сітки в першому проміжку будемо визначати за формулою

$$x_i=h_1(N_1+i),\qquad i=\overline{-N_1,0}, \tag{11}$$

а в другому проміжку за формулою

$$x_i=\delta+h_2 i,\qquad i=\overline{0,N_2}. \tag{12}$$

Сітку за часом введемо таким чином, щоб за кожен крок по часу τ_j фронт затвердіння переміщався рівно на величину h_1. Тоді, враховуючи, що $t_0=0,\quad t_j=\sum_{k=1}^{j}\tau_j,\quad j=\overline{1,N_1}$, положення фронту затвердіння у відповідні моменти часу будуть визначатися за формулою

$$\eta_j=h_1(N_1-j),\qquad j=\overline{0,N_1}. \tag{13}$$

На введеній сітці диференціальні рівняння теплопровідності (1) і (2) апроксимуємо неявними різницевими рівняннями:

$$\left(c_1\rho_1\right)_i^{j-1}\frac{T_i^j-T_i^{j-1}}{\tau_j}=$$

$$=\frac{1}{h_2}\left[\lambda_{1,i+\frac12}^{j-1}\left(T_{i+1}^j-T_i^j\right)-\lambda_{1,i-\frac12}^{j-1}\left(T_i^j-T_{i-1}^j\right)\right];$$

$$i=\overline{-j+1,-1},\qquad j=\overline{2,N_1}; \tag{14}$$

$$\left(c_2\rho_2\right)_i^{j-1}\frac{T_i^j-T_i^{j-1}}{\tau_j}=$$

$$=\frac{1}{h_2}\left[\lambda_{2,i+\frac12}^{j-1}\left(T_{i+1}^j-T_i^j\right)-\lambda_{2,i-\frac12}^{j-1}\left(T_i^j-T_{i-1}^j\right)\right].$$

$$i=\overline{1,N_2-1},\qquad j=\overline{1,N_2}. \tag{15}$$

Дискретні аналоги граничних і початкових умов запишуться у вигляді:

$$T_{-j}^j=T_f,\qquad j=\overline{1,N_1}; \tag{16}$$

$$\lambda_1\left(T_f\right)\frac{T_f-T_{-j+1}^j}{h_1}=\rho_1\left(T_f\right)L\frac{h_1}{\tau_j}\qquad j=\overline{1,N_1}; \tag{17}$$

$$\lambda_{1,0}^{j-1}\frac{T_0^j-T_{-1}^j}{h_1}=\lambda_{2,0}^{j-1}\frac{T_1^j-T_0^j}{h_2},\qquad j=\overline{1,N_1}; \tag{18}$$

$$\frac{T_{N_2}^j-T_{N_2-1}^j}{h_2}=0,\qquad j=\overline{1,N_1}; \tag{19}$$

$$T_i^0=T_0,\qquad i=\overline{0,N_2}. \tag{20}$$

де $\left(c_k\rho_k\right)_i^{j-1}=c_k\left(T_i^{j-1}\right)\rho_k\left(T_i^{j-1}\right)$;

$$\lambda_{k,i\pm\frac12}^{j-1}=\lambda_k\left(\frac{T_{i\pm\frac12}^{j-1}+T_i^{j-1}}{2}\right).$$

Система рівнянь (14) – (20) нелінійна відносно невідомих T_i^j, τ_j і для її розв'язання можна застосувати метод ітерацій.

Ітераційний процес закінчується при виконанні умови [2, 3]:

$$\frac{\left|\tau_j^{(s+1)}-\tau_j^{(s)}\right|}{\tau_j^{(s+1)}}\le\varepsilon,\quad \varepsilon>0.$$

Результати

За допомогою розробленої комп'ютерної програми були виконані розрахунки температурного поля системи основа – покриття і закону руху фронту затвердіння при наступних вихідних даних: матеріал основи – сталь 40Х з сталими теплофізичними характеристиками: $c_2=466\dfrac{Дж}{кг\cdot К}$, $\rho_2=7800\dfrac{кг}{м^3}$, $\lambda_2=46\dfrac{Вт}{м\cdot град}$;

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

матеріал покриття – титан з теплофізичними характеристиками: $c_1 = 540\frac{Дж}{кг \cdot K}$, $\rho_1 = 4150\frac{кг}{м^3}$, $\lambda_1 = 22\frac{Вт}{м \cdot град}$, $T_f = 1943K$, $L = 358\frac{кДж}{кг}$. Товщина покриття $\delta = 1мм$. При виконанні розрахунків для даної системи розглядалося два випадки. У першому випадку вважалося, що температура основи в початковий момент часу дорівнює температурі навколишнього середовища $T_0 = 300K$, тобто покриття наносилось на холодне тіло. У другому випадку тіло в початковий момент часу вважалося підігрітим до $T_0 = 700K$. Результати розрахунків наведені на рис. 3–8.

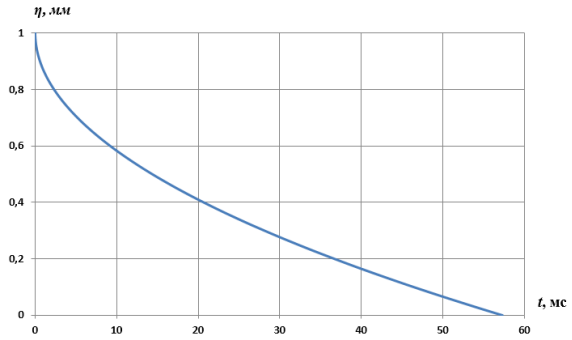


Рис. 3. Закон руху фронту затвердіння титанового покриття при $T_0 = 300K$

Fig. 3. The law of motion of the solidification front of a titanium coating at $T_0 = 300K$

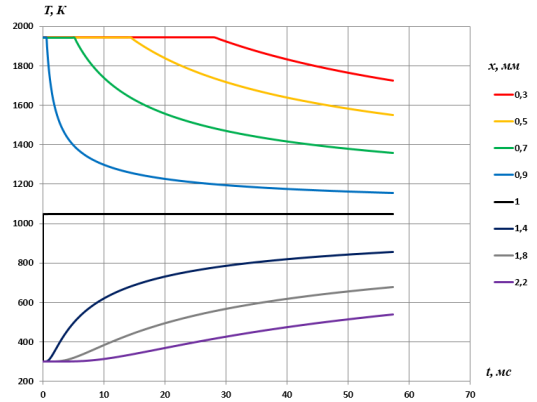


Рис. 4. Зміна температури у часі в різних точках системи сталь – титан при $T_0 = 300K$

Fig. 4. Temperature change over time at different points of the steel-titanium system at $T_0 = 300K$

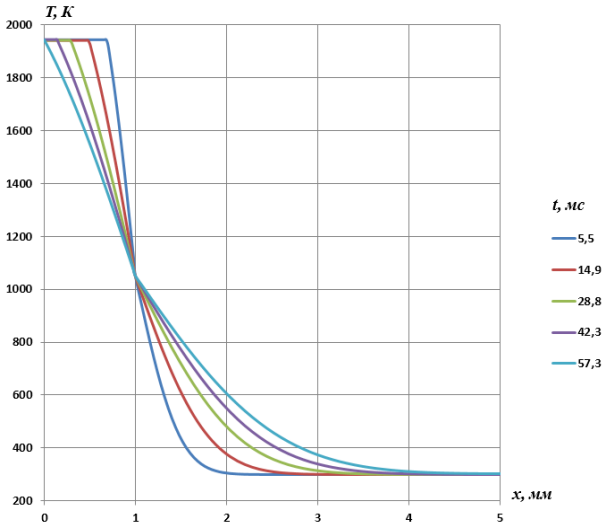


Рис. 5. Розподіл температур по товщині системи сталь –титан в різні моменти часу при $T_0 = 300K$

Fig. 5. Temperature distribution across the thickness of the steel-titanium system at different times when $T_0 = 300K$

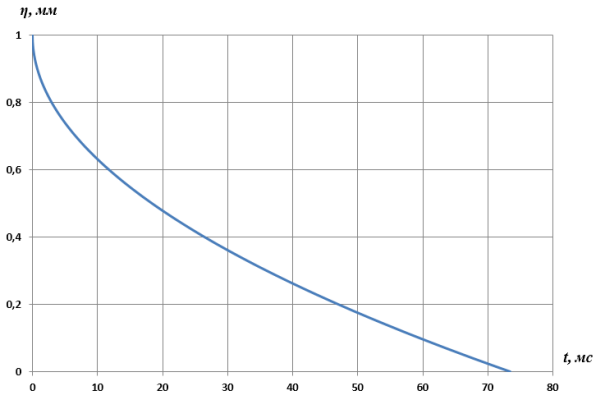


Рис. 6. Закон руху фронту затвердіння титанового покриття при $T_0 = 700K$

Fig. 6. The law of motion of the solidification front of a titanium coating at $T_0 = 700K$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

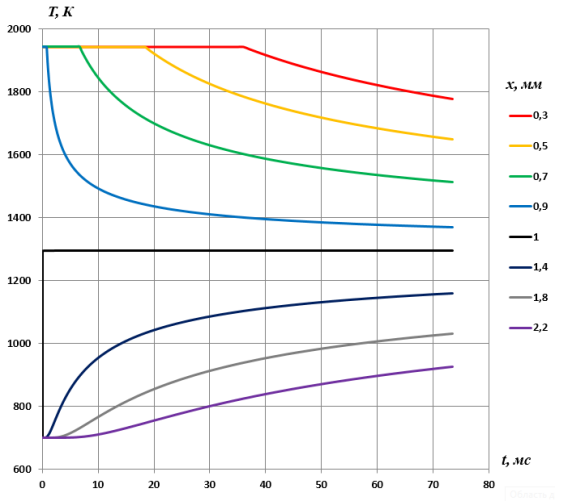


Рис. 7. Зміна температури у часі в різних точках системи сталь – титан при $T_0 = 700\,K$

Fig. 7. Temperature change over time at different points of the steel-titanium system at $T_0 = 700K$

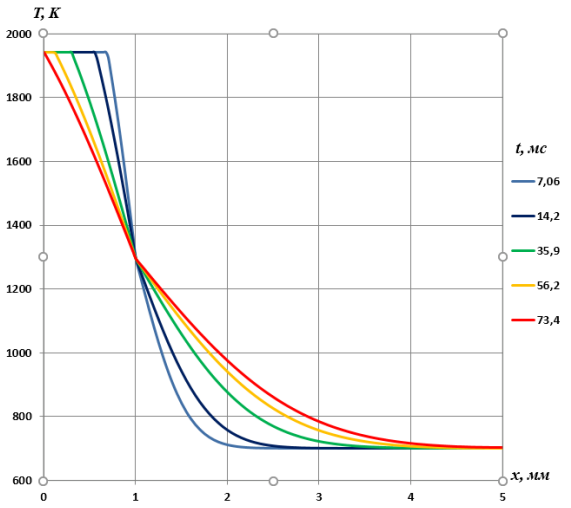


Рис. 8. Розподіл температур по товщині системи сталь -титан в різні моменти часу при $T_0 = 700\,K$

Fig. 8. Temperature distribution across the thickness of the steel-titanium system at different times when $T_0 = 700K$

З рис. 3 та 6 видно, що при $T_0 = 300\,K$, час затвердіння покриття становить $t^* = 57,3$мс, а при $T_0 = 700\,K$ – $t^* = 73,4\,мс$, тобто час затвердіння збільшився на 16,1 мс.

Рис. 4 та 7 ілюструють зміну в часі температури в різних точках системи основа – покриття. Температура у відповідній точці покриття залишається постійною до приходу в неї фронту затвердіння, після чого температура для затверділого матеріалу покриття монотонно убуває. Температура в точках основи з часом монотонно зростає і буде тим більше, чим ближче точка до поверхні контакту основи з покриттям. По мірі заглиблення в основу збільшується запізнення нагріву її відповідних об'ємів. Цікавим фактом є те, що на поверхні контакту одразу встановлюється температура, яка протягом усього процесу затвердіння залишається незмінною аналогічно тому, як це має місце при приведенні в дотик двох напівобмежених тіл з різною температурою. При $T_0 = 300\,K$ ця температура дорівнює 1050К, а при $T_0 = 700\,K$ – 1 296 К, що близько до середнього арифметичного значення між T_f та T_0, це пов'язано з близькістю коефіцієнтів температуропровідності сталі і титану.

З рис. 5 та 8 видно, що температура в різні моменти часу убуває вглиб системи. У твердій кірці покриття, температурні криві, асимптотично наближаючись до T_0, випуклі вгору, а в основі випуклі вниз, тобто випуклість змінюється на границі контакту основи і покриття. Температура в покритті убуває з прискоренням, а в основі з уповільненням. Всі температурні криві перетинаються в одній точці $x = 1$ і мають в ній злам, пов'язаний з різницею коефіцієнтів теплопровідності сталі і титану.

Наукова новизна та практична значимість

Побудовано нелінійну математичну модель затвердіння покриття, сформованого на поверхні тіла внаслідок плазмового напилення, з урахуванням залежності теплофізичних параметрів матеріалів від температури. Із застосуванням неявної різницевої схеми з прив'язкою рухомого фронту фазового переходу до вузлів сітки розроблено алгоритм чисельного розв'язання відповідної задачі Стефана та реалізовано його у вигляді програмного комплексу. На основі цієї моделі виконано чисельне моделювання процесів затвердіння титанових і алюмінієвих покриттів на сталевій підкладці з початковою температурою, що відповідала температурі довкілля або становила 700 К, для випадків сталих і температурно-змінних тепло-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

фізичних властивостей матеріалів, а також здійснено їх порівняльний аналіз.

Результати роботи можуть бути використані при дослідженні затвердіння покриття напиленого на поверхню тіла, а також при виборі режимних параметрів процесу плазмового напилення.

Висновки

1. Розглянуто технологічний процес відновлення деталей плазмовим напиленням.

2. Побудовано нелінійну математичну модель затвердіння покриття, що нанесене на поверхню тіла плазмовим напиленням, з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик матеріалів.

3. На основі неявного різницевого методу з ловлею фронту у вузол сітки, розроблено алгоритм розв’язання задачі про затвердіння металевого покриття на поверхні тіла, а також створено його програмну реалізацію.

4. На основі вихідної математичної моделі здійснені розрахунки процесів затвердіння титанового та алюмінієвого покриттів на сталевій основі, що мала початкову температуру, рівну температурі навколишнього середовища або була підігріта до 700 К, при змінних і сталих теплофізичних властивостях матеріалів, а також здійснено детальний аналіз та порівняння їх результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гасій О. Б., Ацбергер Й. Л. До питання підвищення стійкості метало- і дереворізального інструменту йонно-плазмовим напиленням. *Науковий вісник УкрДЛТУ*. 2001. Вип. 11.4. С. 135–139.
2. Самборська О. М., Шелестовський Б. Г. *Чисельні методи* : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2010. 164 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/20814
3. *Чисельні методи* : посібник / уклад.: І. В. Мірошкіна, О. А. Палагіна ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2017. 116 с.
4. Ярос Ю. О., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Кондратьєва А. А., Лабарткава О. В., Савочкіна В. В. Нанесення плазмових алюмоматричних композиційних покриттів. *Збірник наукових праць НУК*. 2025. № 2(500). С. 66–72. DOI: https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).10
5. Fizi Y., Mebdoula Y., Lahmar H., Djieraf S., Benbahouche S. Adhesion of FeCrNiBSi-(W-Ti)C wire-arc deposited coatings onto carbon steel substrates determined by indentation measurements and modelling. *Surface and Coating Technology*. 2015. Vol. 268. P. 310–316. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.004
6. Kopylov V. Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, No. 5(83). P. 49–57. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79586
7. Liu M., Peng Q., Huang Y. Influencing Factors and Process Optimization of Al/SiC Powder-cored Wires by Plasma Transferred Wire Arc Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2024. Vol. 33. P. 2167–2183. DOI: https://doi.org/10.1007/ s11666-024-01823-2
8. Rahman M, Profili J., Stafford L., Moreau C. Surface preparation of aluminium by atmospheric-pressure plasma jet for suspension plasma sprayed ceramic coatings. *Surface and Coating Technology*. 2024. Vol. 476. P. 130–175. DOI: https://doi.org/10.1016/ j.surfcoat.2023.130175
9. Wang Y., Sun C., Sun J., Zhao W., Dong L., Li L., Meng F. Erosion behaviour of arc sprayed FeTi/CrB MMC coating at elevated temperature. *Surface and Coating Technology*. 2015. Vol. 262. P. 141–147. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.027
10. Zhao L., Zhou D., Xie G., Peng Y., Ciu X., Wang J., Xiong T. Unraveling the influence of Al particle size on microstructure and tribological properties of cold sprayed Al/B4C composite coatings. *Materialstoday Communications*. 2023. Vol. 34. 105257. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105257

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

V. V. BILIAIEVA[1*], O. I. GUBIN[2], IU. V. BRAZALUK[3]

[1*]Dep. «Energy Systems and Energy Management», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI USUCT, Nauky Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 101 19 78, e-mail vikabelyaeva604@gmail.com, ORCID 0000-0001-9987-6384
[2]Dep. of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, Nauky Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (099) 319 47 91, e-mail hubin_o@365.dnu.edu.ua, ORCID 0000-0001-9434-2367
[3]Dep. of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, Nauky Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (050) 582 71 71, e-mail brazaluk_jv@ukr.net, ORCID 0000-0001-6448-8525.

Numerical Study of the Solidification Process of a Thin Coating on a Body Surface

Purpose. Plasma spraying is widely used to strengthen and restore the working surfaces of product parts, which is due to the combination of its technical and economic advantages and high process efficiency. The active use of this technology, in particular when processing a wide range of parts, imposes increased requirements on the level of equipment used and the quality of raw materials. At the same time, the plasma spraying method of coatings has a number of limitations, which at the same time serve as a potential reserve for further improvement of technological solutions. An effective method for solving such problems is the use of mathematical models. The main goal of the work consists in building a nonlinear mathematical model of coating hardening on the surface of the body, taking into account the temperature dependence of thermophysical characteristics. **Methodology.** The mathematical model for studying the process of coating solidification on the body surface includes heat conduction equations for the solid crust and the base. Numerical integration of the modeling equations is carried out using the implicit difference method with front trapping at the grid node. **Findings.** A computer program has been developed that allows for numerical studies of the solidification processes of titanium and aluminum coatings on a steel base. The results of numerical modeling are presented. **Originality.** A nonlinear mathematical model has been developed to study the process of solidification of a thin coating on the surface of a body. The model is based on the numerical integration of heat conduction equations for the solid crust and the base and allows determining the change in temperature over time at different points of the «base – coating» system. **Practical value.** The developed mathematical model can be useful in studying the hardening of a coating sprayed onto a body surface, as well as in selecting the operating parameters of the plasma spraying process. It provides a scientific justification for the process parameters and operating modes of the equipment used. The model allows us to evaluate the dynamics of the formation of thermal fields in the hardening process of coatings.

Key words: plasma spraying; coating hardening; temperature field; phase transition front; mathematical model

REFERENCES

1. Hasiy, O. B., & Acberher, Y. L. (2001). To question of rising of metal- and wood-cutting instrument resistance by ion-plasma evaporation. *Naukovyy visnyk UkrDLTU, 11.4*, 135-139. (in Ukrainian)
2. Samborska, O. M., & Shelestovskyi, B. H. (2010). *Chyselni metody*. Ternopil, Ukraine: TNTU imeni Ivana Puliuia. Retrieved from https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/20814 (in Ukrainian)
3. Miroshkina, I. V., & Palahina, O. A. (Comp). (2017). *Chyselni metody.* Cherkasy, Ukraine: ChDTU (in Ukrainian)
4. Yaros, Y. O., Karpechenko, A. A., Bobrov, M. M., Kondratieva, A. A., Labartkava, A. V., & Savochkina, V. V. (2025). Deposition of plasma aluminum matrix composite coatings. *Collection of Scientific Publications NUS*, *2*(500), 66-72. DOI: https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).10 (in Ukrainian)
5. Fizi, Y., Mebdoula, Y., Lahmar, H., Djieraf, S., & Benbahouche, S. (2015). Adhesion of FeCrNiBSi-(W-Ti)C wire-arc deposited coatings onto carbon steel substrates determined by indentation measurements and modelling. *Surface and Coating Technology*, *268*, 310-316. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.004
6. Kopylov, V. (2016). Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *5*(5(83)), 49-57. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79586
7. Liu, M., Peng, Q., & Huang, Y. (2024). Influencing Factors and Process Optimization of Al/SiC Powder-cored Wires by Plasma Transferred Wire Arc Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, *33*, 2167-2183. DOI: https://doi.org/10.1007/ s11666-024-01823-2

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

8. Rahman, M., Profili, J., Stafford, L., & Moreau, C. (2024). Surface preparation of aluminium by atmospheric-pressure plasma jet for suspension plasma sprayed ceramic coatings. *Surface and Coating Technology*, *476*, 130-175. DOI: https://doi.org/10.1016/ j.surfcoat.2023.130175
9. Wang, Y., Sun, C., Sun, J., Zhao, W., Dong, L., Li L., & Meng, F. (2015). Erosion behaviour of arc sprayed FeTi/CrB MMC coating at elevated temperature. *Surface and Coating Technology*, *262*, 141-147. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.027
10. Zhao, L., Zhou, D., Xie, G., Peng, Y., Ciu, X., Wang, J., & Xiong, T. (2023). Unraveling the influence of Al particle size on microstructure and tribological properties of cold sprayed Al/B4C composite coatings. *Materialstoday Communications*, *34*, 105257. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105257

Надійшла до редколегії: 08.11.2025
Дата рецензування: 16.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352327
© В. В. Біляєва, О. І. Губін, Ю. В. Бразалук, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК 628.12:620.98-048.34

П. С. КІРІЧЕНКО[1], В. В. САВІН[2], В. А. КОЗАЧИНА[3*], П. Б. МАШИХІНА[4], В. В. КОЗАЧИНА[5]

[1]Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593
[2]Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (098) 424 87 84, ел. пошта savinvv@knu.edu.ua, ORCID 0009-0008-6013-7371
[3*]Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532
[4]Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204
[5]Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID 0000-0002-7433-7306

Оптимізація енергоспоживання насосного обладнання ВНС шляхом підбору сучасних насосів

Мета. Дослідження з визначення оптимального з технічного та економічного погляду варіанту заміни насосного обладнання на прикладі насосної станції другого підйому ВНС–45, що експлуатується у місті Кривий Ріг. **Методика.** Дослідження реалізовано у декілька етапів: аналіз фактичного режиму роботи станції, порівняння технічних характеристик альтернативних насосів, побудова графіків сумісної роботи насосів із системою, статистична обробка результатів і оцінка практичної цінності. Такий підхід дозволив забезпечити комплексність аналізу й достовірність висновків. У роботі застосовано методи гідравлічного розрахунку, графічного моделювання та аналізу паспортних характеристик насосів. Усі параметри аналізувались при середньодобовій витраті води 83,07 м^3/год. Результати дослідження показали, що найбільш ефективними є насоси Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.A.1100, які забезпечують зниження середньомісячного споживання електроенергії на понад 30 % порівняно з існуючим агрегатом типу Д320–50. **Результати.** Вирішені питання надмірного енергоспоживання об’єктами систем централізованого водопостачання. Значну частину витрат комунальних підприємств становить робота насосного обладнання, яке у більшості випадків є технічно застарілим і функціонує поза межами оптимального режиму роботи та є енергонеефективним. Отримані результати можуть стати основою для подальших досліджень у напрямку впровадження систем автоматичного керування на базі змінних швидкостей обертання насосів та алгоритмів оптимізації. **Наукова новизна.** Розроблений науково обґрунтований підхід до модернізації агрегатів насосного обладнання, яке у більшості випадків є технічно застарілим і функціонує поза межами своєї оптимальної робочої зони, з метою підвищення енергоефективності. **Практична значимість.** Практична цінність дослідження полягає в створенні універсальної інженерної моделі підбору насосного обладнання для міських водопровідних систем, що не потребує зміни гідравлічної схеми або впровадження складних алгоритмів керування. Модель може бути застосована на аналогічних об’єктах без додаткових капіталовкладень у інженерну (трубопровідну) інфраструктуру.

Ключові слова: насосна станція; енергоспоживання; підбір насосів; водопостачання; частотне регулювання

Вступ

За оцінками дослідників Magni et al. (2025) та Abe et al. (2019) [1, 8], до 5 % глобального електроспоживання припадає на системи водопостачання та водоочищення, значну частку якого формують саме насосні станції. Зростання вартості електроенергії, потреба у скороченні викидів парникових газів, а також виклики енергетичної безпеки стимулюють впровадження енергоефективних рішень у цій сфері. Сучасні наукові підходи акцентують увагу на

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355081
© П. С. Кіріченко, В. В. Савін, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Козачина, 2026

взаємозв’язку між управлінням подачею води, витратами енергії та характеристиками насосного обладнання. Зокрема, у дослідженнях Sharif et al. (2019) [12] та Yifan Xie et al. (2024) [14] зазначається, що оптимізація гідравлічного режиму насосних систем є одним із найефективніших способів зменшення енергоспоживання в міських водорозподільчих мережах. Це включає як модернізацію самих насосів, так і адаптацію режимів їх роботи відповідно до реальних умов споживання.

Емпіричні дослідження показують помітний ефект від застосування насосів зі змінною частотою обертання. Автори дослідження Salmasi et al. (2022) [11] і Duan et al. (2025) [2] продемонстрували, що дистанційне регулювання швидкості через частотні перетворювачі дозволяє підтримувати оптимальний робочий режим у широкому діапазоні витрат і досягати істотної економії енергії. Паралельно De Tarso (2021) [9] провів польові експерименти із застосуванням насосів зі змінною частотою обертання у системах водопостачання з надлишковою проектною продуктивністю та підтвердили можливість досягнення до 50 % економії енергії при роботі насосного обладнання в нижньому діапазоні частот.

Автори Hajgató et al. (2020) [3], Hu S. et al. (2023) [5] та Joo Jin-Gul et al. (2024) [6] досліджують застосування методів «deep reinforcement learning» (глибокого навчання з підкріпленням), які дають змогу реалізувати гнучке управління роботою насосного обладнання, забезпечуючи адаптивне реагування на зміну рівня водоспоживання, одночасно контролюючи енергоспоживання та підтримуючи оптимальний рівень води в резервуарах. Сучасні підходи інтеграції алгоритмів глибокого навчання обіцяють нові результати. В дослідженні Ma Haixiang et al. (2024) [7] автори застосували «multi-agent deep reinforcement learning» для оптимізації графіків роботи насосів із врахуванням фізичних моделей гідравлічної системи та досягли економії 13,4 % у міській станції водопостачання.

В Україні питання енергоефективності систем водопостачання також набуло актуальності, хоча локальні публікації з цієї теми значно програють за кількістю міжнародним дослідженням. Тим не менш, зарубіжні дослідження (особливо із застосуванням глибокого навчання та адаптивного керування) демонструють реальні шляхи зниження витрат енергії насосних станцій на 10–50 %.

Мета

Дослідження з визначення оптимального з технічного та економічного погляду варіанту заміни насосного обладнання на прикладі насосної станції другого підйому ВНС–45, що експлуатується у місті Кривий Ріг.

Методика

Дослідження присвячено техніко-економічному обґрунтуванню модернізації насосного обладнання на одній з міських водопровідно-насосних станцій другого підйому, яка експлуатується комунальним підприємством «Кривбасводоканал» у складі централізованої системи водопостачання м. Кривий Ріг. Об’єктом дослідження обрано насосну станцію, яка забезпечує транспортування очищеної питної води до житлового фонду, соціальних об'єктів та промислових підприємств. У зв’язку з підвищеним енергоспоживанням існуючого насосного агрегату типу Д320–50, виникла необхідність техніко-економічного обґрунтування доцільності заміни обладнання.

Для оцінки функціонування системи водопостачання та визначення енергоефективності насосного обладнання на об’єкті ВНС–45 було застосовано комплексний підхід, який включав використання п’єзометричних графіків і аналіз сумісної роботи насосів з водопровідною мережею. У рамках дослідження виконано порівняльний аналіз технічних параметрів наявного насосного агрегату типу Д320–50 та низки сучасних проектованих насосів, серед яких: 100PJM200, Calpeda NMS4 100/400 B, Grundfos NB 65–200/198, MVAe.65–200.A.1100 і Grundfos TP 65–720/2.

Для кожного з досліджуваних насосних агрегатів було проаналізовано такі експлуатаційні характеристики: максимальна та середня витрата води (Q), максимальний та середній створюваний напір (H), відповідне споживання електроенергії (P), а також коефіцієнт корисної дії (η) при типовому робочому навантаженні.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355081
© П. С. Кіріченко, В. В. Савін, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Козачина, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Енергетична ефективність визначалась на основі порівняння середньомісячного споживання електроенергії кожним насосом за умови сталого середнього водоспоживання, яке становить $Q_{сер}$ = 83,07 м^3/год. Розрахунки виконувались із використанням базових рівнянь гідравліки, а також із залученням паспортних характеристик насосного обладнання, наданих виробниками.

Дослідження реалізовувалося в кілька послідовних етапів, кожен з яких був спрямований на глибокий аналіз окремих аспектів енергоефективності роботи насосної станції. До основних етапів віднесено: аналіз фактичного режиму роботи ВНС–45, техніко-економічне порівняння проектованих насосних агрегатів, побудову графічних моделей ефективності та формування висновків щодо практичної доцільності модернізації обладнання.

Результати

Під час проведення першого етапу дослідження здійснено аналіз фактичного режиму роботи насосної станції, що передбачав вивчення добових графіків подачі води, оцінку рівня споживання електроенергії, а також визначення середніх та пікових параметрів навантаження на обладнання. Особливу увагу приділено зіставленню реальних обсягів подачі води із паспортними характеристиками наявного насосного агрегату.

Вихідні експлуатаційні дані насосної станції другого підйому (ВНС–45) свідчать про підвищене енергоспоживання протягом усього календарного року. Дані свідчать, що агрегат функціонує поза зоною оптимального енергетичного навантаження, що обумовлює зниження коефіцієнту корисної дії та перевитрати електроенергії. На основі даних про добове водоспоживання від ВНС–45 у літній період (рис. 1) було визначено добу з максимальним обсягом подачі, за якою побудовано графік погодинної витрати води (рис. 2). Отриманий графік добової нерівномірності навантаження на насосне обладнання є критично важливим фактором для обґрунтованого підбору насосів відповідно до реальних експлуатаційних умов.

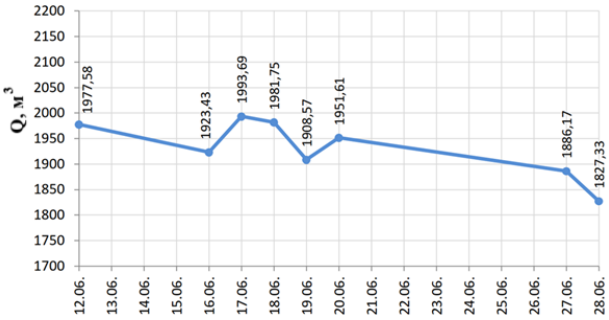


Рис. 1. Графік добового споживання води від ВНС–45 у літній період

Fig. 1. Daily water consumption schedule VNS–45 in the summer

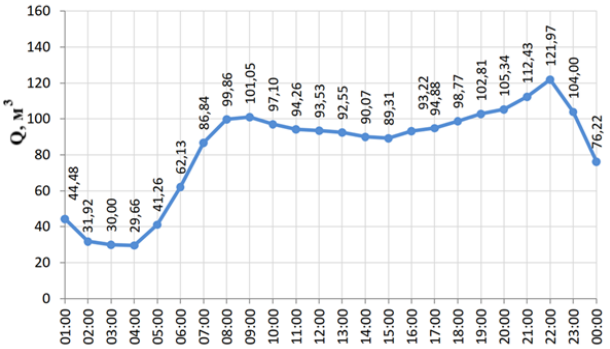


Рис. 2. Графік погодинної витрати води від ВНС–45

Fig. 2. Hourly water consumption schedule from VNS–45

Відповідно до графіків добового водоспоживання визначалась:

– середня витрата води за формулою, м^3/год:

$$Q_{сер} = \frac{V_{доб}}{T} = \frac{1993.69}{24} = 83.07, \qquad (1)$$

де $Q_{сер}$ – середня витрата води, м^3/год; $V_{доб}$ – об'єм води, поданої протягом визначеної доби, м^3; T – кількість годин у добі;

– максимальна витрата води за формулою, м^3/год:

$$Q_{макс} = Q_{рік\,макс} \cdot k_{рік\,макс} = 121.97 \cdot 1.1 = 134.16, \qquad (2)$$

де $Q_{год.макс}$ – максимальна годинна витрата, м^3/год (за рис. 1); $k_{рік.макс}$ – коефіцієнт годинної нерівномірності, $k_{рік.макс}$ = 1,1.

Фактична подача води та навантаження на насосний агрегат відбувається в умовах, що не відповідають оптимальній зоні роботи насосного обладнання типу Д320–50. Відповідно до

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355081
© П. С. Кіріченко, В. В. Савін, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Козачина, 2026

технічних характеристик, при середній подачі 83,07 м^3/год насос споживає близько 16,46 кВт·год, а його середній коефіцієнт корисної дії становить лише 52,31 %. Такі показники є недостатніми з точки зору енергоефективності, оскільки сучасні насосні агрегати аналогічної потужності за подібних умов експлуатації забезпечують коефіцієнт корисної дії понад 70 %. Рівень споживання електроенергії на одиницю поданої води є економічно недоцільним, а технічні характеристики наявного обладнання свідчать про його моральну та фізичну зношеність.

Таким чином, аналіз фактичного режиму функціонування насосної станції ВНС–45 слугує основою для переходу до техніко-економічного обґрунтування модернізації насосного обладнання з метою підвищення енергоефективності.

На другому етапі дослідження проведено порівняльну характеристику проектованих насосних агрегатів, яка полягала у техніко-економічному аналізі шести сучасних насосів, що потенційно можуть бути використані як альтернатива існуючому обладнанню типу Д320–50. Основною метою цього етапу було виявлення найефективнішого варіанту, здатного забезпечити необхідні гідравлічні характеристики за умови суттєвого зниження питомого енергоспоживання.

Для аналізу було відібрано шість насосних агрегатів від провідних виробників: 100PJM200, Calpeda NMS4 100/400 B, Grundfos NB 65–200/198, MVAe.65–200.A.1100, Grundfos TP 65–720/2, а також наявний насос Д320–50 як базовий варіант для порівняння. У межах техніко-економічного порівняння для кожного насосного агрегату було проаналізовано гідравлічні та енергетичні характеристики, зокрема: витрату води, створюваний напір, споживану електричну потужність, коефіцієнт корисної дії, а також очікувану економію електроенергії у разі впровадження відповідної моделі. Отримані дані лягли в основу подальшої візуалізації ефективності, статистичного аналізу достовірності результатів та формування практичних висновків щодо доцільності модернізації насосного обладнання (табл. 1). Основні параметри насосів оцінювались при середній витраті води $Q_{сер}$ = 83,07 м^3/год, а також на рівні максимальної витрати $Q_{макс}$ = 134,16 м^3/год.

Таблиця 1

Таблиця техніко-економічних показників роботи проектованих насосних агрегатів

Table 1

Table of technical and economic performance indicators for the designed pump units

Насосний агрегат	Напір, м	Потужність, кВт·год	ККД, %	Економія, кВт·год/міс
Д320–50 (існуючий)	38,04	16,46	52,31	–
100PJM200, 30 кВт	38,04	13,45	64,02	2 249
Calpeda NMS4 100/400 B, 30 кВт	38,04	13,86	62,13	1 743
Grundfos NB 65–200/198, 22 кВт	38,04	10,93	78,78	3 996
MVAe.65–200.A.1100, 22 кВт	38,04	11,42	75,40	3 576
Grundfos TP 65–720/2, 22 кВт	38,04	13,98	61,59	2 596

Отримані результати свідчать, що найбільш ефективними з огляду на енергозбереження є насосні агрегати Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.A.1100. Вони демонструють ККД на рівні 75 – 79 % та економію електроенергії понад 3 500 кВт·год/міс, що становить зниження енергоспоживання приблизно на 30 % у порівнянні з наявним обладнанням. Навіть у менш ефективних варіантах економія становить понад 2 000 кВт·год/міс, що також може мати позитивний вплив на загальний рівень операційних витрат підприємства, зокрема за рахунок зменшення витрат на електроенергію.

На третьому етапі дослідження було здійснено графічну інтерпретацію ефективності роботи насосного обладнання шляхом побудови характеристик сумісної роботи системи ВНС–45 з кожним із проектованих насосних

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355081
© П. С. Кіріченко, В. В. Савін, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Козачина, 2026

агрегатів. Аналіз отриманих графіків засвідчив, що фактичний режим функціонування наявного агрегату Д320–50 виходить за межі зони оптимального коефіцієнта корисної дії. Натомість нові проектовані моделі демонструють роботу, що наближена до їх номінальних характеристик за умови середньої витрати води $Q_{сер}$ = 83,07 м^3/год, що забезпечує більш стабільну подачу води й зменшення енергетичних втрат.

Для наочного порівняння питомого електроспоживання було також побудовано стовпчикову діаграму (рис. 3), яка чітко демонструє зниження навантаження на електромережу при впровадженні насосів типу Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.A.1100.

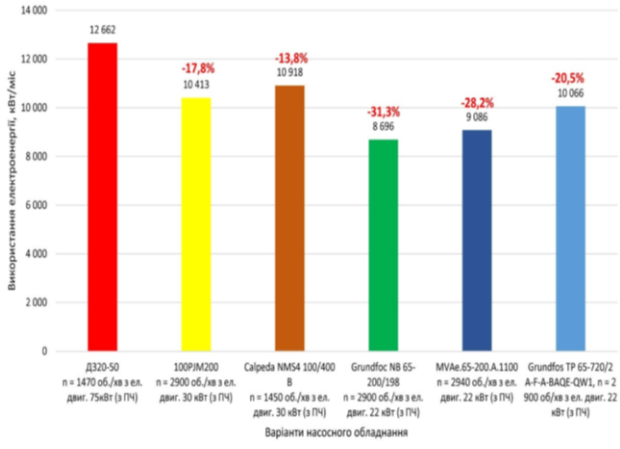


Рис. 3. Загальне використання електричної енергії насосними агрегатами

Fig. 3. Total use of electrical energy by pumping units

Графічне представлення результатів підтверджує техніко-економічну доцільність заміни існуючого обладнання та дає змогу швидко і наочно оцінити енергетичні переваги кожного з розглянутих варіантів модернізації.

Результати дослідження мають істотне прикладне значення у контексті впровадження енергоефективних технічних рішень для об’єктів централізованого водопостачання, особливо в умовах нестабільного енергозабезпечення, обмежених ресурсів та загроз довготривалих аварій на енергетичних мережах. Проведене техніко-економічне порівняння сучасних насосних агрегатів із базовим насосом, що експлуатується на ВНС–45, дало змогу визначити реальні можливості зниження енергоспоживання без зміни гідравлічної схеми системи.

Запропоновані до впровадження моделі насосів Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.A.1100 дозволяють скоротити енергоспоживання на понад 30 % у порівнянні з наявним обладнанням. При щомісячній економії 3 500 – 4 000 кВт·год, річна економія електроенергії перевищує 45 000 кВт·год, що потенційно відповідає понад 200 000 грн знижених витрат для підприємства за актуальними тарифами.

Окрім безпосередньої фінансової вигоди, модернізація насосного обладнання сприяє зниженню навантаження на міські енергетичні мережі, зменшенню пускових струмів, стабілізації тиску в системі водопостачання та підвищенню надійності й адаптивності роботи станції у години пікового навантаження.

Отримані результати дослідження, а саме зниження енергоспоживання внаслідок заміни насосного агрегату, знаходять підтвердження у сучасній фаховій літературі. У дослідженні Salmasi et al. (2022) [11] автори оцінювали ефективність насосів зі змінною частотою обертання у зрошувальних системах. Вони показали, що середній ККД покращується на 18,7 %, а енергоспоживання зменшується до 57,6 % порівняно з насосами постійної частоти. При цьому економія в нашому випадку склала близько 30 %, що відповідає цим результатам, хоча масштаби застосування дещо відрізняються.

Теоретична можливість зниження енергоспоживання насосів до 70 % за умови динамічного управління напором була продемонстрована в роботі Hieninger et al. (2021) [4]. Втім, у практичних умовах досягнута економія становила не більше 35 %, що підтверджує реалістичність і обґрунтованість запропонованої нами методики.

З дослідження Truettner et al. (2022) [13] випливає, що впровадження насосів зі змінною швидкістю може дати як суттєву економію, так і нульовий ефект, залежно від гідравлічної конфігурації системи. У моделюванні 15 водопровідних систем лише частина з них забезпечила економічну доцільність впровадження частотного регулювання за критерієм витрат протягом усього життєвого циклу насосного обладнання. Натомість досліджувана нами система, яка є одно об’єктною зі стабільним та чітко визначеним режимом подачі води, належить до типу, де використання змінної частоти обер-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355081
© П. С. Кіріченко, В. В. Савін, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Козачина, 2026

тання забезпечує виражений ефект підвищення енергоефективності.

Автори Salama et al. (2024) [10] провели розрахунок очисної станції питної води та виконали порівняння режимів роботи насосного обладнання зі змінною та постійною частотою обертання. Хоча наше дослідження не передбачало впровадження частотного регулювання, а базувалося на повній заміні насосного агрегату з урахуванням паспортних характеристик, отримані результати з енергозбереження (понад 30 %) є співмірними з ефектом, досягнутим у Salama et al. (2024) [10] шляхом встановлення інверторного приводу.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблений науково обґрунтований підхід до модернізації агрегатів насосного обладнання, яке у більшості випадків є технічно застарілим і функціонує поза межами своєї оптимальної робочої зони, з метою підвищення енергоефективності.

Висновки

Розроблений комплекс чисельних моделей для рішення наступних задач:

Проведене техніко-економічне обґрунтування показало, що існуючий насосний агрегат типу Д320–50, який експлуатується на ВНС–45, характеризується високим рівнем споживання електроенергії при відносно низькому коефіцієнті корисної дії (ККД ≈ 52 %), що є неприйнятним в умовах обмежених енергетичних ресурсів і зростаючих тарифів. За результатами техніко-економічного порівняння шести проектованих насосних агрегатів встановлено, що найбільшу енергоефективність демонструють моделі Grundfos NB 65–200/198 та MVAe.65–200.A.1100. Їх впровадження дозволяє знизити середньомісячне споживання електроенергії до рівня 8 700 – 9 100 кВт, що забезпечує економію до 31 % без зміни гідравлічної схеми системи.

Ключовими технічними рішеннями, що дозволяють досягти енергоощадного ефекту, є: використання насосного обладнання з адаптованими гідравлічними характеристиками; впровадження перетворювачів частоти для забезпечення змінного режиму роботи; точний розрахунок необхідного напору відповідно до поверховості будівель та гідравлічних втрат у мережі.

Результати дослідження можуть бути використані комунальними підприємствами, енергоменеджерами, інженерними організаціями та експлуатаційними службами для обґрунтованого підбору насосного обладнання з урахуванням реального гідравлічного режиму, обсягів подачі, режимної змінності навантаження та вимог до енергоефективності. Отримана модель також може бути адаптована для попередньої оцінки доцільності впровадження частотного регулювання або комплексної модернізації на інших об’єктах систем водопостачання з аналогічними умовами експлуатації.

Перспективами подальших досліджень є розробка математичних моделей для автоматизованого підбору насосного обладнання з урахуванням режимної змінності споживання, впровадження алгоритмів адаптивного керування на базі машинного навчання, а також масштабування результатів на інші об’єкти систем водопостачання в регіонах із подібними експлуатаційними умовами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abe B. T., Shrivastava P., Moloi K. A review of energy consumption in water supply systems. *2019 IEEE AFRICON*. 2019. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/africon46755.2019.9133888 A
2. Duan B., Gao J., Cao H., Hu S. Energy-Efficient Management of Urban Water Distribution Networks Under Hydraulic Anomalies: A Review of Technologies and Challenges. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 11. Art. 2877. DOI: https://doi.org/10.3390/en18112877
3. Hajgató G., Paál G., Gyires-Tóth B. Deep Reinforcement Learning for Real-Time Optimization of Pumps in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2020. Vol. 146, Iss. 11. DOI: https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001287

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355081
© П. С. Кіріченко, В. В. Савін, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Козачина, 2026

4. Hieninger T., Goppelt-Schneider F., Schmidt-Vollus R., Schlücker E. Energy-saving potential for centrifugal pump storage operation using optimized control schemes. *Energy Efficiency*. 2021. Vol. 14, Iss. 2. P. 1–14. DOI: https://doi.org/10.1007/s12053-021-09932-5
5. Hu S., Gao J., Zhong D., Wu R., Liu L. Real-Time Scheduling of Pumps in Water Distribution Systems Based on Exploration-Enhanced Deep Reinforcement Learning. *Systems*. 2023. Vol. 11, Iss. 2. Art. 56. DOI: https://doi.org/10.3390/systems11020056
6. Joo J.-G., Jeong I.-S., Kang S.-H. Deep Reinforcement Learning for Multi-Objective Real-Time Pump Operation in Rainwater Pumping Stations. *Water*. 2024. Vol. 16, Iss. 23. Art. 3398. DOI: https://doi.org/10.3390/w16233398
7. Ma H., Wang X., Wang D. Pump Scheduling Optimization in Urban Water Supply Stations: A Physics-Informed Multiagent Deep Reinforcement Learning Approach. *International Journal of Energy Research*. 2024. DOI: https://doi.org/10.1155/2024/9557596
8. Magni M., Jones E. R., Bierkens M. F. P., van Vliet M. T. H. Global energy consumption of water treatment technologies. *Water Research*. 2025. Vol. 277. Art. 123245. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123245
9. Mendonça K. H., Gomes H. P., Villanueva J. M. M., Bezerra S. de T. M. Performance of oversized pumps controlled by variable frequency drives in water supply systems. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 2022. Vol. 16, No. 2. P. 186–192. DOI: https://doi.org/10.4090/juee.2022.v16n2.186-192
10. Salama M. A. E., El-Naggar N. M., Abu-Zaid S. Energy saving analysis for pump-motor set in water purification plant using variable speed drive. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 27728. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-75601-z
11. Salmasi F., Abraham J., Salmasi A. Evaluation of variable speed pumps in pressurized water distribution systems. *Applied Water Science*. 2022. Vol. 12, Iss. 3. Art. 51. DOI: https://doi.org/10.1007/s13201-022-01577-8
12. Sharif M. N., Haider H., Farahat A., Hewage K., Sadiq R. Water-energy nexus for water distribution systems: a literature review. *Environmental Reviews*. 2019. Vol. 27, No. 4. P. 519–544. DOI: https://doi.org/10.1139/er-2018-0106
13. Truettner C. B., Barkdoll B. D. Economic feasibility analysis of variable-speed pumps by simulating 15 multiple water distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2022. Vol. 71, Iss. 5. P. 664–670. DOI: https://doi.org/10.2166/aqua.2022.032
14. Xie Y., Wu Y., Jin Y., Li Y., Zhao B., Li X., Ba Z., Liu S. Energy-efficient and reliable coordinated scheduling for water distribution systems: enhancing hydraulic conditions and water quality. *AQUA–Water Infrastructure, Ecosystems and Society*. 2024. Vol. 73, Iss. 11. P. 2229–2241. DOI: https://doi.org/10.2166/aqua.2024.365

P. S. KIRICHENKO[1], V. V. SAVIN[2], V. A. KOZACHYNA[3*], P. B. MASHYKHINA[4], V. V. KOZACHYNA[5]

[1]Dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593
[2]Dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (098) 424 87 84, e-mail savinvv@knu.edu.ua, ORCID 0009-0008-6013-7371
[3*]Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532
[4]Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204
[5]Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID 0000-0002-7433-7306

Optimization of Energy Consumption of Pumping Equipment of the WPS by Selecting Modern Pumps

Purpose. Research to determine the optimal, from a technical and economic point of view, option for replacing pumping equipment using the example of the second-lift pumping station VNS–45, operated in the city of Kryvyi Rih. **Methodology.** The study was implemented in several stages: analysis of the actual operating mode of the station, comparison of technical characteristics of alternative pumps, construction of graphs of the combined operation

Creative Commons Attribution 4.0 International
© П. С. Кіріченко, В. В. Савін, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Козачина, 2026
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355081

of pumps with the system, statistical processing of results and assessment of practical value. This approach allowed to ensure the complexity of the analysis and reliability of the conclusions. The work used methods of hydraulic calculation, graphic modeling and analysis of the passport characteristics of pumps. All parameters were analyzed at an average daily water flow of 83.07 m^3/h. The results of the study showed that the most effective are the Grundfos NB 65–200/198 and MVAe.65–200 A.1100 pumps, which provide a reduction in average monthly electricity consumption by more than 30% compared to the existing unit of the D320–50 type. **Findings.** The issues of excessive energy consumption by centralized water supply system facilities have been resolved. A significant part of the costs of utility companies is the operation of pumping equipment, which in most cases is technically outdated and operates outside the optimal operating mode and is energy inefficient. The results obtained can become the basis for further research in the direction of implementing automatic control systems based on variable pump rotation speeds and optimization algorithms. **Originality.** A scientifically based approach has been developed to modernize pumping equipment units, which in most cases are technically outdated and operate outside their optimal operating range, in order to increase energy efficiency. **Practical value.** The practical value of the research lies in the creation of a universal engineering model for the selection of pumping equipment for urban water supply systems, which does not require changing the hydraulic scheme or implementing complex control algorithms. The model can be applied to similar facilities without additional capital investments in engineering (pipeline) infrastructure.

Key words: pumping station; energy consumption; pump selection; water supply; frequency control

REFERENCES

1. Abe, B. T., Shrivastava, P., & Moloi, K. (2019). A review of energy consumption in water supply systems. *2019 IEEE AFRICON*, 1-4. DOI: https://doi.org/10.1109/africon46755.2019.9133888 (in English)
2. Duan B., Gao, J., Cao, H., & Hu, S. (2025). Energy-Efficient Management of Urban Water Distribution Networks Under Hydraulic Anomalies: A Review of Technologies and Challenges. *Energies, 18*(11), 2877. DOI: https://doi.org/10.3390/en18112877 (in English)
3. Hajgató, G., Paál, G., & Gyires-Tóth, B. (2020). Deep Reinforcement Learning for Real-Time Optimization of Pumps in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management, 146*(11). DOI: https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001287 (in English)
4. Hieninger, T., Goppelt-Schneider, F., Schmidt-Vollus, R., & Schlücker, E. (2021). Energy-saving potential for centrifugal pump storage operation using optimized control schemes. *Energy Efficiency, 14*(2), 1-14. DOI: https://doi.org/10.1007/s12053-021-09932-5 (in English)
5. Hu, S., Gao, J., Zhong, D., Wu, R., & Liu, L. (2023). Real-Time Scheduling of Pumps in Water Distribution Systems Based on Exploration-Enhanced Deep Reinforcement Learning. *Systems*, *11*(2), 56. DOI: https://doi.org/10.3390/systems11020056 (in English)
6. Joo, J.-G., Jeong, I.-S., & Kang, S.-H. (2024). Deep Reinforcement Learning for Multi-Objective Real-Time Pump Operation in Rainwater Pumping Stations. *Water, 16*(23), 3398. DOI: https://doi.org/10.3390/w16233398 (in English)
7. Ma, H., Wang, X., & Wang, D. (2024). Pump Scheduling Optimization in Urban Water Supply Stations: A Physics-Informed Multiagent Deep Reinforcement Learning Approach. *International Journal of Energy Research*. DOI: https://doi.org/10.1155/2024/9557596 (in English)
8. Magni, M., Jones, E. R., Bierkens, M. F. P., & van Vliet, M. T. H. (2025). Global energy consumption of water treatment technologies. *Water Research, 277*, 123245. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123245 (in English)
9. Mendonça, K. H., Gomes, H. P., Villanueva, J. M. M., & Bezerra, S. de T. M. (2022). Performance of oversized pumps controlled by variable frequency drives in water supply systems. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, *16*(2), 186-192. DOI: https://doi.org/10.4090/juee.2022.v16n2.186-192 (in English)
10. Salama, M. A. E., El-Naggar, N. M., & Abu-Zaid, S. (2024). Energy saving analysis for pump-motor set in water purification plant using variable speed drive. *Scientific Reports, 14*, 27728. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-75601-z (in English)
11. Salmasi, F., Abraham, J., & Salmasi, A. (2022). Evaluation of variable speed pumps in pressurized water distribution systems. *Applied Water Science, 12*(3). 51. DOI: https://doi.org/10.1007/s13201-022-01577-8 (in English)
12. Sharif, M. N., Haider, H., Farahat, A., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019). Water-energy nexus for water distribution systems: a literature review. *Environmental Reviews, 27*(4), 519-544. DOI: https://doi.org/10.1139/er-2018-0106 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355081
© П. С. Кіріченко, В. В. Савін, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Козачина, 2026

13. Truettner, C. B., & Barkdoll, B. D. (2022). Economic feasibility analysis of variable-speed pumps by simulating 15 multiple water distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 71*(5), 664-670. DOI: https://doi.org/10.2166/aqua.2022.032 (in English)
14. Xie, Y., Wu, Y., Jin, Y., Li, Y., Zhao, B., Li, X., Ba, Z., & Liu, S. (2024). Energy-efficient and reliable coordinated scheduling for water distribution systems: enhancing hydraulic conditions and water quality. *AQUA–Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 73*(11), 2229-2241. DOI: https://doi.org/10.2166/aqua.2024.365 (in English)

Дата надходження рукопису: 10.12.2025
Дата прийняття до публікації: 05.01.2026
Дата публікації: 28.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355081
© П. С. Кіріченко, В. В. Савін, В. А. Козачина, П. Б. Машихіна, В. В. Козачина, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТ

УДК 629.463.65:620.19-047.44

І. Е. МАРТИНОВ[1*], А. В. ТРУФАНОВА[2*], В. О. ШОВКУН[3*], М. В. ДМИТРЕНКО[4*], О. О. БАЛАШОВ[5*]

[1*]Каф. «Інженерії вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (050) 300 31 60, ел. пошта martinov.hiit@gmail.com, ORCID 0000-0002-0481-3514
[2*]Каф. «Інженерії вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (050) 300 31 60, ел. пошта trufanova@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1702-1054
[3*]Каф. «Інженерії вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (067) 399 68 81, ел. пошта vadimshovkun62@gmail.com, ORCID 0000-0003-1826-6053
[4*]Каф. «Інженерії вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта lemtr21@gmail.com, ORCID 0009-0000-2712-2495
[5*]Каф. «Інженерії вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, май. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (067) 399 68 81, ел. пошта balashov@kart.edu.ua, ORCID 0009-0007-6155-601X

Аналіз пошкоджень кузовів залізничних напіввагонів

Мета. Проведення порівняльного аналізу технічного стану кузовів універсальних та спеціалізованих напіввагонів (з глухим кузовом) державної та приватної власності. Визначення конструктивних елементів кузовів, які відмовляють найчастіше та створюють загрозу безпеці руху. **Методика.** Дослідження проведено з використанням статистичних даних про відмови універсальних напіввагонів власності АТ «Укрзалізниця» та приватних операторів на шляху прямування за період 2022–2024 рр. Для цього були використані дані надходження у планові види ремонту різних моделей напіввагонів з різним терміном експлуатації. Під час дослідження використовувалися класичні методи математичної статистики та відомий пакет прикладних програм Microsoft Excel. Проведений аналіз дозволив визначити, які моделі напіввагонів переважають у загальному парку вагонів та встановити, які основні елементи конструкції кузовів універсальних напіввагонів відмовляють найчастіше. **Результати**. Проведено статистичний аналіз відмов та пошкоджень кузовів як універсальних напіввагонів, так і спеціалізованих напіввагонів з глухим кузовом різних моделей з урахуванням терміну експлуатації. Отримані результати дали можливість виконати порівняння технічного стану кузовів універсальних напіввагонів різних моделей та виконати порівняння технічного стану універсальних напіввагонів та спеціалізованих напіввагонів з глухим кузовом. Встановлено, що серед пошкоджень універсальних напіввагонів найчастіше зустрічаються обриви зварного шва вертикальних стояків, пошкодження кришок розвантажувальних люків та їх запорів, тріщини та злами вертикальних листів поперечних балок рами. **Наукова новизна.** Вперше було проведено порівняльний аналіз пошкоджуваності різних моделей напіввагонів та визначена залежність кількості відмов від терміну експлуатації. **Практична значимість**. Отримані результати дають можливість визначити напрямки розробки нових технічних рішень для удосконалення кузовів напіввагонів. На підставі проведеного аналізу з урахуванням фактичного технічного стану напіввагонів та рівня їх пошкоджуваності в залежності від моделі та терміну експлуатації можливо формування удосконаленої стратегії відновлення працездатності напіввагонів шляхом оптимізації термінів проведення ремонтів та технічного обслуговування.

Ключові слова: напіввагон універсальний; кузов; напіввагон глухим кузовом; кришка люка; тріщина; злам; обрив по зварюванню; верхня обв’язка; хребтова балка; пошкодження обшивки

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355623
© І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Вступ

Основою транспортної системи України є залізничний транспорт. Якщо частка пасажирських перевезень залізницями (особливо на короткі відстані) з об'єктивних причин поступово зменшується, вантажні перевезення залишаються основним джерелом забезпечення промисловості матеріалами та сировиною. Саме залізниці в основному забезпечують вивіз продукції металургії та машинобудування. Також залізничний транспорт в основному забезпечує перевезення військової техніки.

Для стабільної роботи залізниць важливим фактором є технічний стан рухомого складу. Це стосується як локомотивів, так і вагонів. На жаль, парк вантажних вагонів значною мірою вже відпрацював свій вихідний ресурс. Тобто вагони застарілі фізично, термін експлуатації переважної більшості робочого парку неодноразово подовжувався. Відповідно через високий рівень спрацювання такі вагони мають недостатню надійність і відновлення їх працездатності працівниками вагонного господарства вимагає підвищених витрат матеріальних та трудових ресурсів.

Переважну більшість вантажних вагонів власності АТ «Укрзалізниця» та інших операторів ринку перевезень займають напіввагони (НПВ). Саме напіввагони експлуатуються найбільш інтенсивно та в дуже складних зовнішніх умовах: постійний вплив атмосферних опадів та інших чинників, пошкодження при використанні для завантаження та розвантаженні навантажувачів та грейферів. Відповідно, це вимагає додаткових витрат на відновлення їх працездатності.

Згідно прийнятої класифікації напіввагони поділяються на універсальні та спеціалізовані. До останніх відносяться напіввагони з глухим кузовом та вагони-окатишевози. Предметом обговорення у цій статті є саме напіввагони з глухим кузовом. Саме вони дуже інтенсивно експлуатуються у металургійній промисловості. Особливістю їх експлуатації є розвантаження на спеціальних вагоноопрокидувачах. Тому дуже актуальними є дослідження щодо визначення рівня технічного стану зазначених напіввагонів в залежності від моделі та терміну експлуатації.

Проблемам забезпечення підвищення працездатності та збереженості НПВ присвячена значна кількість досліджень. Оскільки для універсальних НПВ при перевезенні великих обсягів сипких та навалочних вантажів (вугілля, щебінь, будівельні матеріали) переважає грейферне розвантаження, у статті [1] розглянуто пошкодження універсальних НПВ, які виникають при розвантаженні грейферними ковшами. Автори приходять до висновку, що при такому способі розвантаженні найчастіше пошкоджуються кришки розвантажувальних люків, торцеві стіни та верхня обв'язка бокових стін.

Але особливо небезпечними є місця обпирання проміжних стояків бокової стіни на проміжні поперечні балки рами. Саме там найчастіше виникають обриви та залишкові прогини. Причинами є невиконання вимог діючих нормативних документів для використання засобів механізації [2, 3].

У статті [4] аналіз технічного стану суцільнометалевих напіввагонів. Наведено результати досліджень показників надійності для кузова напіввагона з подальшим аналізом відмов по вузлах та деталях, які потрібно вдосконалити під час проектування вагона нового покоління для максимальної адаптації їх до засобів механізації при вантажно-розвантажувальних роботах.

У дослідженні [5] виконано аналіз взаємодії кузова напіввагона зі стінок перекидача напіввагонів. Дослідники приходять до висновку, що результаті можуть статися деформації кузова (звуження), ушкодження зварних швів.

У статті [6] запропоновано процес виникнення відмов та несправностей напіввагонів (знос, корозія, втома металу, деформації) розглядати як результат дії зовнішніх впливів (взаємодія з навантажувально-розвантажувальними пристроями, додаткові навантаження, що виникають під час маневрової роботи як результат недотримання ПТЕ, вплив зовнішнього середовища) тощо. Всі зазначені чинники сприяють розвитку механічних, фізичних та хімічних процесів, в результаті яких відбувається механічне спрацювання, вм'ятини та тріщини, корозійний знос та ін. Зазначені процеси призводять до поступової втрати вихідних експлуатаційних характеристик та сприяють переходу вагона

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355623
© І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов, 2026

з одного стану в інший: від справного до несправного або граничного.

У статі [7] фахівцями ДП УкрНДІВ стверджується, що параметр потоку відмов кузовів напіввагонів зменшується та після 7–8 років експлуатації кожен напіввагон для відновлення працездатності 7–10 разів на рік надходить в поточний ремонт. Аналіз пошкоджень, що викликали відчеплення, свідчить, що мають кузова виходять з ладу через інтенсивні корозійні процеси. Останні, як правило, викликані впливом вантажу, що перевозиться, в умовах несприятливого зовнішнього середовища.

Автором статті [8] обґрунтована доцільність впровадження шестигранних порожніх профілів в для виготовлення вертикальних стояків бокових стін і горизонтальних поясів торцевих стін напіввагонів.

Основні показники міцності несучої конструкції напіввагона визначено в статтях [9, 10]. В статті проаналізовано основні причини дефектів у елементах вагона. Запропоновано заходи щодо поліпшення несучої конструкції напіввагона шляхом встановлення підсилюючих елементів в найбільш навантажені зони рами.

У дослідженні [11] визначено навантаження на основні типи вагонів за режимами експлуатації. Водночас автори не враховують температурні навантаження, які можуть діяти на несучі конструкції вагонів під час перевезення конкретних вантажів.

У публікації [13] наведено розглянуто конструктивні властивості інноваційних напіввагонів нового покоління. Автори приділяють особливу увагу удосконаленню кузовів напіввагонів, виготовлених вагонобудівним підприємствами України.

Удосконалення конструкції кузова піввагона запропоновано в [14]. У дослідженні [10] представлено нову оптимізовану конструкцію підлоги кузова напіввагона, спрямовану на зменшення механічного зносу та значне збільшення терміну служби без збільшення тари конструкції чи витрат на матеріали.

У публікації [15] висвітлено проблеми, пов'язані з проектуванням вантажних залізничних вагонів. Зокрема, проведено аналіз можливостей застосування полімерних матеріалів як конструкційного матеріалу кузовів вагонів.

Стаття [12] присвячена аналізу результатів використання методів параметричної оптимізації рами напіввагона. У цій роботі для структурної оптимізації шворневої балки використовується комбінований метод ортогонального експери-ментального проектування та алгоритм зворотного поширення генетичного алгоритму.

Мета

Метою статті є порівняльний аналіз технічного стану універсальних та спеціалізованих напіввагонів (з глухим кузовом) як державної власності (АТ Укрзалізниця), так і приватних перевізників з великою кількістю вагонів у власному парку.

Методика

Дослідження виконано з використанням даних про відмови напіввагонів на шляху прямування за період 2022–2024 рр. В ході дослідження необхідно вирішити такі завдання:

– визначити, які моделі НПВ переважають у загальному парку вагонів;

– встановити, які основні елементи конструкції кузовів універсальних НПВ відмовляють найчастіше;

– виконати порівняння технічного стану універсальних НПВ різних власників;

– виконати порівняння технічного стану універсальних НПВ та спеціалізованих НПВ з глухим кузовом.

В ході дослідження було виконано аналіз відмов та пошкоджень НПВ, які були виявлені під час виконання як планових видів ремонту (деповський та капітальний), так і тих дефектів, які потребували відновлення працездатності на пунктах технічного обслуговування.

Результати

Напіввагони призначені для перевезення навалочних і насипних вантажів (руда, вугілля, щебінь, пісок, металобрухт). НПВ в основному використовуються підприємствами важкої промисловості: гірничо-металургійний комплекс, вуглевидобувна промисловість, будівельна індустрія, енергетика, у меншій мірі машинобудування.

Експлуатація НПВ характеризується значними темпами спрацювання та виникнення по-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355623
© І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов, 2026

шкоджень. Напіввагони працюють у найважчих умовах: зазнають механічних ударів і абразивного стирання.

Переважну більшість вагонів вітчизняної побудови складають НПВ моделі 12–9745. Вони будувалися у різні роки на вагоноремонтних заводах АТ «Укрзалізниця» (Панютине, Попасна, Дарниця, Стрий). Також філія «Панютинський вагоноремонтний завод» свого часу виготовляв НПВ моделі 12–9911. У переліку вітчизняних НПВ також модель 12–9044 виробництва ООВ «Трансмаш».

Серед універсальних інноваційних НПВ власності АТ «Укрзалізниця» значну частку займають сучасні інноваційні НПВ моделей 12–7023, які виготовлені на АТ «Крюківський вагонобудівний завод» (КВБЗ). Це так звані «інноваційні» вагони з покращеними техніко-економічними характеристиками. Також цим виробником виготовлені НПВ моделей 12–757 та 12–783. Але термін експлуатації останніх наближається до 40 років, тобто вони вже фактично двічі вичерпали свій ресурс, їх термін служби подовжувався.

Крім того в Україні експлуатуються НПВ моделей 12–119, 12–132, 12–132–03, виготовлені ще за радянських часів на «Уралвагонзаводі». Вони мають ще більший термін експлуатації Але кількість дуже незначна. Тому вони були виключені з розгляду. Також з розгляду були виключені НПВ моделей 12–9766, 12–9780, 12–9837, 12–9818, 12–1293 та деякі інші моделі російських та білоруських виробників через їх незначну кількість.

Аналізуючи термін служби напіввагонів парку УЗ, необхідно зазначити, що парк вагонів старіє. Це впливає на його надійність, частоту надходження у позапланові види ремонту. З урахуванням вибуття вагонів з робочого парку внаслідок бойових дій, у найближчому майбутньому можна очікувати дефіциту НПВ.

Стосовно вагонного парку компанії «Лемтранс» необхідно зазначити, що її парк універсальних НПВ складається з моделей 12–753, 12–757 та 12–783 виробництва АТ «Крюківський вагонобудівний завод» (КВБЗ). Використовуються також моделі 12–1704–03 та 12–1704–04 побудови ВАТ «Маріупольский завод важкого машинобудування», модель 12–9046, яка свого часу виготовлялася на Стаханівському вагонобудівному заводі, модель 12–4106 виготовлення ПАТ «Дніпровагонмаш». В експлуатації також знаходяться ряд моделей виробництва СРСР (аналогічно як у парку АТ УЗ). Зрозуміло, що вони вичерпали свій ресурс. Але переважну більшість парку складають напіввагони моделі 12–9745.

Також в Україні компанією «Лемтранс» експлуатуються спеціалізовані НПВ (з глухим кузовом) моделей 12–1505 та 12–1592.

Розподіл НПВ за терміном експлуатації наведено на рис. 1–2.

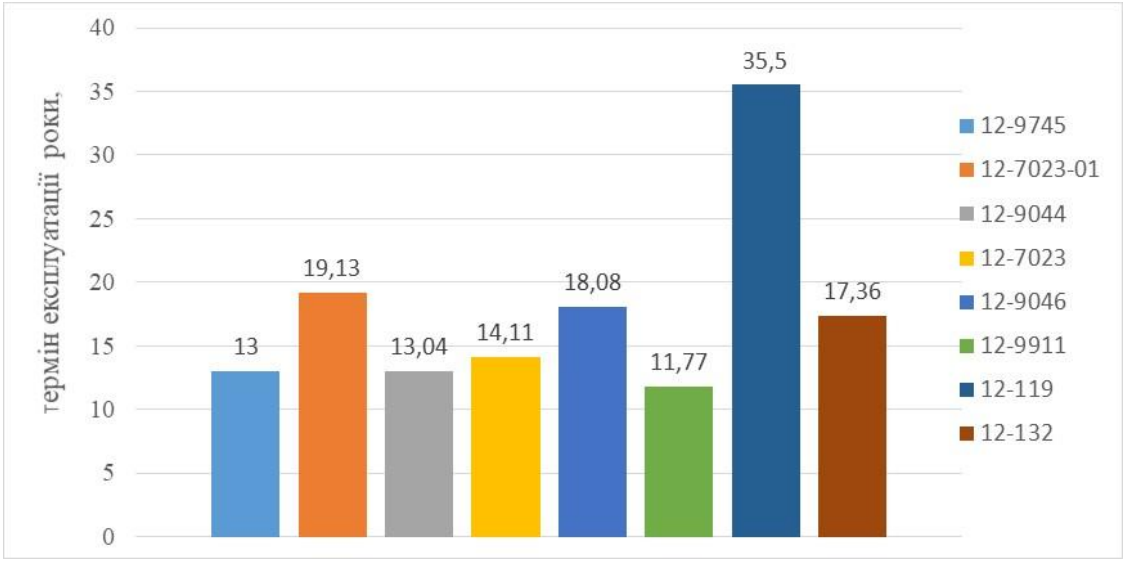


Рис. 1. Розподіл за терміном експлуатації універсальних напіввагонів власності АТ «Укрзалізниця»

Fig. 1. Distribution by service life of universal gondola cars owned by JSC «Ukrzaliznytsia»

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355623
© І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов, 2026

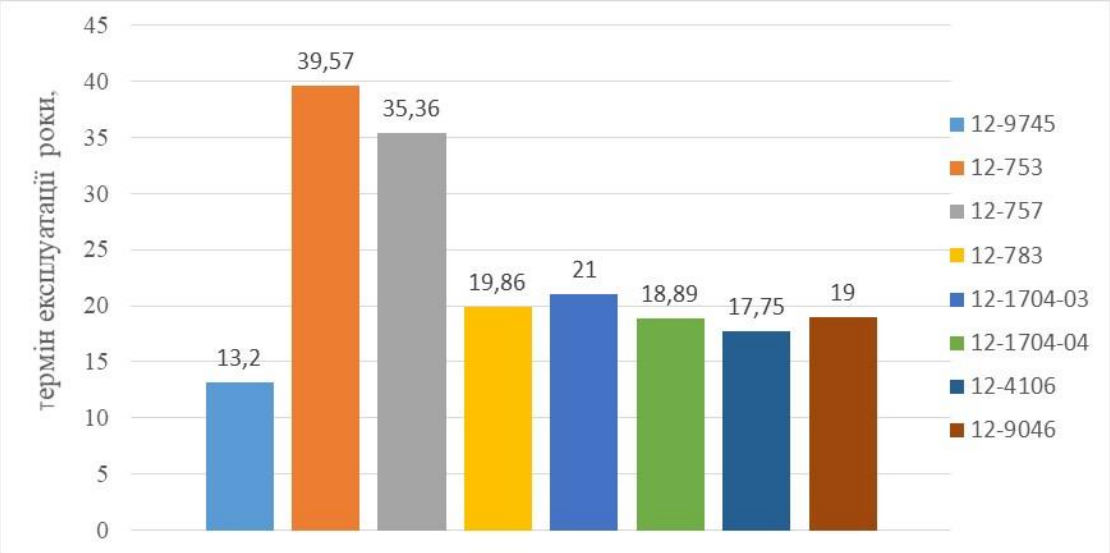


Рис. 2. Розподіл за терміном експлуатації універсальних напіввагонів власності команії «Лемтранс»

Fig. 2. Distribution by service life of universal gondola cars owned by «Lemtrans»

Аналізуючи наведені дані, необхідно зазначити, що на початку XXI сторіччя парк універсальних НПВ зазнав серйозних позитивних змін. НПВ з великим терміном експлуатації, які були побудовані ще за часів СРСР, у переважній більшості були виключені з робочого парку. Зараз парк НПВ власності АТ «Укрзалізниця» складається із сучасних моделей, в тому числі інноваційні НПВ 12–7023. Але, навіть якщо виключити з аналізу вагони моделі 12–119, середній термін експлуатації рухомого складу складатиме 15,2 роки. Очевидно, що найближчим часом знову виникне потреба у оновленні вагонного парку.

Картина розподілу за віком напіввагонів власності компанії «Лемтранс» має певні відмінності. У парку суттєво переважають вагони моделі 12–9745. Навіть якщо виключити НПВ моделе1 12–753, 12–757, середній термін експлуатації НПВ вже перевищує 18 років. Це викликає необхідність у додаткових витратах на підтримання рухомого складу у працездатному стані.

У таб. 1 наведено розподіл несправностей кузовів універсальних НПВ різних власників.

Таблиця 1

Розподіл несправностей кузовів універсальних напіввагонів

Table 1

Distribution of body defects in universal semi-wagons

Вид пошкодження	Кількість	
	УЗ, %	Лемтранс, %
Уширення або перекіс кузова більше 75 мм на один бік	0,02	0,05
Обрив зварного шва стояка	2,00	2,27
Обрив зварних швів розкосів	0,01	0,00
Пошкодження обв’язочних брусів	0,01	0,00
Пошкодження обшивки кузова	0,17	0,03

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355623
© І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов, 2026

Продовження табл. 1

Continuation of Table 1

Вид пошкодження	Кількість	
	УЗ, %	Лемтранс, %
Несправність запору дверей	0,00	0,00
Невідповідність зазорів між кришкою люка та кузовом	7,42	9,04
Ремонт кришки люка	9,32	6,03
Тріщини або знос кришки люка	0,99	2,13
Злам кришки люка	0,00	0,04
Відсутність кришки люка	0,02	0,00
Пошкодження кришки люка і петель	0,17	0,16
Несправність запору люка	36,54	19,67
Пошкодження (обрив) сходів / поручнів / підніжок	0,03	0,00
Тріщина/злам сходів, поручнів та підніжок	0,08	0,03
Тріщина/злам верхньої обв’язки напіввагону	0,00	0,00
Тріщина у вузлах сполучення хребтової та шворневої балок рами вагона	0,32	0,02
Послаблення кріплення п’ятника	0,01	0,00
Обрив по зварюванню, розрив накладок	1,52	1,87
Тріщина / злам верхнього / вертикального листа поперечної балки рами	29,55	56,25
Злам / тріщина / обрив розкосів	0,36	0,00
Корозійний знос елементі, що потребує заміни	0,36	0,48
Інше	11,09	1,94
Разом:	100	100

Аналіз отриманих результатів свідчить, що серед пошкоджень кузовів НПВ на першому місці знаходяться несправності запорів кришок розвантажувальних люків, далі знаходяться тріщини та злами верхніх та вертикальних листів поперечних балок рами. Також серйозну небезпеку представляють обриви зварних швів розкосів та розриви накладок.

Різниця між пошкодженнями НПВ власності АТ «Укрзалізниця» та компанії «Лемтранс» існує. В першу чергу це стосується таких пошкоджень, як несправність запору люка та тріщини та злами листів верхніх та вертикальних листів поперечних балок. Всі інше несправності фактично знаходяться в межах статистичної похибки.

У компанії «Лемтранс» знаходяться у власності незначна кількість спеціалізованих НПВ (з глухим кузовом без розвантажувальних люків) моделей 12–1505 та 12–1592. Проведений аналіз пошкоджуваності свідчить, що в цих вагонах переважають пошкодження рам та кузовів: тріщини у вузлах з’єднання хребтової та шкворневої балок, послаблення кріплення п’ятника, обриви по зварюванню, розриви накладок, тріщини та злами листів поперечних балок, тріщини кінцевих балок тощо. Тобто стосовно кузовів можна стверджувати, що їх відмови та пошкодження практично не відрізняються від аналогічних в універсальних НПВ.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355623
© І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов, 2026

Наукова новизна та практична значимість

Авторами вперше проаналізовано розподіл різних моделей напіввагонів різних власників терміном експлуатації. Також виконано порівняльний аналіз технічного стану кузовів універсальних напіввагонів різних власників. Отримані результати дають можливість визначити напрямки розробки нових технічних рішень для удосконалення кузовів напіввагонів.

Висновки

Проведено порівняльний аналіз основних пошкоджень кузовів універсальних напіввагонів різних власників. На підставі проведеного аналізу з урахуванням фактичного технічного стану напіввагонів та рівня їх пошкоджуваності в залежності від моделі та терміну експлуатації можливо формування удосконаленої стратегії відновлення працездатності напіввагонів шляхом оптимізації термінів проведення ремонтів та технічного обслуговування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Візняк Р. І., Чепурченко І. В., Луценко А. О. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. № 159. С. 91–97. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018
2. *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).* [Чинний від 2016-02-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 85 с.
3. *ДСТУ ГОСТ 24599–87. Грейферні кантовачі для навалочних вантажів. Загальні технічні умови*. 1989. 48 с.
4. Зарипов Р. Ю., Сулейменов А. Д., Каримова Ж. Р. Исследование надежности цельнометаллических полувагонов. *Наука и техника Казахстана*. 2021. № 4. С. 119–127. DOI: https://doi.org/10.48081/gqrv7549
5. Минеев С. П., Прусова А. А., Выгодин М. А., Минеев А. С. Основные технологические решения по эффективной разгрузке смерзшегося груза из железнодорожных полувагонов. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна*. 2012. № 40. С. 124–130.
6. Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. «Механіко-технологічні системи»*. 2015. № 52(1161). С. 127–130.
7. Федосов-Ніконов Д. В., Стринжа А. М., Шамшей Д. О., Полулях В. М., Федоров В. В., Шушмарченко В. О. Дослідження корозійних пошкоджень елементів вагонів під час технічного діагностування. *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. 2019. № 3(251). С. 181–184.
8. Фомін О. В. Аналіз доцільності застосування шестигранних порожнистих профілів як складових елементів несучих систем напіввагонів. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна*. 2014. № 6(54). С. 146–153. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2014/33403
9. Antipin D. Ya., Racin D. Y., Shorokhov S. G. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-Top Wagon Frame by Means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 150–154. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738
10. Baranovskyi D., Bulakh M., Bulakh M. Determining the service life of a gondola car with an increased floor body safety factor. *Reliability Engineering & System Safety*. 2026. Vol. 266. Art. 111670. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111670
11. Fomin O., Lovska A. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2, № 7(110). P. 6–14. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534
12. Liu W., Wang Y., Wang T. Box girder optimization by orthogonal experiment design and GA-BP algorithm in the gondola car body. *Processes*. 2021. Vol. 10, Iss. 1. Art. 74. DOI: https://doi.org/10.3390/pr10010074
13. Myamlin S. V., Kebal I. U., Kolesnykov S. R. Design review of gondola car. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*. 2014. № 6(54). С. 136–145. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2014/33773

Creative Commons Attribution 4.0 International
© І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов, 2026
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355623

14. Reidemeister A., Muradian L., Shaposhnyk V., Shykunov O., Kyryl'chuk O., Kalashnyk V. Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a «hat». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (Dnipro, 27-29 May, 2020). Vol. 985, Iss. 1. Art. 012034. Dnipro, 2020. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012034
15. Zaripov R., Gavrilovs P. Research opportunities to improve technical and economic performance of freight car through the introduction of lightweight materials in their construction. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 22–29. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.345

I. E. MARTYNOV[1*], A. V. TRUFANOVA[2*], V. N. SHOVKUN[3*], M. V. DMITRENKO[4*], O. O. BALASHOV[5*]

[1*]Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkov, Ukraine, 61050, тел. +38 (050) 300 31 60, e-mail martinov.hiit@gmail.com, ORCID 0000-0002-0481-3514
[2*]Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkov, Ukraine, 61050, тел. +38 (050) 300 31 60, e-mail trufanova@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1702-1054
[3*]Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkov, Ukraine, 61050,ттел. +38 (067) 399 68 81, e-mail vadimshovkun62@gmail.com, ORCID 0000-0003-1826-6053
[4*]Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkov, Ukraine, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, e-mail lemtr21@gmail.com, ORCID 0009-0000-2712-2495
[5*]Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkov, Ukraine, 61050, тел. +38 (067) 399 68 81, e-mail balashov@kart.edu.ua, ORCID 0009-0007-6155-601X

Analysis of Damage to Railway Gondola Bodies

Purpose. To conduct a comparative analysis of the technical condition of the bodies of universal and specialized gondolas (with a blind body) owned by state and private operators. To determine the structural elements of the bodies that fail most often and pose a threat to traffic safety. **Methodology**. The study was conducted using statistical data on failures of universal gondolas owned by JSC Ukrzaliznytsia and private operators during operation over the period 2022-2024. For this purpose, data on wagons of various models and different service lives entering scheduled types of maintenance and repair were analyzed. During the study, classical methods of mathematical statistics and the well-known Microsoft Excel application package were used. The analysis made it possible to determine which models of gondolas prevail in the general fleet of cars and to establish which main structural elements of universal gondolas bodies fail most often. **Findings**. A statistical analysis of failures and damage to the bodies of both universal gondolas and specialized gondolas with a solid body of different models was carried out, taking into account the service life. The results obtained made it possible to compare the technical condition of universal gondolas bodies of different models, as well as to compare the technical condition of universal gondolas and specialized gondolas with a solid body. It was established that the most common types of damage to universal open-top freight wagons include failures of welded joints of vertical posts, damage to the covers of unloading hatches and their locks, cracks and fractures of the vertical sheets of the transverse beams of the frame. **Originality**. For the first time, a comparative analysis of damage occurrence of different models of gondolas was carried out and the dependence of the number of failures on the service life was determined. **Practical value**. The results obtained make it possible to determine the directions of development of new technical solutions for improving gondola bodies. Based on the analysis conducted, taking into account the actual technical condition of the gondolas and the level of their damage depending on the model and service life, it is possible to form an improved strategy for restoring the operability of gondolas by optimizing the timing of repairs and maintenance.

Keywords: universal gondola; body; gondola with a solid body; hatch cover; crack; fracture; weld failure; upper side rail; center sill; side wall damage

REFERENCES

1. Vizniak, R. I., Chepurchenko, I. V., & Lutsenko, A. O. (2016). Features of identifying operational loads the body of open-top car and ways of improving its design to ensure durability and preservation. *Collection of Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport, 159*, 91-97. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018 (in Ukrainian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355623
© І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов, 2026

2. *Vahony vantazhni mahistralnykh zaliznychnykh dorih kolii 1520 mm. Zahalni vymohy shchodo zabezpechennia zberezhennia pid chas zavantazhuvalno-rozvantazhuvalnykh ta manevro-vykh robit (HOST 22235–2010, IDT), 85 DSTU HOST 22235:2015*. (2016). (in Ukrainian)
3. *Hreiferni kantovachi dlia navalochnykh vantazhiv. Zahalni tekhnichni umovy, 48 DSTU HOST 24599–87*. (1989). (in Ukrainian)
4. Zaripov, R. Yu., Suleimenov, A. D., & Karimova, Zh. R. (2021). Investigation of the reliability of all-metal gondola cars. *Science and Technology of Kazakhsta, 4,* 119-127. DOI: https://doi.org/10.48081/gqrv7549 (in Russian)
5. Mineyev, S. P., Prusova, A. A., Vygodin, M. A., & Mineyev, A. S. (2012). Major technological solutions for efficient unloading the frozen cargo from railway gondola cars. *Vísn. Dnípropetr. nats. un-tu zalízn. tr-tu. ím. akad. V. Lazaryana, 40*, 124-130. (in Russian)
6. Muradyan, L. A. (2015). Vidmovy ta bezvidmovnist′ vahoniv yak skladovi ekspluatatsiynoyi nadiynosti. *Visnyk NTU «KHPI». Ser. Mekhaniko-tekhnolohichni systemy ta kompleksy, 52*(1161), 127-130. (in Ukrainian)
7. Fedosov-Nikonov, D. V., Strynzha, A. M., Shamshey, D. O., Polulyakh, V. M. Fedorov, V. V. & Shush-marchenko, V. O. (2019). Doslidzhennia koroziinykh poshkodzhen elementiv vahoniv pid chas tekhnich-noho diahnostuvannia. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 3*(251), 181-184. (in Ukrainian)
8. Fomin, O. V. (2014). Applicability analysis of hexahedral hollow profiles as component elements of supporting systems for gondola cars. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, *6*(54), 146-153. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2014/33403 (in Ukrainian)
9. Antipin, D. Ya., Racin, D. Y., & Shorokhov, S. G. (2016). Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-Top Wagon Frame by Means of Computer Simulation. *Procedia Engineering,* 150, 150-154. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738 (in English)
10. Baranovskyi, D., Bulakh, M., & Bulakh, M. (2026). Determining the service life of a gondola car with an increased floor body safety factor. *Reliability Engineering & System Safety*, *266*, 111670. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111670 (in English)
11. Fomin, O., & Lovska, A. (2021). Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2*(7(110), 6-14. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534 (in English)
12. Liu, W., Wang, Y., & Wang, T. (2021). Box girder optimization by orthogonal experiment design and GA-BP algorithm in the gondola car body. *Processes, 10*(1), 74. DOI: https://doi.org/10.3390/pr10010074 (in English)
13. Myamlin, S. V., Kebal, I. U., & Kolesnykov, S. R. (2014). Design review of gondola car. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 6*(54), 136-145. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2014/33773 (in English)
14. Reidemeister, A., Muradian, L., Shaposhnyk, V., Shykunov, O., Kyryl'chuk, O., & Kalashnyk, V. (2020, May). Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a «hat». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (Vol. 985(1), Art. 012034). Dnipro, Ukraine. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012034 (in English)
15. Zaripov, R, & Gavrilovs, P. (2017). Research opportunities to improve technical and economic performance of freight car through the introduction of lightweight materials in their construction. *Procedia Engineering, 187*, 22-29. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.345 (in English)

Дата надходження рукопису: 02.12.2025
Дата прийняття до публікації: 29.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
© І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов, 2026
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355623

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.423.067.4-047.58

А. М. АФАНАСОВ[1*], С. В. КОНЧАНІН[2*], Р. Д. ГОЛОВКО[3*]

[1*]Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта a.m.afanasov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4609-2361

[2*]Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта konchanin.stas@gmail.com, ORCID 0009-0009-7273-1893

[3*]Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта romanholovko99@gmail.com, ORCID 0009-0002-7917-6756

Моделювання процесу буксування колісної пари електровоза

Мета. Своєчасне виявлення та припинення буксування колісних пар електровозів завжди було однією з найбільш актуальних задач залізничного транспорту. Буксування колісних пар електровозів збільшує знос бандажів колісних пар та рейок, підвищує імовірність виходу з ладу тягових електродвигунів, створює аварійні ситуації в експлуатації. Метою даного наукового дослідження є визначення закономірностей розвитку процесу буксування колісної пари електровоза в різних умовах експлуатації шляхом імітаційного моделювання процесу буксування. **Методика.** Методологічною основою дослідження є загальні принципи системного аналізу, математичного аналізу, моделювання електромеханічних систем, теоретичної механіки та теорії електричної тяги. Комп'ютерне імітаційне моделювання процесу розвитку буксування колісної пари виконувалося за допомогою середовища «Simulink». **Результати.** В результаті наукового дослідження створено математичну модель процесу буксування колісної пари електровоза, в якій враховано тягову характеристику електроприводу, характеристику зчеплення, фізико-хімічний стан контакту колесо – рейка, моменти інерції складових тягового електроприводу та часові параметри процесу втрати зчіпних якостей. Отримано апроксимуючий вираз, якій з досить високою точністю описує характеристику зчеплення, яку представлено у вигляді залежності безрозмірного коефіцієнта зчеплення від відносного ковзання поверхні колеса по рейці. Створено імітаційну модель, яка дозволяє моделювати процес буксування колісної пари електровоза в різних умовах експлуатації. В результаті моделювання отримані характеристики трьох варіантів розвитку буксування для реальних параметрів тягового електроприводу та умов експлуатації. Визначені співвідношення, при яких тимчасова втрата зчіпних якостей електровоза приводить до розносного буксування. **Наукова новизна.** Запропоновано аналітичний вираз та визначені коефіцієнти апроксимації для залежності коефіцієнта зчеплення коліс з рейками від швидкості ковзання поверхонь коліс по рейках. Сформульовані умови, що визначають характер розвитку буксування колісної пари, які можуть бути використанні при розробці принципів автоматичного керування тяговим електроприводом з високою стійкістю проти буксування. **Практична значимість.** Створена модель дозволяє проводити теоретичні дослідження процесу розвитку буксування колісних пар електровозів в різних умовах експлуатації. Результати таких досліджень можуть бути використані для створення системи автоматичного керування тяговим електроприводом, яка забезпечує підвищення стійкості електровоза проти буксування.

Ключові слова: електровоз; тяговий електропривід; колісна пара; тягове зусилля; характеристика зчеплення; буксування; математичне моделювання

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Вступ

Однією з проблем забезпечення вантажних перевезень є проблема забезпечення високих тягово-зчіпних якостей електровозів. Ця проблема не є новою і з'явилася з зародженням залізничного транспорту. Своєчасне виявлення та припинення буксування колісних пар локомотивів завжди було одними з найбільш важливих задач локомотивобудування. Буксування колісних пар електровозів збільшує знос бандажів колісних пар та рейок, підвищує імовірність виходу з ладу тягових електродвигунів, створює аварійні ситуації в експлуатації [2, 3].

Створення протибуксувальних систем електровозів потребує проведення попередніх теоретичних досліджень процесу розвитку буксування в різних умовах взаємодії коліс з рейками. Більшість відомих теоретичних досліджень в галузі покращення тягово-зчіпних якостей електровозів спрямовані саме на покращення фізико-хімічних умов взаємодії коляс з рейкою [5, 8–10]. Але створення системи автоматичного керування тяговим електроприводом, що забезпечує стійкість проти буксування, потребує моделювання процесу розвитку буксування в різних умовах експлуатації електровоза [11–13, 15]. Розробка та використання такої моделі є своєчасною та актуальною задачею.

Мета

Метою даного дослідження є створення моделі процесу буксування колісної пари електровоза, яка в подальшому дозволить проводити теоретичні дослідження, спрямовані на вдосконалення протибуксувальних систем електровозів.

Методика

Процес буксування колісної пари починається при порушенні умови [14]:

$$F_{\text{кд}} \le F_{\text{зч}}^{*},$$

де $F_{\text{кд}}$ – дотична сила тяги тягового електродвигуна на ободі колеса; $F_{\text{зч}}^{*}$ – максимально можливе значення сили зчеплення колісної пари з рейкою.

За своєю природою сила зчеплення $F_{\text{зч}}$ являє собою силу тертя спокою за відсутності ковзання коліс по рейці і силу тертя ковзання при його наявності.

На рис. 1 якісно наведена характеристика зчеплення, яка являє собою залежність сили зчеплення від швидкості ковзання колеса відносно рейки [5]:

$$F_{\text{зч}} = f\left(v_{\text{к}}\right), \tag{1}$$

де $v_{\text{к}}$ – швидкість ковзання.

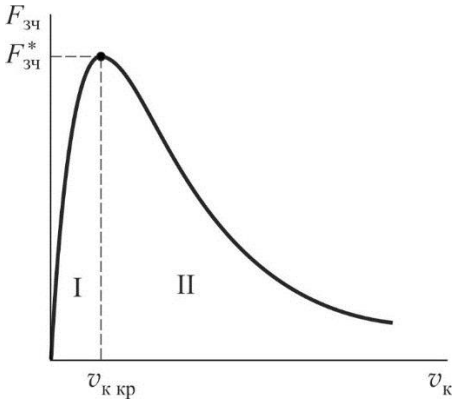


Рис. 1. Характеристика зчеплення

Fig. 1. Grip characteristics

Умовно дану характеристику можна розділити на дві зони, в яких принципово різні причинно-наслідкові зв'язки параметрів $F_{\text{зч}}$ і $v_{\text{к}}$. Перша зона (I) характеризується пружним ковзанням, викликаним пружною деформацією поверхонь колеса і рейки. Для цієї зони виконується умова [5, 6]:

$$F_{\text{зч}} = F_{\text{кд}}. \tag{2}$$

Поява в контакті колеса та рейки сили $F_{\text{кд}}$ викликає пружні деформації їх поверхонь і пружне ковзання, природа якого детально описана в ряді відомих наукових досліджень [10, 11]. У зоні I, яка відповідає діапазону швидкостей $v_{\text{к}}$ від нуля до критичної $v_{\text{к кр}}$, сила зчеплення $F_{\text{зч}}$ є реакцією на силу $F_{\text{кд}}$ і дорівнює їй. Цей діапазон швидкості ковзання $v_{\text{к}}$ називають зоною пружного ковзання або крипом.

При $v_{\text{к}} = v_{\text{к кр}}$ сила $F_{\text{зч}}$ досягає свого максимально можливого значення [5]:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

$$F_{зч}^{*} = \psi_{зч}^{*} \cdot P_{о},$$

де $\psi_{зч}^{*}$ – максимально можливе значення коефіцієнта зчеплення $\psi_{зч}$; $P_{о}$ – навантаження від колісної пари на рейку.

Оскільки в зоні I виконується умова (2), коефіцієнт $\psi_{зч}$ за своєю суттю являє собою коефіцієнт тяги $k_{т}$, рівний відношенню [6]:

$$k_{т} = \frac{F_{кд}}{P_{о}}.$$

При $v_{к} = v_{к\,кр}$ відбувається зрив зчеплення і починається буксування, яке характеризується чистим ковзанням.

Результати багатьох досліджень показують, що між зоною I пружного ковзання і зоною II чистого ковзання існує перехідна зона, в якій одночасно присутні і пружне, і чисте безпосереднє ковзання [9]. Але для спрощення моделі боксування будемо розглядати тільки дві зони, описані вище.

При швидкостях ковзання $v_{к}$, більших ніж значення $v_{к\,кр}$, сила $F_{зч}$ являє собою силу тертя ковзання, яка не залежить від сили тяги $F_{кд}$, а є функцією швидкості ковзання $v_{к}$ [5]. Тобто в зоні II сила $F_{зч}$ є наслідком чистого ковзання колеса по поверхні рейки.

Розглянемо динамічні процеси, які протікають в тяговому електроприводі електровозу при порушенні умов зчеплення колісної пари з рейкою. При створенні математичної моделі будемо розглядати одну колісну пару електровоза, яка обертається тяговим електродвигуном з відомою тяговою характеристикою.

Результати

У загальному вигляді сила зчеплення може бути представлена у вигляді [5, 12]:

$$F_{зч} = \psi_{зч}^{*} \cdot k_{\psi} \cdot P_{о},$$

де k_{ψ} – безрозмірна величина, що залежить від відносної швидкості ковзання ε, яка визначається у вигляді:

$$\varepsilon = \frac{v_{к}}{v_{о}},$$

де $v_{о}$ – швидкість руху електровоза.

Швидкість ковзання може бути представлена у вигляді:

$$v_{к} = v - v_{о},$$

де v – окружна швидкість поверхні колеса.

Тоді відносне ковзання можна представити у вигляді:

$$\varepsilon = \frac{v - v_{о}}{v_{о}} = \frac{v}{v_{о}} - 1. \qquad (3)$$

Графік залежності $k_{\psi} = f(\varepsilon)$ кількісно представлений на рис. 2.

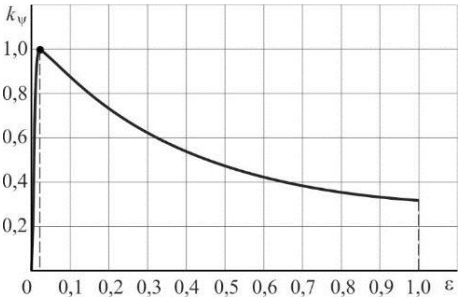


Рис. 2. Характеристика $k_{\psi} = f(\varepsilon)$

Fig. 2. Characteristics $k_{\psi} = f(\varepsilon)$

Графічна залежність $k_{\psi} = f(\varepsilon)$ в зоні II досить точно апроксимується виразом:

$$k_{\psi} = \frac{0,36}{\varepsilon + 0,361} + 0,055. \qquad (4)$$

В чисельному вигляді залежність (4) представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Залежність $k_{\psi} = f(\varepsilon)$ в зоні II

Table 1

Dependence $k_{\psi} = f(\varepsilon)$ in zone II

ε	0,02	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
k_{ψ}	1	0,88	0,74	0,6	0,54	0,46	0,43	0,38	0,36	0,34	0,32

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Коефіцієнти апроксимуючої залежності (4) отримані авторами дослідження з використанням методу найменших квадратів. При визначенні коефіцієнтів апроксимації збіг реальної залежності з апроксимуючою в точці ε = 0,02 було прийнято як обов'язкова умова:

$$k_{\psi}(0,02)=1.$$

Тобто за критичне значення відносного ковзання ε було прийнято:

$$\varepsilon_{кр}=0,02.$$

Спрощена кінематична схема тягового приводу наведена на рис. 3. Якір тягового електродвигуна (ТЕД) 1 створює момент $M_д$, який передається на колісну пару 2 через редуктор із зубчастими шестернями 3 і 4. $M_к$ – момент, прикладений до колісної пари, який може бути визначений у вигляді [5]:

$$M_к=\mu\cdot M_д-\Delta M,$$

де μ – передавальне відношення тягового редуктора; ΔM – втрати моменту в тяговій передачі.

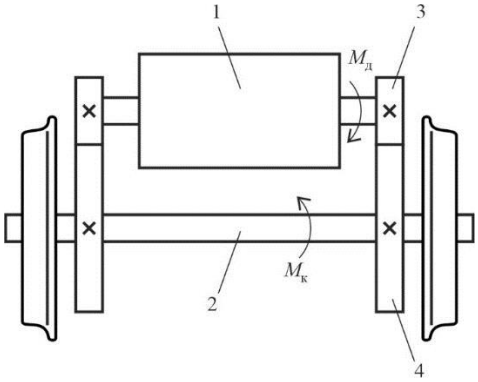


Рис. 3. Спрощена кінематична схема тягового приводу

Fig. 3. Simplified kinematic diagram of the traction drive

Розглянемо процес буксування колісної пари електровоза, який починається при $\varepsilon=\varepsilon_{кр}$ і розвивається в зоні II (рис.1) у вигляді чистого ковзання коліс по рейках. Якщо всі зв'язки в тяговій передачі вважати абсолютно жорсткими і знехтувати їх дисипативністю, процес буксування колісної пари може бути описаний рівнянням:

$$M_к-M_{зч}=J\frac{d\omega_{кп}}{dt},\qquad(5)$$

де $M_{зч}$ – момент зчеплення; J – наведений момент інерції тягового електроприводу; $\omega_{кп}$ – кутова швидкість обертання колісної пари.

Фізичні величини, що входять до виразу (5), можуть бути представлені у вигляді:

$$M_к=F_{кд}\cdot R_к;$$

$$M_{зч}=F_{зч}\cdot R_к;$$

$$\omega_{кп}=\frac{v}{R_к},$$

де $R_к$ – радіус колеса.

Тоді вираз (5) можна записати в більш зручному вигляді:

$$F_{кд}-F_{зч}=\frac{J}{R_к^2}\cdot\frac{dv}{dt}.\qquad(6)$$

При моделюванні процесу буксування будемо розглядати залежність $F_{кд}=f(v)$ у вигляді, представленому на рис. 4. Дана залежність відповідає тяговій характеристиці постійної потужності, яка формується системою автоматичного управління. Такі тягові характеристики притаманні більшості електровозів нового виробництва. Характеристика $F_{кд}=f(v)$ має дві зони регулювання [4]. У зоні I, при швидкостях v, менших розрахункового значення $v_р$, сила тяги підтримується постійною:

$$F_{кд}=F_р,$$

де $F_р$ – розрахункове значення сили тяги ТЕД.

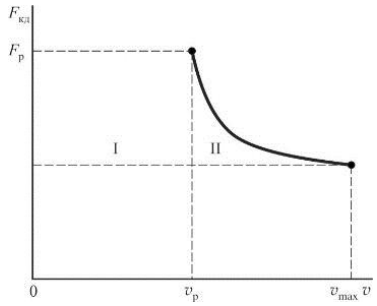


Рис. 4. Характеристика $F_{кд}=f(v)$

Fig. 4. Characteristics $F_{кд}=f(v)$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

У зоні II, при швидкостях руху $v \geq v_{\text{р}}$, постійно підтримується потужність ТЕД:

$$P_{\text{д}} = \text{const}.$$

У зоні II сила тяги і швидкість пов'язані між собою виразом [1, 4]:

$$F_{\text{кд}} = \frac{P_{\text{д}}}{v}. \qquad (7)$$

Об'єднавши формули (5–7), отримаємо математичний опис процесу буксування колісної пари у вигляді:

$$\begin{cases} F_{\text{р}} - \psi^{*}_{\text{зч}} \cdot k_{\psi} \cdot P_{\text{о}} = \dfrac{J}{R_{\text{к}}^2} \cdot \dfrac{dv}{dt} \quad \text{при } v < v_{\text{р}}; \\ \dfrac{P_{\text{д}}}{v} - \psi^{*}_{\text{зч}} \cdot k_{\psi} \cdot P_{\text{о}} = \dfrac{J}{R_{\text{к}}^2} \cdot \dfrac{dv}{dt} \quad \text{при } v \geq v_{\text{р}}. \end{cases} \qquad (8)$$

Наведений момент інерції тягового електроприводу може бути представлений як:

$$J = J_{\text{кп}} + \mu^2 J_{\text{я}}, \qquad (9)$$

де $J_{\text{кп}}$ і $J_{\text{я}}$ – моменти інерції колісної пари і якоря відповідно; μ – передавальне число тягового редуктора.

Необхідно відзначити, що максимально можливе значення коефіцієнта зчеплення $\psi^{*}_{\text{зч}}$ залежить від швидкості руху та фізико-хімічного стану поверхонь коліс і рейок.

Для сухих та чистих рейок [6]:

$$\psi^{*}_{\text{зч}} = 0,28 + \frac{3}{50 + 72v} - 0,00252v.$$

Для умов, несприятливих з точки зору можливості реалізації максимального коефіцієнта зчеплення, можна ввести поняття ступеня зниження максимально можливої сили зчеплення $k_{\text{зн}}$. За допомогою такого параметра в моделі можна імітувати потрапляння електровоза на ділянки колії із забрудненими або заледенілими рейками. Тоді для несприятливих умов зчеплення максимальний коефіцієнт зчеплення можна представити у вигляді:

$$\psi^{*}_{\text{зч}} = k_{\text{зн}} \left[0,28 + \frac{3}{50 + 72v} - 0,00252v \right]. \qquad (10)$$

Модель процесу буксування колісної пари електровоза була побудована в середовищі Simulink.

Імітаційна модель процесу буксування колісної пари електровоза наведена на рис. 5.

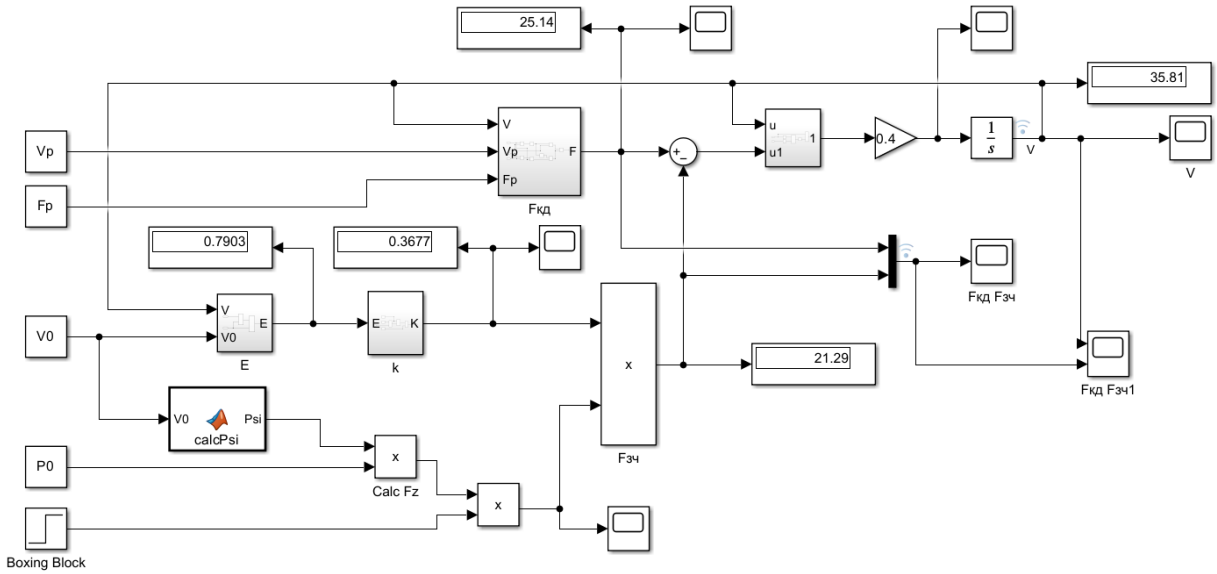


Рис. 5. Імітаційна модель процесу буксування колісної пари

Fig. 5. Simulation model of wheel pair slippage process

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Дана модель включає в себе блоки, позначені на схемі як ε, k_{ψ}, $F_{кд}$ та stop.

Модель блоку ε представлена на рис. 6. Вона забезпечує визначення відносного ковзання ε за заданим сталим значенням швидкості руху електровозу $v_{о}$ та змінюваним в часі значенням дотичної швидкості колісної пари v відповідно до формули (3).

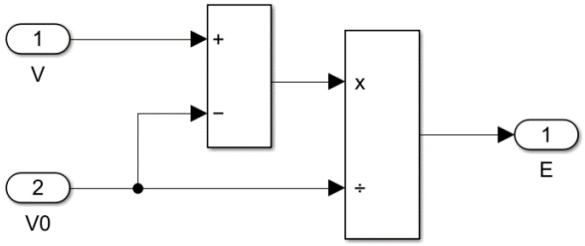


Рис. 6. Модель блоку ε

Fig. 6. Block model ε

Модель блоку k_{ψ} представлена на рис. 7. Вона забезпечує зв'язок параметрів k_{ψ} і ε відповідно до виразу (4).

Модель блоку $F_{кд}$ представлена на рис. 8. Вона забезпечує формування залежності $F_{кд} = f(v)$ відповідно рис. 4.

Блок Stop забезпечує моделювання припинення буксування за умови:

$$F_{кд} < F_{зч}.$$

Модель блоку Stop наведено на рис. 9.

Вихідними параметрами для моделювання є:

– швидкість руху електровоза $v_{о}$;

– розрахункове значення швидкості $v_{р}$;

– розрахункове значення сили тяги $F_{р}$;

– ступінь зниження коефіцієнта зчеплення $k_{зн}$;

– тривалість погіршення умов зчеплення $t_{п}$;

– наведений момент інерції тягового електроприводу J;

– радіус колеса електровоза $R_{к}$.

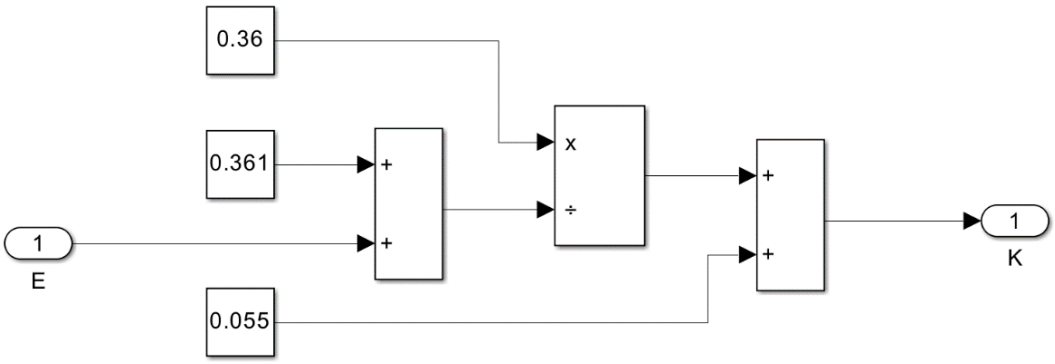


Рис. 7. Модель блоку k_{ψ}

Fig. 7. Block model k_{ψ}

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

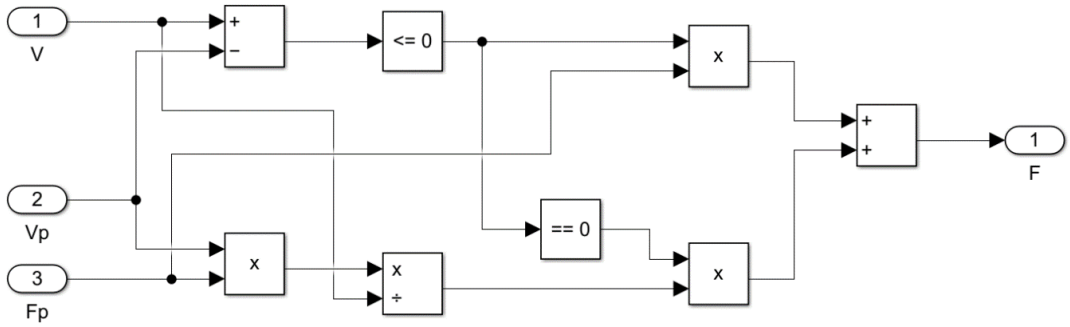


Рис. 8. Модель блоку $F_{кд}$

Fig. 8. Block model $F_{кд}$

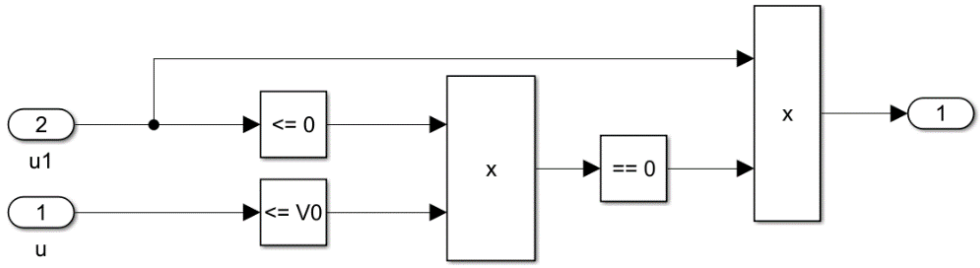


Рис. 9. Модель блоку Stop

Fig. 9. Block model Stop

Моделювання проводилося для різних значень $v_о$, $v_р$, $F_р$, $k_{зн}$. При цьому моменти інерції були прийняті [5]:

$$J_к = 500 \ \text{кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_я = 120 \ \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

Передавальне число редуктора прийнято:

$$\mu = 4.$$

Радіус колеса:

$$R_к = 0,6 \ \text{м}.$$

Наведений момент інерції тягового електроприводу відповідно до виразу (9) дорівнює:

$$J = 2420 \ \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

На рис. 10–12 наведено результати моделювання процесу буксування колісної пари електровоза при потраплянні на дільницю колії з несприятливими умовами зчеплення.

Всього розглянуто три варіанта процесу буксування. Вихідні дані моделювання процесу буксування наведені в табл. 2. Варіанти моделювання відрізняються значеннями тривалості погіршення умов зчеплення $t_п$ та ступеня зниження коефіцієнта зчеплення $k_{зн}$. Значення розрахункової сили тяги, навантаження на вісь, розрахункової швидкості та швидкості руху електровозу для трьох варіантів однакові.

Таблиця 2

Вихідні дані моделювання процесу буксування

Table 2

Initial data for modeling the skidding process

Параметр	$F_р$, кН	$v_р$, м/с	$v_о$, м/с	$P_о$, кН	tп, с	$k_{зн}$
Варіант1	45	20	20	250	2	0,7
Варіант2	45	20	20	250	2	0,6
Варіант3	45	20	20	250	3	0,7

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Результати моделювання наведені на рис. 10 – 12. Буксування починається в момент t = 0 внаслідок зменшення сили зчеплення зі ступенем $k_{зн}$ на час $t_п$. На рисунках 10 –12 крива на верхньому графіку представляє собою залежність дотичної швидкості коліс електровоза v від часу t, а дві криві на нижньому графіку – залежності від часу дотичної сили тяги $F_{кд}$ та сили зчеплення колісної пари з рейками $F_{зч}$.

На рис. 10 наведено результати моделювання за варіантом 1. При погіршенні умов зчеплення протягом 2 с, буксування колісної пари припиняється через 3 с після відновлення умов зчеплення. Максимальна дотична швидкість при буксуванні дорівнює 25,2 м/с. При відновленні умов зчеплення через $t_п$ = 2 с сила зчеплення стає більш, ніж сила тяги, саме це й приводить до припинення буксування.

На рис. 11 наведено результати моделювання за варіантом 2. Характеристики на рис. 11 відповідають режиму розносного буксування, при якому дотична швидкість колісної пари зростає некерована. При відновленні умов зчеплення через $t_п$ = 2 с сила зчеплення залишається меншою, ніж сила тяги, саме цьому буксування й не припиняється. При цьому варіанті ступінь зниження коефіцієнта зчеплення більш глибоке, ніж при варіанті 1. Дотична швидкість при відновленні умов зчеплення дорівнює 30 м/с, і навіть при відновленні умов зчеплення продовжує неконтрольовано збільшуватися.

На рис. 12 наведено результати моделювання за варіантом 3. Характеристики на рис. 12 також відповідають режиму розносного буксування. При відновленні умов зчеплення через $t_п$ = 3 с сила зчеплення також залишається меншою, ніж сила тяги. При цьому варіанті ступінь зниження коефіцієнта зчеплення таке ж саме, як й при варіанті 1, але за рахунок збільшення часу втрати умов зчеплення до $t_п$ = 3 с дотична швидкість колісної пари збільшується до значення 29,5 м/с. Навіть при відновленні умов зчеплення ця швидкість продовжує неконтрольовано збільшуватися через більш глибоке зменшення сили зчеплення в порівнянні з варіантом 1.

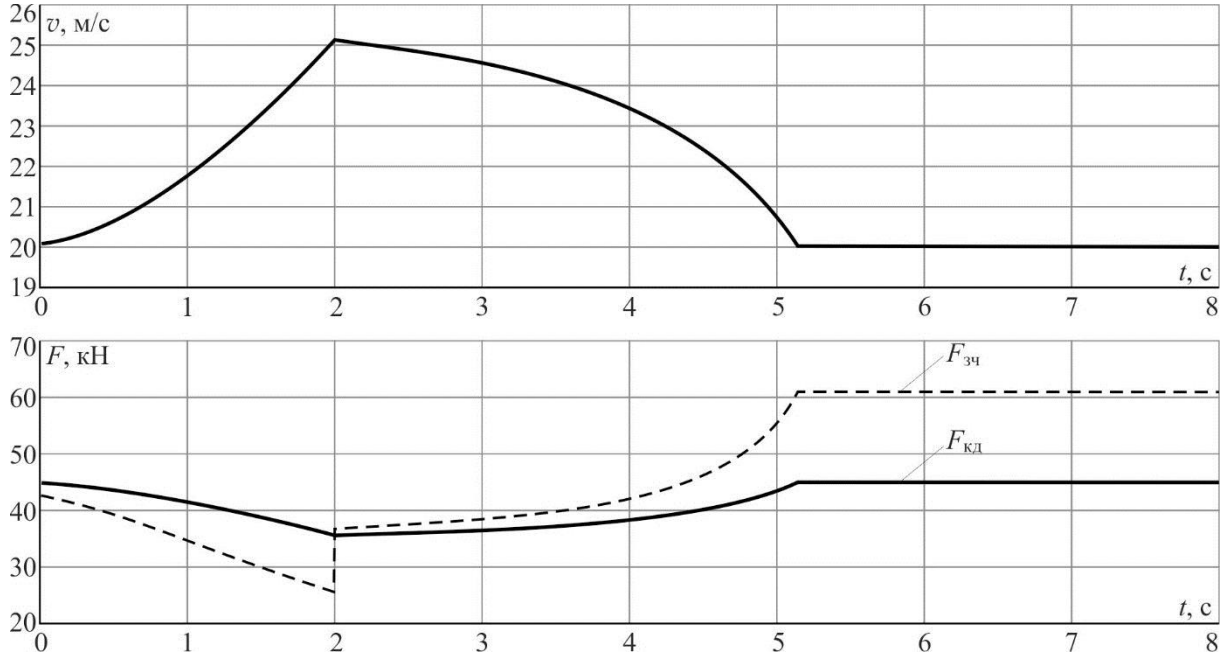


Рис. 10. Результати моделювання за варіантом 1

Fig. 10. Modeling results for option 1

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

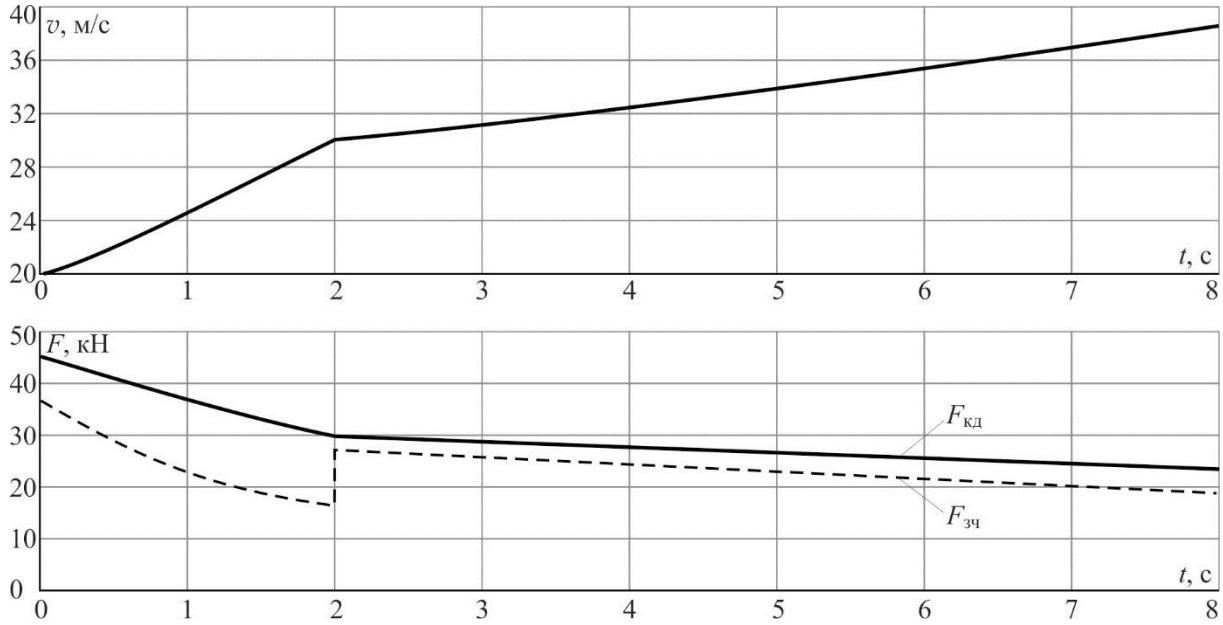


Рис. 11. Результати моделювання за варіантом 2

Fig. 11. Modeling results for option 2

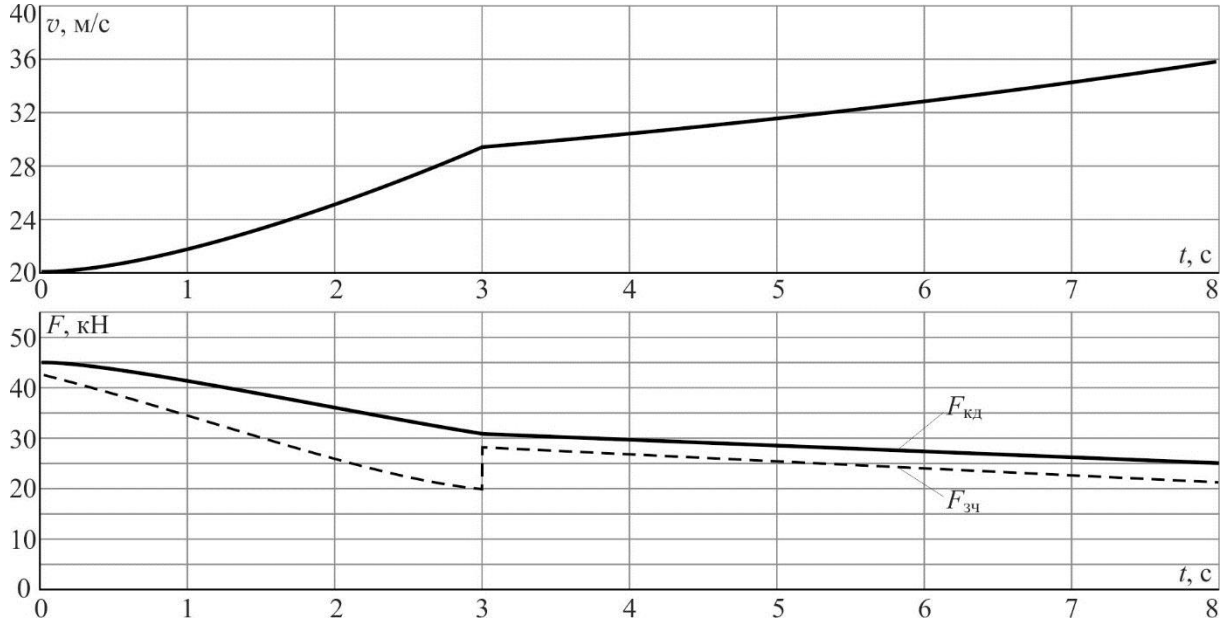


Рис. 12. Результати моделювання за варіантом 3

Fig. 12. Modeling results for option 3

Висновки

1. Апроксимація залежності коефіцієнта зчеплення від відносного ковзання в другій зоні характеристики зчеплення може бути апроксимована функцією гіперболи з відносною похибкою не більш 2 %.

2. Якісне дослідження процесу розвитку буксування колісної пари електровоза може бути виконано шляхом використання імітаційної моделі, розробленої авторами дослідження з використанням середовища Simulink.

3. При погіршенні умов зчеплення буксування колісної пари починається при умові, що

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

сила зчеплення колісної пари з рейкою стає менше, ніж сила тяги. Навіть тимчасове виникнення такої умови може привести до розносного буксування колісної пари.

4. Буксування колісної пари припиняється після відновлення коефіцієнта зчеплення при умові, що сила зчеплення колісної пари з рейкою при максимальній швидкості ковзання стає більш, ніж сила тяги.

5. Розносне буксування колісної пари спостерігається у випадку, коли при відновленні умов зчеплення сила зчеплення залишається меншою, ніж сила тяги.

6. Вірогідність розносного буксування визначається часом та глибиною втрати зчіпних якостей електровоза. При значному зменшенні коефіцієнта зчеплення або при тривалої втраті зчіпних якостей буксування не припиняється навіть після відновлення умов зчеплення коліс з рейками.

7. В найбільший мірі на протибуксувальні властивості електровоза впливає жорсткість його тягової характеристики. Тягова характеристика постійної потужності не забезпечує достатню стійкість проти буксування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Білухін Д. С., Шемет А. Я., Васильєв В. Є., Гололобова О. О., Маркуль Р. В. Використання глибокого послаблення збудження для тягових двигунів магістральних електровозів. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 6(96). С. 84–94. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/258106
2. Афанасов А. М., Голік С. М., Буряк С. Ю., Кравчуновський О. Г., Федоров Є. Ф., Гололобова О. О. Моделювання процесу зношування колісної пари локомотива та рейки під час буксування в кривій. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 1(101). С. 47–54. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2023/280012
3. Афанасов А. М., Голік С. М., Васильєв В. Є., Мунтян А. О. Моделювання фактора зношування гребенів колісних пар локомотивів з урахуванням умов зчеплення. *Теорія і практика металургії*. 2021. № 3(128). С. 21–25. DOI: https://doi.org/10.34185/tpm.3.2021.03
4. Афанасов А. М., Скачков А. О., Кончанін С. В. Моделювання електромеханічних характеристик тягових електричних двигунів рухомого складу. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. № 29. С. 32–37. DOI: https://doi.org/10.15802/tstt2025/325372
5. Гетьман Г. К. *Теорія електричної тяги* : підручник : у 2 т. Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2014. Т. 1. 578 с.
6. Гетьман Г. К. *Теорія електричної тяги* : підручник : у 2 т. Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2015. Т. 2. 492 с.
7. Berntorp K. Joint wheel-slip and vehicle-motion estimation based on inertial, GPS, and wheel-speed sensors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2016. Vol. 24, Iss. 3. P. 1020–1027. DOI: https://doi.org/10.1109/tcst.2015.2470636
8. Chang C., Chen B., Cai Y., Wang J. An experimental study of high speed wheel-rail adhesion characteristics in wet condition on full scale roller rig. *Wear*. 2019. Vol. 440–441. Art. 203092. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203092
9. He J., Liu G., Liu J., Zhang C., Cheng X. Identification of a nonlinear wheel/rail adhesion model for heavy-duty locomotives. *IEEE Access*. 2018. № 6. P. 50424–50432. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2018.2868177
10. Hubbard P., Harrison T., Ward C., Abduraxman B. Creep slope estimation for assessing adhesion in the wheel/rail contact. *IET Intelligent Transportation System*. 2024. Vol. 18, Iss. 10. P. 1931–1942. DOI: https://doi.org/10.1049/itr2.12561
11. Pichlik P. Locomotive wheel slip controller based on power dissipation in wheel-rail contact. *2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*. 2019. P. 211–216. DOI: https://doi.org/10.1109/edpe.2019.8883900
12. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. *Wear*. 2005. Vol. 258, Iss. 7–8. P. 992–1000. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.046
13. Van de Merwe C. V. *Model-based estimation and control of wheel slip in locomotives* : masters dissertation. Pretoria: University of Pretoria, 2023. 118 p. URL: http://hdl.handle.net/2263/103971
14. Van de Merwe C. V., Le Roux J. D. Estimation of locomotive adhesion coefficients and slip ratios. *2023 American Control Conference (ACC)* (San Diego, 31 May–2 June 2023). San Diego, 2023. P. 2252–2257. DOI: https://doi.org/10.23919/acc55779.2023.10155953

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

15. Zhao Y., Shen L., Jiang Z., Zhang B., Liu G., Shu Y., Peng B. Real-time wheel-rail friction coefficient estimation and its application. Vehicle *System. Dynamics*. 2023. Vol. 61, Iss. 10. P. 2598–2612. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2159846

A. M. AFANASOV [1*], S. V. KONCHANIN[2*], R. D. GOLOVKO[3*]

[1*]Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail a.m.afanasov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4609-2361
[2*]Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail konchanin.stas@gmail.com, ORCID 0009-0009-7273-1893
[3*]Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail romanholovko99@gmail.com, ORCID 0009-0002-7917-6756

Simulation of the Wheel Pair Slip Process in an Electric Locomotive

Purpose. Timely detection and prevention of wheel slip in electric locomotives has always been one of the most pressing issues in rail transport. Wheel slip in electric locomotives increases wear on wheel tyres and rails, increases the likelihood of traction motor failure, and creates emergency situations during operation. The purpose of this scientific research is to determine the patterns of wheel slip development in electric locomotives under various operating conditions through simulation modeling of the wheel slip process. **Methodology.** The methodological basis of the study is the general principles of system analysis, mathematical analysis, modeling of electromechanical systems, theoretical mechanics, and the theory of electric traction. Computer simulation modeling of the wheel pair slip development process was performed using the «Simulink» environment. **Finding.** As a result of scientific research, a mathematical model of the wheel pair slip process of an electric locomotive was created, which takes into account the traction characteristics of the electric drive, the characteristics of adhesion, the physical and chemical state of the wheel-rail contact, the moments of inertia of the components of the traction electric drive, and the time parameters of the process of loss of adhesion qualities. An approximate expression was obtained, which describes the traction characteristics with a high degree of accuracy and is presented as a dependence of the dimensionless traction coefficient on the relative slip of the wheel surface on the rail. A simulation model was created that allows modeling the wheel slip process of an electric locomotive under various operating conditions. As a result of modeling, several variants of slip development were obtained for real parameters of the traction electric drive and operating conditions. The ratios were determined at which the temporary loss of traction qualities of the electric locomotive leads to differential slip. **Originality.** An analytical expression is proposed and approximation coefficients are determined for the dependence of the wheel-rail adhesion coefficient on the sliding speed of the wheel surfaces on the rails. Conditions are formulated that determine the nature of wheel pair slip development, which can be used in the development of principles for automatic control of traction electric drives with high resistance to slip. **Practical value.** The model created allows theoretical research into the process of wheel slip in electric locomotives under various operating conditions. The results of such research can be used to create an automatic traction electric drive control system that improves the electric locomotive's resistance to wheel slip.

Key words: electric locomotive; traction electric drive; wheel set; tractive effort; traction characteristics; wheel slip; mathematical modeling

REFERENCES

1. Afanasov, A., Holik, S., Vasilyev, V., & Muntian, A. (2021). Modeling of wear factor of locomotive wheel flange taking into account the traction conditions. *Theory and Practice of Metallurgy*, *3(128)*, 21-25. DOI: https://doi.org/10.34185/tpm.3.2021.03 (in Ukrainian)
2. Afanasov, A., Skachkov, A., & Konchanin, S. (2025). Modeling of electromechanical characteristics oftraction electric motors of rolling stock. *Transport Systems and Transportation Technologies*, *29*, 32-37. DOI: https://doi.org/10.15802/tstt2025/325372 (in Ukrainian)
3. Afanasov, A. M., Arpul, S. V., Bilukhin, D. S., Shemet, A. Y., Vasyliev, V. Y., Hololobova, O. O., & Markul, R. V. (2021). Deep Attenuation Use for Traction Motors of Mainline Electric Locomotives. *Science and Transport Progress, (6(96)*, 84-94. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/258106 (in Ukrainian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

4. Hetman, H. K. (2014). *Teoriia elektrychnoi tiahy*. (Vols. 1-2). (Vol. 1). Dnipropetrovsk, Ukraine: Aktsent PP. (in Ukrainian)
5. Hetman, H. K. (2015). *Teoriia elektrychnoi tiahy*. (Vols. 1-2). (Vol. 2). Dnipropetrovsk, Ukraine: Aktsent PP. (in Ukrainian).
6. Afanasov, A. M., Holik, S. M., Buriak, S. Y., Kravchunovskyi, O. H., Fedorov, Y. F., & Gololobova, O. O. (2023). Modeling of the Wear Process of a Locomotive Wheelset and Rail During Sliding in a Curve. *Science and Transport Progress, (1(101)*, 47-54. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2023/280012 (in Ukrainian)
7. Chang, C., Chen, B., Cai, Y., & Wang, J. (2019). An experimental study of high speed wheel-rail adhesion characteristics in wet condition on full scale roller rig. *Wear, 440–441,* 203092. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203092 (in English)
8. Van de Merwe, C. V. (2023). *Model-based estimation and control of wheel slip in locomotives* (Master's thesis). University of Pretoria, Pretoria, South Africa. Retrieved from http://hdl.handle.net/2263/103971 (in English)
9. Van de Merwe, C. V, & Le Roux, J. D. (2023, May–June) Estimation of locomotive adhesion coefficients and slip ratios. In *2023 American Control Conference (ACC)* (pp. 2252-2257). San Diego, California, USA. DOI: https://doi.org/10.23919/acc55779.2023.10155953 (in English)
10. He, J., Liu, G., Liu, J., Zhang, C., & Cheng, X. (2018). Identification of a nonlinear wheel/rail adhesion model for heavy-duty locomotives. *IEEE Access, 6*, 50424–50432. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2018.2868177 (in English)
11. Berntorp, K. (2016). Joint wheel-slip and vehicle-motion estimation based on inertial, GPS, and wheel-speed sensors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology, 24*(3), 1020-1027. DOI: https://doi.org/10.1109/tcst.2015.2470636 (in English)
12. Polach, O. (2005). Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. *Wear, 258*(7-8), 992-1000. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.046 (in English)
13. Pichlik, P. (2019). Locomotive wheel slip controller based on power dissipation in wheel-rail contact. In *2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, 211-216. DOI: https://doi.org/10.1109/edpe.2019.8883900 (in English)
14. Hubbard, P., Harrison, T., Ward, C., & Abduraxman, B. (2024). Creep slope estimation for assessing adhesion in the wheel/rail contact. *IET Intelligent Transportation System, 18*(10), 1931-1942. DOI: https://doi.org/10.1049/itr2.12561 (in English)
15. Zhao, Y., Shen, L., Jiang, Z., Zhang, B., Liu, G., Shu, Y., & Peng, B. (2023). Real-time wheel-rail friction coefficient estimation and its application. Vehicle *System. Dynamics, 61*(10), 2598-2612. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2159846 (in English)

Надійшла до редколегії: 21.11.2025
Дата рецензування: 09.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353436
© А. М. Афанасов, С. В. Кончанін, Р. Д. Головко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК 621.333:629.423

В. М. КОВАЛЬОВ[1*]

[1*]Каф. «Мехатроніка та електротехніка», Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», вул. Вадима Манька, 17, Харків, Україна, 61000, тел. +38 (066) 222 05 58, ел.пошта kovalov1952@gmail.com, ORCID 0000-0001-5817-8790

Аналіз енергоефективності тягових електродвигунів магістральних електровозів

Мета. Енергоефективність тягових електродвигунів магістральних електровозів з напругою живлення 25 кВ характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД). Тягові двигуни живляться від багатоплечевого однофазного напівкерованого тиристорного випрямляча, плечі якого підключені до окремих секцій тягового трансформатора. Мета полягає у визначенні впливу коефіцієнта пульсацій струму на ККД двигуна. **Методика.** Методика визначення ККД ґрунтується на законі збереження енергії, методах гармонійного аналізу та комп'ютерного моделювання для отримання залежностей коефіцієнта пульсацій струму якоря від кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження. **Результати.** Отриманий аналітичний вираз ККД двигуна при пульсуючому струмі якоря на основі розрахунку відносних електричних втрат від гармонійних складових струму, які дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму. Розроблена комп'ютерна модель, на основі якої отримані графічні залежності коефіцієнта пульсацій струму якоря окремо від кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження. Результати експериментів оброблені методом планування експерименту та отриманий аналітичний вираз для розрахунку коефіцієнта пульсацій струму. Методика розрахунку ККД тягового двигуна полягає у наступному: для заданих омічного опору та індуктивності кола якоря, струму навантаження і середньостатистичного кута керування тиристорів розраховується коефіцієнт пульсацій струму, значення якого вставляється у вираз для розрахунку ККД двигуна. **Наукова новизна.** Автор удосконалив аналітичний вираз для визначення ККД двигуна постійного струму при його живленні від однофазного напівкерованого тиристорного випрямляча, який, на відміну від відомих враховує коефіцієнт пульсацій струму обмотки якоря. Вперше отримана аналітична залежність коефіцієнта пульсацій струму для однофазного тиристорного електроприводу постійного струму, як функція кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження. **Практична значимість.** Аналітичний вираз для визначення ККД двигуна постійного струму при його живленні від однофазного напівкерованого тиристорного випрямляча дозволяє: 1) розрахувати навантажувальну здатність двигуна механічною потужністю на валу з урахуванням допустимого нагрівання діючим значенням струму з гармонійними складовими; 2) розрахувати індуктивність згладжувального реактора для підвищення ККД двигуна за рахунок зменшення коефіцієнта пульсацій струму.

Ключові слова: електровоз; тяговий двигун; тиристорний випрямляч; коефіцієнт пульсацій; коефіцієнт корисної дії

Вступ

Магістральні електровози експлуатуються на електрифікованих залізницях з однофазною змінною напругою 25 кВ. Коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна характеризує ефективність перетворення електроенергії в механічну роботу. Відповідно до [7] ККД тягових двигунів у номінальному режимі при живленні постійним струмом без пульсацій дорівнює 94,5 %.

При живленні двигуна випрямленим струмом з пульсаціями його гармонійні складові не створюють крутного моменту, а лише нагрівають обмотку якоря. Це означає зменшення ККД на певну величину. В [7] вказано, що ККД зменшується до 84 %, але при цьому не приведена методика його розрахунку. Очевидно, що величина ККД залежить від кута керування тиристорами, і може бути більшою або меншою від зазначеної величини. Тому розробка методики визначення ККД в залежності від кута керування тиристорами є актуальною і практично доцільним.

Для розробки методики визначення ККД тягових двигунів в якості прикладу розглянемо силову схему тягового електропривода магістрального електровоза серії ВЛ80Р показана на рис. 1 [7].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352326
© В. М. Ковальов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

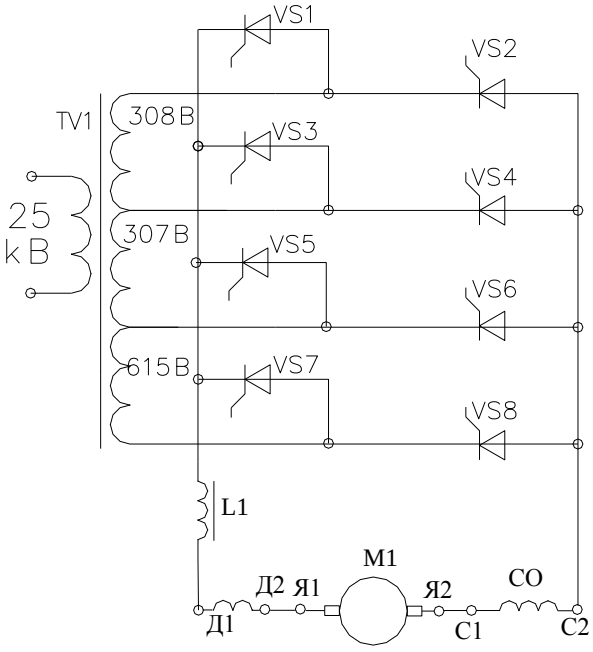


Рис. 1. Силова схема тиристорного електро-привода електровоза ВЛ80Р

Fig. 1. Power scheme of the thyristor electric drive of the electric locomotive ВЛ80Р

Параметри тягового двигуна серії НБ–418К6: номінальна потужність 740 кВт, номінальна напруга обмотки якоря 950 В, номінальний струм якоря 880 А (без пульсацій), номінальна частота обертання 915 об/хв, ККД = 94,5 % при живленні струмом без пульсацій, омічні опори обмоток двигуна при 20 ºС: послідовної обмотки збудження – 0,0079 Ом, обмотки додаткових полюсів та компенсаційної обмотки – 0,0119 Ом, обмотки якоря – 0,011 Ом, індуктивність згладжувального реактора – 5,85 мГн.

Параметри тягового трансформатора: потужність – 4777 кВА, напруга первинної обмотки – 25 кВ, напруги секцій вторинних обмоток 307+308+615 = 1230 В.

Блоки тиристорів VS1–VS8 комплектуються з послідовно та паралельно включених тиристорів. Кожен блок містить сім паралельних тиристорів. Блоки тиристорів VS5 і VS6 містять два послідовно включені тиристори, а блоки VS1-VS3, VS4, VS7, VS8 – три. Для рівномірного розподілу спадів напруги на послідовно з’єднаних тиристорах використовують RC-ланцюжки, які не показані на рис. 1. Для рівномірного розподілу струмів тиристорів паралельним гілкам використовують індуктивні дільники.

Система керування багатоплечевим тиристорним випрямлячем формує чотири напівкерованих однофазних тиристорні випрямлячі. Для цього на одне тиристорне плече імпульси подаються з нульовим кутом керування, тобто, вони працюють в режимі діодів, а на інше тиристорне плече – з кутом керування, що регулюється.

Використання діодного режиму тиристорів забезпечує протікання реактивного струму обмотки якоря без повернення в електромережу. Тобто, струм якоря не повертається в тягову електромережу, а протікає через тиристори, що працюють в діодному режимі. При цьому підвищується постійна складова струму і підвищується ККД двигуна.

Схема багатоплечового тиристорного випрямляча передбачає чотири режими регулювання випрямленої напруги. В першому режимі використовується вторинна обмотка тягового трансформатора з напругою 307 В. При цьому тиристори VS3 і VS4 регулюють напругу, тиристори VS5, VS6 працюють в діодному режимі, інші тиристори вимкнені.

У другому режимі використовується дві вторинних обмотки з результуючою напругою 615 В При цьому тиристори VS1 і VS2 регулюють напругу, тиристори VS5, VS6 працюють в діодному режимі, інші тиристори вимкнені.

У третьому режимі використовується дві вторинних обмотки з результуючою напругою 922 В. При цьому тиристори тиристори VS3 і VS4 регулюють напругу, тиристори VS7, VS8 працюють в діодному режимі, інші тиристори вимкнені.

У четвертому режимі використовується три вторинних обмотки з результуючою напругою 1 230 В. При цьому тиристори VS1 і VS2 регулюють напругу, тиристори VS7, VS8 працюють в діодному режимі, інші тиристори вимкнені.

Чотири режими випрямляча забезпечують зменшення коефіцієнта пульсацій струму, оскільки кут керування тиристорів у номінальному режимі роботи електровоза зсувається в сторону менших значень.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352326
© В. М. Ковальов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Мета

Основна мета статті розробка методики для розрахунку ККД тягових двигунів пульсуючого струму при їх живленні від однофазних перетворювачів. Задача полягає у визначенні кількісного впливу гармонік струму якоря на ККД двигуна.

Предмет дослідження – процеси електромеханічного перетворення енергії в двигунах постійного струму при живленні від однофазних тиристорних перетворювачів.

Методика

Коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна зазвичай визначають експериментально в процесі запуску серії двигунів у виробництво через підрахунок втрат потужності. При живленні двигуна пульсуючою напругою ККД визначається за формулою [1, 6]:

$$\eta_{пс} = 1 - (p_{мх} + p_{мг} + p_{ел0} + \sum p_{елν}) / P_{ел}, \quad (1)$$

де $p_{мх}, p_{мг}, p_{ел0}, \sum p_{елν}, P_{сп}$ – відповідно втрати механічні, магнітні, електричні від постійної і гармонійних складових струму та споживана електрична потужність.

При пульсуючих струмах розрахунок магнітних втрат виконують за спрощеною формулою, яка не передбачає поділу магнітних втрат від вихрових струмів та від явища гістерезису [2, 5]:

$$p_{ст.ν} = B_ν^2 f_ν^β, \quad (2)$$

де $p_{ст.ν}$ – магнітні втрати в сталі від дії ν-ї гармоніки струму; $B_ν$ – величина ν-ї гармоніки магнітної індукції, яка зменшується з ростом частоти, $f_ν$ – частота ν-ї гармоніки; β = 1,3–1,5 – емпіричний показник ступеня для конкретної марки сталі, який враховує співвідношення втрат на вихрові струми та гістерезис на частоті 50 Гц.

Результуючі магнітні втрати визначаються шляхом підсумовування втрат від дії кожної гармоніки. У першому наближенні приймаємо, що нагрівання сталі осердя від магнітних втрат, спричинених гармоніками магнітного потоку, не впливає на нагрівання обмотки якоря. Аналогічно приймаємо, що пульсуючий струм якоря не впливає на механічні і додаткові втрати.

Для складання методики визначення ККД доцільно електричні втрати в обмотках двигуна розділити на статичні від постійної складової струму та пульсівні від гармонійних складових струму. Останні не створюють крутного моменту двигуна, а перетворюються в теплову роботу, що еквівалентно зменшенню ККД двигуна.

Проведемо аналіз публікацій щодо електричних втрат в двигунах постійного струму при пульсуючому струмі. В [10] запропонована модель для розрахунку електричних втрат в двигунах з пульсуючим струмом з урахуванням нелінійного характеру кривої намагнічування. Аналогічна модель розглянута в [13] для транзисторного електроприводу тролейбуса з двигунами змішаного збудження. В [15, 17] проведено моделювання магнітних втрат від вищих гармонік. В [12] запропонована теплова карта нагрівання тягових електродвигунів з пульсуючим струмом. В [8] проведена оцінка електричних втрат при пульсуючому струмі в залежності від частоти комутації та ширини імпульсів транзисторного перетворювача. В [11] розглянуто удосконалена модель електричних втрат тягового двигуна електровоза. В [14, 16] розглянуті залежність коефіцієнта пульсацій напруги від ширини імпульсів напруги живлення двигуна. В [9] розглянуті питання провалів крутного моменту двигуна з постійними магнітами через нерівність їх характеристик.

Проведений аналіз показав, що у наведених публікаціях не розглядався кількісний вплив гармонік на ККД двигуна.

З аналізу вищенаведеної літератури можна зробити такі висновки: 1) в основному розглядають лише моделювання втрат; 2) практичної методики визначення ККД двигуна не запропоновано. Таким чином, тема статті є актуальною.

Результати

Для аналізу електричних втрат в тягових двигунах при пульсуючому струмі необхідно вибрати узагальнений параметр, який впливає на електричні втрати і не залежать від потужності двигунів. Таким параметром доцільно прийняти коефіцієнт пульсацій струму, відносно якого існує три визначення згідно ГОСТ 23875–88 і стандарту ІЕК–60050–161 Міжнародної електротехнічної комісії. Для аналізу впливу пульсацій струму на електричні

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352326
© В. М. Ковальов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

втрати доцільно використати таке визначення: коефіцієнт пульсацій струму це відношення діючого значення суми гармонік струму до постійної складової:

$$K_{пс} = \sqrt{\sum I_k^2} / I_0 , \qquad (3)$$

де $\sqrt{\sum I_k^2}$ – діюче значення суми гармонік струму; I_0 – постійна складова струму.

Електричні втрати в обмотках якоря від діючого значення пульсуючого струму $I_я = \sqrt{I_0^2 + \sum I_k^2}$ розділяємо на статичні $\Delta P_0 = I_0^2 R_я$ від постійної складової струму та пульсуючі $\Delta P_{пс} = \sum (I_k^2 R_я)$ від гармонійних складових.

Виразимо діюче значення струму якоря через коефіцієнт пульсацій формулою:

$$I_я = I_0 \sqrt{1 + K_{пс}^2} . \qquad (4)$$

Електричні втрати в обмотках якоря при живленні пульсуючим струмом збільшується відносно живлення струмом без пульсацій за рахунок втрат від гармонік струму. Виразимо збільшення електричних втрат при живленні пульсуючим струмом відносно електричних втрат при живленні струмом без пульсацій (без гармонік):

$$\Delta P_я^* = \frac{\Delta P_я}{\Delta P_0} = \frac{I_0^2 \left(1 + K_{пс}^2\right) R_я}{I_0^2 R_я} = 1 + K_{пс}^2 , \qquad (5)$$

де $\Delta P_я^*$ – електричні втрати в обмотках двигуна при живленні пульсуючим струмом відносно електричних втрат при живленні струмом без пульсацій; ΔP_0 – електричні втрати в обмотках якоря при живленні струмом без пульсацій.

Згідно (5) загальні електричні втрати відносно статичних збільшуються на величину відносних пульсуючих втрат чисельно рівних квадрату коефіцієнта пульсацій струму

$$\Delta P_{пс}^* = \Delta P_{пс} / \Delta P_0 = K_{пс}^2 ,$$

а в іменованих одиницях пульсаційні електричні втрати дорівнюють:

$$\Delta P_{пс} = K_{пс}^2 \Delta P_0 \cdot$$

Збільшення відносних пульсуючих електричних втрат означає зменшення ККД $\eta_{пс}$ двигуна при пульсуючому струмі відносно номінального $\eta_{ном}$ значення на таку ж величину, тобто:

$$\eta_{пс} / \eta_{ном} = 1 - K_{пс}^2 \cdot$$

Тоді аналітичний вираз для розрахунку ККД двигуна при пульсуючому струмі має вигляд:

$$\eta_{пс} = (1 - K_{пс}^2) \eta_{ном} . \qquad (6)$$

Згідно виразу (6) при зменшенні коефіцієнта пульсацій струму ККД збільшується, оскільки зменшуються електричні втрати від гармонік струму. Якщо в процесі регулювання швидкості $K_{пс}$ змінюється в певному діапазоні кутів керування тиристорів, то в (6) слід підставляти його середнє значення.

Таким чином, для визначення ККД двигуна при живленні пульсуючим струмом необхідний розрахунок коефіцієнта пульсацій струму. Останній залежить від кута керування тиристорів, від моменту навантаження на валу (постійна складова струму) та від індуктивності кола якоря (електромагнітна стала).

Оскільки двигуни пульсуючого струму відносяться до класу детермінованих систем, в яких функціональні залежності параметрів однозначно визначаються причинно-наслідковими зв'язками і точно описуються диференційними рівняннями, то доцільно проводити комп'ютерний експеримент.

При комп'ютерних експериментах на моделі є можливість абсолютно точно задавати параметри електропривода і стабілізувати їх в процесі експерименту.

Для експериментального визначення залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів, від моменту навантаження на валу та від індуктивності кола якоря складена комп'ютерна модель тиристорного електропривода в програмному пакеті «Simulink» [4], яка показана на рис. 2. На рис. 3 показані експериментальні осцилограми напруги якоря і струму якоря.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352326
© В. М. Ковальов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

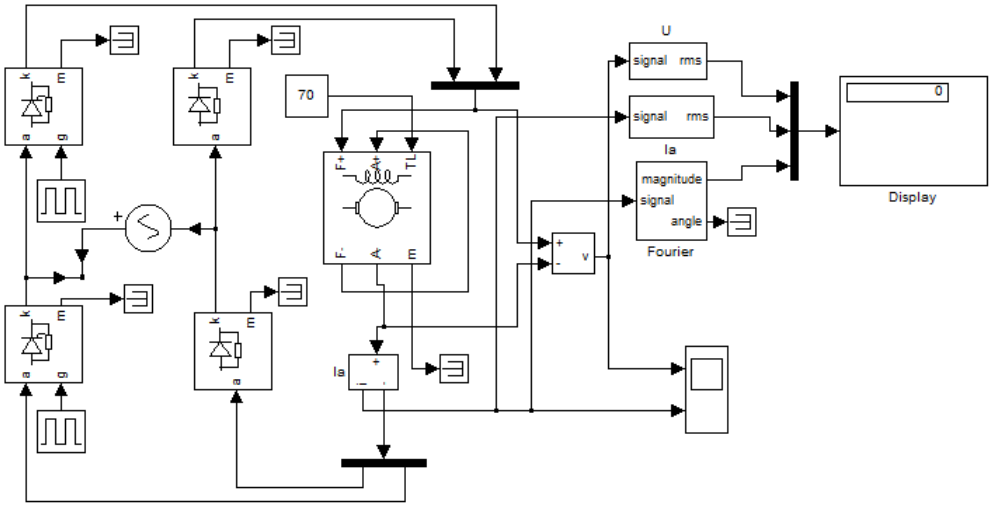


Рис. 2. Модель тягового електропривода трамвая для визначення коефіцієнта пульсацій струму

Fig. 2. Model of a tram traction electric drive for determining the current ripple coefficient

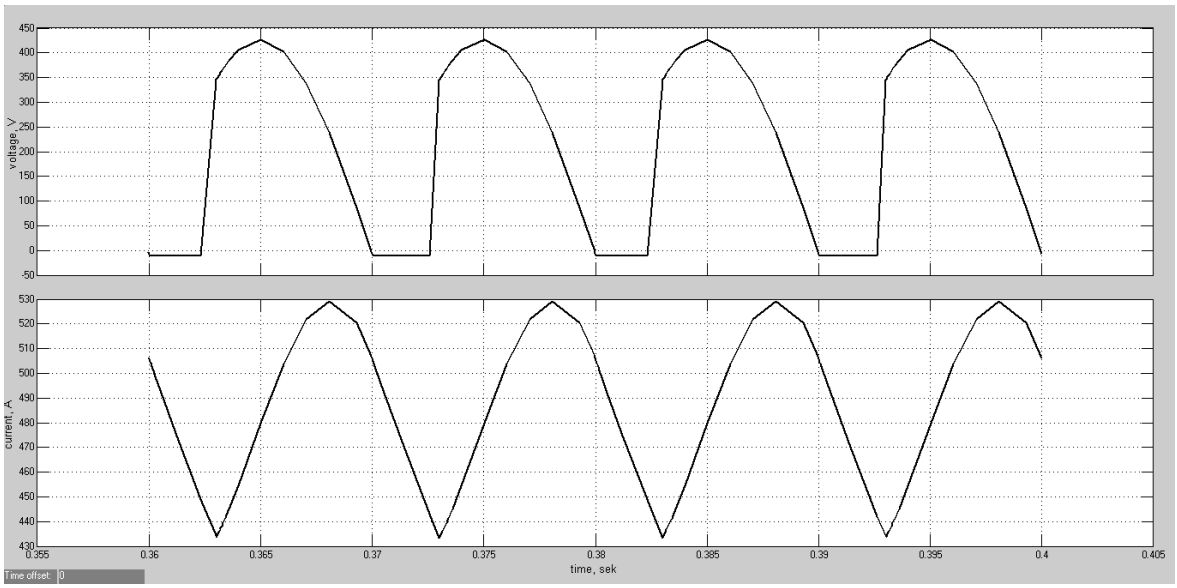


Рис. 3. Експериментальні осцилограми напруги якоря і струму якоря

Fig. 3. Experimental oscillograms of armature voltage and armature current

Комп’ютерний експеримент проводиться наступним чином. Для діапазону кутів керування тиристорів вимірюються діючі значення струму якоря $I_я$ та їх постійні складові I_o. Коефіцієнт пульсацій струму визначається за формулою:

$$K_{nc} = \sqrt{I_я^2 - I_0^2} / I_я . \qquad (7)$$

На моделі був проведений розрахунок коефіцієнта пульсацій струму в залежності від кута керування, сталої часу та струму навантаження. В результаті отримані відповідні графіки, показані на рис. 4, 5 та 6.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352326
© В. М. Ковальов, 2026

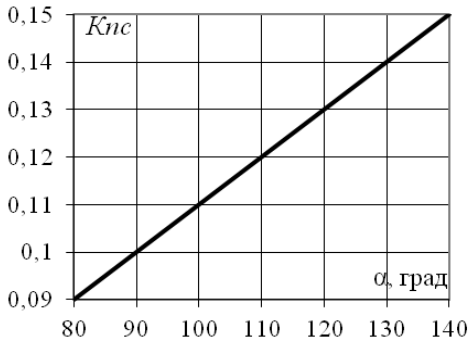


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів

Fig. 4. Graph of the dependence of the current ripple coefficient on the control angle of the thyristors

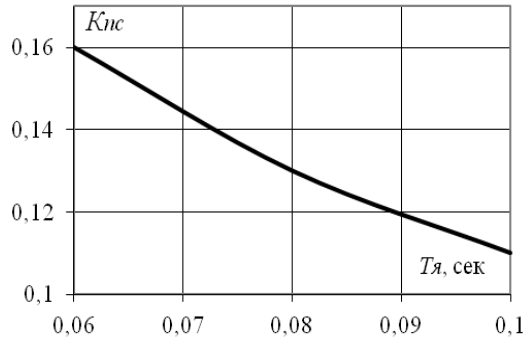


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від сталої часу кола якоря

Fig. 5. The graph of the dependence of the coefficient of current ripples on the constant time

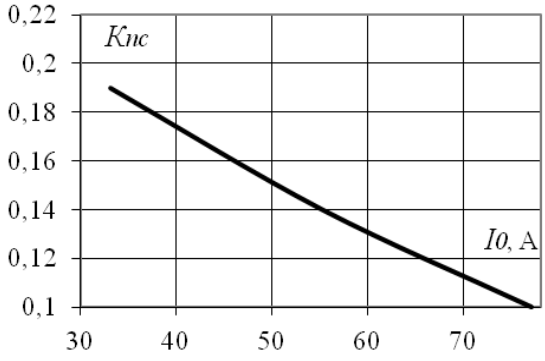


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від постійної складової струму

Fig. 6. The graph of the dependence of the current ripple coefficient on the constant component

З графіків випливає, що експериментальні залежності коефіцієнта пульсацій струму мають монотонний характер і тому можуть бути апроксимовані методом планування експерименту [3]. Параметри, які змінювались в процесі експерименту (кут керування тиристорів, електромагнітна стала якоря, відносний струм навантаження двигуна) в методі планування експерименту називають факторами. Згідно процедури метода отриманий аналітичний вираз:

$$K_{пс} = 0{,}141 + 0{,}025\alpha - 0{,}034T_{я} - 0{,}051I_0^* - $$

$$-0{,}009\alpha T_{я} - 0{,}011\alpha I_0^* +$$

$$+0{,}014T_{я}I_0^* + 0{,}004\alpha T_{я}I_0^* . \quad (8)$$

Таким чином, методика розрахунку ККД двигуна при живленні від тиристорного випрямляча полягає у наступному: за виразом (8) для заданих параметрів електропривода розраховується величина коефіцієнта пульсацій струму і за виразом (6) – величина коефіцієнта корисної дії.

З вищевикладеного випливає, що механічна потужність на валу двигуна залежить від коефіцієнта пульсацій струму обмотки якоря, тобто, чим більший коефіцієнт пульсацій струму, тим менша величина механічної потужності на валу двигуна. Це означає, що в разі номінальної електричної потужності двигуна необхідно зменшувати механічну потужність на валу, інакше не буде забезпечено номінальний температурний режим обмотки якоря.

Наукова новизна та практична значимість

Автор удосконалив аналітичний вираз для визначення ККД двигуна пульсуючого струму при його живленні від однофазного тиристорного випрямляча, який, на відміну від відомих, враховує коефіцієнт пульсацій струму обмотки якоря. Вперше отримана аналітична залежність коефіцієнта пульсацій струму для однофазного тиристорного електроприводу пульсуючого струму, як функція кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження.

Висновки

У результаті проведених досліджень запропоновано методику для визначення ККД тягових двигунів при живленні пульсуючим стру-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352326
© В. М. Ковальов, 2026

мом, яка полягає в наступному: методом планування експерименту отримуються формули для розрахунку коефіцієнта пульсацій струму з урахуванням кута керування тиристорів, електромагнітної сталої часу кола якоря і струму навантаження з подальшою підстановкою у вираз для розрахунку ККД.

Аналітичний вираз для визначення ККД двигуна пульсуючого струму при його живленні від однофазного тиристорного випрямляча дозволяє розрахувати коефіцієнт використання двигуна за механічною потужністю з урахуванням допустимого нагрівання пульсуючим струмом.

Використання результатів роботи дозволить підвищити енергоефективність магістральних електровозів, які широко експлуатуються в Україні. При низькому розрахунковому значенні ККД необхідно збільшити індуктивність згладжувального реактора.

Зменшення споживання електроенергії дозволить заощаджувати енергоресурси та позитивно позначиться на екологічній ситуації в країні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вольдек А. И. *Электрические машины* : учебник. Ленинград : Энергия, 1978. 832 с.
2. Костин Н. А., Петров А. В. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 3. С. 53–59. URL: https://nasplib.isofts.kiev.ua/items/0961b5e6-4c58-4ac0-9015-0825f428ad6c
3. *Методы исследований и организация экспериментов* / под ред. проф. К. П. Власова. Харьков : «Гуманитарный центр», 2002. 256 с.
4. Островерхов М. Я., Пижов В. М. *Моделювання електромеханічних систем в «SIMULINK»*. Київ : ВД «Стилос», 2008. 528 с.
5. Петренко А. Н., Танянский В. И., Петренко Н. Я. Дополнительные потери мощности частотно-управляемого асинхронного двигателя от высших гармоник напряжения. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 5. С. 34–35. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/items/9e6fa386-8caf-4079-88fd-bfbad3e734d4
6. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепіков В. Б., Мацко Б. М., Пересада С. М., Теряєв В. І., Буртний В. В., Місюренко В. О., Панченко Б. Я. *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи* : навч. посіб. / за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
7. *Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации* / под ред. Б. А. Тушканова. Москва : Транспорт, 1985. 541 с.
8. Bak Y., Lee K.-B. Reducing Switching Losses in Matrix Convertor Drives: Disconinuous PWM Method. *Journal Power Electron.* 2018. Vol. 18, No. 5. P. 1325–1335.
9. Gervasio F., Mastromauro R., Liserre M. Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. *IEEE International Conference on In dustrial Technology (ICIT)* (Seville, 17-19 March 2015). Seville, 2015. P. 1123–1128.DOI: https://doi.org/10.1109/icit.2015.7125248
10. Goolak S., Riabov Ie., Tkachenko V., Sapronova S., Rubanik I. Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics.* 2021. № 6. P. 11–17. DOI: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.02
11. Goolak S., Sapronova S., Tkachenko V., Riabov I., Batrak Y. Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2020. Vol. 6, № 5(108). P. 38–46. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542
12. Gundabattini E., Mystkowski A., Idzkowski A., R. R. S., Solomon D. G. Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods-A Review. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 5. P. 1472. DOI: https://doi.org/10.3390/en14051472
13. Kharchenko V., Kostenko I., Liubarskyi B., Shaida V., Kuravskyi M., Petrenko O. Simulating the traction electric drive operation of a trolleybus equipped with mixed excitation motors and a DC-DC converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, No. 9(105). P. 46–54. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288
14. Raminosoa T., Wiles R., Cousineau J. E., Bennion K., Wilkins J. A High-Speed High-Power-Density Non-Heavy Rare-Earth Permanent Magnet Traction Motor. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (Detroit, 11-15 Oct. 2020). Detroit, 2020. P. 61–67. DOI: https://doi.org/10.1109/ecce44975.2020.9235704

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352326
© В. М. Ковальов, 2026

15. Rens J., Vandenbossche L., Dorez O. Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. *World Electric Vehicle Journal*. 2020. Vol. 11, Iss. 1. P. 1–14. DOI: https://doi.org/10.3390/wevj11010024
16. Xue L. L., Su G.-J., Ozpineci B. DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization (DREAM) Modulation Scheme for a High Power Density Inverter. *IEEE Appled Power Electronics Conference (APEC)* (Phoenix, 14-17 June 2021). Phoenix, 2021. P. 186–191 DOI: https://doi.org/10.1109/apec42165.2021.9487324
17. Yamazaki K., Noiaki F. Torque and Loss Calculation of Rotating Mashines Considering Laminated Core. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011. Vol. 47, Iss. 5. P. 994–997.DOI: https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2089501

V. M. KOVALOV[1*]

[1*]Dep. «Mechatronics and Electrical Engineering», National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Vadym Manko St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61000, tel. +38 (066) 222 05 58, e-mail kovalov1952@gmail.com, ORCID 0000-0001-5817-8790

Energy Efficiency Analysis of Traction Motors of Mainline Electric Locomotives

Purpose. The energy efficiency of traction electric motors of mainline electric locomotives with a supply voltage of 25 kV is characterized by the efficiency factor (EFC). Traction motors are powered by a multi-arm single-phase half-controlled thyristor rectifier, the arms of which are connected to separate sections of the traction transformer. The purpose is to determine the influence of the current ripple coefficient on the efficiency of the motor. **Methodology.** The efficiency determination methodology is based on the law of energy conservation, methods of harmonic analysis and computer modeling to obtain the dependences of the armature current ripple coefficient on the thyristor control angle, armature circuit inductance and load current. **Finding.** An analytical expression for the efficiency of the motor with a pulsating armature current was obtained based on the calculation of relative electrical losses from the harmonic components of the current, which are equal to the square of the current ripple coefficient. A computer model was developed, based on which graphical dependences of the armature current ripple coefficient were obtained separately from the thyristor control angle, armature circuit inductance and load current. The results of the experiments were processed by the experiment planning method and an analytical expression was obtained for calculating the current ripple coefficient. The method for calculating the efficiency of a traction motor is as follows: for the given ohmic resistance and armature circuit inductance, load current and average thyristor control angle, the current ripple coefficient is calculated, the value of which is inserted into the expression for calculating the engine efficiency. **Originality.** The author improved the analytical expression for determining the efficiency of a DC motor when powered by a single-phase half-controlled thyristor rectifier, which, unlike the known ones, takes into account the armature winding current ripple coefficient. For the first time, an analytical dependence of the current ripple coefficient for a single-phase thyristor DC electric drive was obtained as a function of the thyristor control angle, armature circuit inductance and load current. **Practical value.** The analytical expression for determining the efficiency of a DC motor when powered by a single-phase half-controlled thyristor rectifier allows: 1) to calculate the load capacity of the motor by mechanical power on the shaft, taking into account the permissible heating by the effective value of the current with harmonic components; 2) to calculate the inductance of the smoothing reactor to increase the efficiency of the motor by reducing the current ripple coefficient.

Key words: electric locomotive; traction motor; thyristor rectifier; ripple coefficient; efficiency coefficient

REFERENCES

1. Voldek, A. I. (1978). *Elektricheskie mashiny*. Leningrad, Russia : Energiya (in Russian)
2. Kostin, N. A., & Petrov, A. V. (2011). Methods of definition of components of total power in systems of electric propulsion. *Tekhnichna Elektrodynamika, 3*, 53-59. Retrieved from https://nasplib.isofts.kiev.ua/items/0961b5e6-4c58-4ac0-9015-0825f428ad6c (in Russian)
3. Vlasova, K. P. (Ed.). (2002). *Metody issledovanij i organizaciya eksperimentov*. Kharkov, Ukraine: Gumanitarnyj centr (in Russian)
4. Ostroverkhov, M. Ya., & Pyzhov, V. M. (2008). *Modeliuvannia elektromekhanichnykh system v «SIMULINK»*. Kyiv, Ukraine: VD «Stylos». (Ukrainian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352326
© В. М. Ковальов, 2026

5. Petrenko, A. N., Tanyanskyi, V. I., & Petrenko, N. Y. (2012). Additional power loss in a frequency-controlled induction motor due to voltage higher harmonics. *Electrical Engineering & Electromechanics, 5*, 34-35. Retrieved from https://repository.kpi.kharkov.ua/items/9e6fa386-8caf-4079-88fd-bfbad3e734d4 (in Russian).
6. Popovych, M. H., Lozynskyi, O. Yu., Klepikov, V. B., Matsko, B. M., Peresada, S. M., Teriaiev, V. I., Burtnyi, V. V., Misiurenko, V. O., & Panchenko, B. Ya. (2005). *Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannia ta elektropryvody*. Kyiv, Ukraine: Lybid. (Ukrainian)
7. Tushkanov, B. A. (Ed.). (1985). *Elektrovoz VL80R. Rukovodstvo po ekspluatacii*. Moskva, Russia: Transport (in Russian).
8. Bak, Y., & Lee, K.-B. (2018). Reducing Switching Losses in Matrix Convertor Drives: Disconinuous PWM Method. *Journal Power Electron*, *18*(5), 1325-1335. (in English)
9. Gervasio, F., Mastromauro, R. A., & Liserre, M. (2015). Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. In *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT).* (pp. 1123-1128). Seville, Spain. DOI: https://doi.org/10.1109/icit.2015.7125248 (in English)
10. Goolak, S., Riabov, Ie., Tkachenko, V., Sapronova, S., & Rubanik, I. (2021). Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics, 6*, 11-17. DOI: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.02 (in English)
11. Goolak, S., Sapronova, S., Tkachenko, V., Riabov, I., & Batrak, Y. (2020). Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *6*(5(108)), 38-46. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542 (in English)
12. Gundabattini, E., Mystkowski, A., Idzkowski, A., R., R. S., & Solomon, D. G. (2021). Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods-A Review. *Energies*, *14*(5), 1472. DOI: https://doi.org/10.3390/en14051472 (in English)
13. Kharchenko, V., Kostenko, I., Liubarskyi, B., Shaida, V., Kuravskyi, M., & Petrenko, O. (2020). Simulating the traction electric drive operation of a trolleybus equipped with mixed excitation motors and a DC-DC converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *3*(9(105)), 46-54. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288 (in English)
14. Raminosoa, T., Wiles, R., Cousineau, J. E., Bennion, K., & Wilkins, J. (2020). A High-Speed High-Power-Density Non-Heavy Rare-Earth Permanent Magnet Traction Motor. In *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 61-67). Detroit, Michigan (USA). DOI: https://doi.org/10.1109/ecce44975.2020.9235704 (in English)
15. Rens, J., Vandenbossche, L., & Dorez, O. (2020). Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. *World Electric Vehicle Journal*, 2020, *11*(1), 1-14. DOI: https://doi.org/10.3390/wevj11010024 (in English)
16. Xue, L. L., Su, G.-J., & Ozpineci, B. (2021, June). DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization (DREAM) ModulationScheme for a High Power Density Inverter. In *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 186-191). Phoenix, AZ, USA. DOI: https://doi.org/10.1109/apec42165.2021.9487324 (in English)
17. Yamazaki, K., & Noiaki, F. (2011). Torque and Loss Calculation of Rotating Mashines Considering Laminated Core. *IEEE Transactions on Magnetics*, *47*(5), 994-997. DOI: https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2089501 (in English)

Надійшла до редколегії: 07.12.2025
Дата рецензування: 24.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/352326
© В. М. Ковальов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК 621.333:629.42

С. В. РОЙ[1, 2], Є. С. РЯБОВ[3*]

[1]ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», вул. Знам'янська, 16-А, Миколаїв, Україна, 54037, тел. +38 (0512) 70 99 70, ел. пошта Serhii.Roi@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0009-0610-308X
[2]Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта Serhii.Roi@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0009-0610-308X
[3*]Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (097) 302 14 54, ел. пошта riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

Визначення параметрів plug-in гібридної енергетичної установки маневрово-вивізного локомотиву для промислових підприємств

Мета. Метою статті є визначення параметрів plug-in гібридної енергетичної установки маневрово-вивізного локомотиву для промислових підприємств. **Методика.** Проведено аналіз параметрів експлуатаційних режимів тепловозів, які використовуються для маневрових операцій та вивізної роботи на вітчизняних промислових підприємствах. Для аналізу використовувалися дані з бортових систем тепловозів, які експлуатуються на ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» та ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». **Результати.** Визначено, що при маневровій роботі споживання енергії не перевищує 600 кВт·год при найбільшій потужності 350 кВт. При вивізній роботі споживання енергії становить 850…1200 кВт·год при найбільшій потужності 650 кВт. Проведено порівняння споживання пального, витрат на паливно-енергетичні ресурси та викидів CO_2 для різних варіантів енергетичної установки. Для порівняльної оцінки варіантів гібридної енергетичної установки використано паливні характеристики дизельних двигунів Cummins QST30–L2 потужністю 895 кВт та Cummins QSZ13 потужністю 401 кВт. Встановлено, що раціональним є використання plug-in енергетичних установок, в яких накопичувач енергії необхідно заряджати від джерела енергії з низькою вартістю кіловат-години енергії. Це дозволяє зменшити витрати на паливно-енергетичні ресурси на 30…35 % у порівнянні з витратами на дизельне пальне при виконанні маневрових операцій. Для забезпечення вивізної роботи до складу plug-in гібридної енергетичної установки має входити дизельний двигун потужністю близько 400 кВт. У цьому випадку здійснюється сумісне живлення тягового електроприводу і допоміжних систем, а зниження витрат на паливно-енергетичні ресурси може становити 12…14 %. Показано, що вибір типу комірок накопичувача необхідно проводити з урахуванням їх ресурсу. Для досліджуваної plug-in енергетичної установки раціональним є застосування літій-залізо-фосфатних комірок CALB L194F130B. **Наукова новизна.** Обґрунтовано застосування plug-in гібридної енергетичної установки на маневрово-вивізних локомотивах, які використовуються на промислових підприємствах, та визначено параметри енергетичної установки. **Практична значимість.** Отримані результати можуть використовуватися при створенні гібридних-енергетичних установок для маневрово-вивізних локомотивів для промислових підприємств. Запропонована методика визначення параметрів гібридної енергетичної установки може бути використана для іншого рухомого складу.

Ключові слова: plug-in гібридна тягова система; дизельний двигун; накопичувач енергії; тяговий електропривод; енергоефективність; рухомий склад; локомотив

Вступ

Підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції вимагає впровадження технологій, які зменшують її вартість та скорочують шкідливі викиди. В першу чергу, це вимагає удосконалення основного виробничого обладнання та технологічних процесів, від яких безпосередньо залежать показники продукції. Проте важливим є і удосконалення додаткових операцій, які неодмінно супроводжують основний цикл виробництва.

На вітчизняних промислових підприємствах поширене використання залізничного транспорту у виробничих процесах. Для переміщення вагонів між різними цехами та промисловими майданчиками використовуються маневрові тепловози серій ТЕМ2 та ЧМЕ3, а також промислові тепловози серій ТГМ3, ТГМ4, ТГМ6 та інші. Аналіз режимів роботи показує, що при на

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

промислових підприємствах маневрових операцій тепловози працюють з дотичною потужністю близько 250 кВт [5]. Це відповідає роботі дизельного двигуна з потужністю, яка не перевищує 50 % номінальної потужності дизельних двигунів наявних тепловозів. При виконанні вивізної роботи, пов'язаної з переміщенням вагонів між віддаленими підрозділами та виробничими майданчиками, тепловоз працює на усіх високих позиціях контролера машиніста. Характерним для обох видів робіт є тривалий холостий хід дизельного двигуна, яка може складати понад 50 % робочої зміни. Це свідчить про те, що параметри наявних маневрових тепловозів не відповідають умовам їх експлуатації на промислових підприємствах. З урахуванням застарілого технічного стану тепловозів, актуальним є їх оновлення. При цьому необхідно застосовувати технічні рішення, які дозволять якомога краще адаптувати їх характеристики до фактичних умов експлуатації.

Огляд поточної ситуації. Оновлення тягового рухомого складу є важливим для стабільної роботи промислових підприємств. Зазвичай, найбільшу увагу приділяють зменшенню споживання тепловозами дизельного пального та мастила. Для цього наявні дизельні двигуни оснащують сучасними системами упорскування палива [3]. Іншим підходом є заміна дизельного двигуна на сучасну модель, яка має кращі паливні характеристики. При цьому в цілому зберігаються штатні системи серійного тепловозу [3].

Більш досконалий підхід до модернізації полягає у глибокій модернізації тепловозів, яка, крім заміни дизельного двигуна, передбачає суттєві зміни в передачі потужності, заміну допоміжних систем тощо. Прикладом є модернізація маневрових тепловозів серій ТЕМ2 та ЧМЕ3, на яких використовується сучасний дизельний двигун, електрична передача потужності змінно-постійного струму, електричний привід мотор-вентиляторів охолодження та компресора, електронна система керування тощо. Також варто відзначити модернізацію тепловозів ТГМ6, при якій гідравлічну передачу потужності замінено на тяговий електропривод з асинхронним електродвигуном при збереженні групового приводу колісних пар [4]. Це дозволило підвищити тягово-енергетичні показники тепловозу, а застосування сучасного дизельного двигуна забезпечило зменшення споживання дизельного пального.

Варто відзначити, що параметри модернізованих тепловозів здебільшого близькі до серійних тепловозів. Це забезпечує їх використання для вивізної роботи, однак для маневрової роботи такі тепловози мають надлишкову потужність та тягові властивості. Тобто при модернізації не вирішується питання адаптації характеристик тепловозу до різних умов експлуатації. Наслідком цього є підвищене споживання пального, а також більші капітальні витрати на обладнання тягової передачі потужності.

Для забезпечення можливості адаптації характеристик тепловозу під різні види роботи його тягова система повинна включати енергетичну установку з кількома джерелами енергії та тяговий електропривод з можливістю зміни кількості електродвигунів, які працюють.

На сьогодення найбільш поширеними способами адаптації характеристик тепловозу до умов експлуатації є застосування багатодизельної енергетичної установки (з двома або трьома дизель-генераторними установками) та використання гібридних енергетичних установок у складі, як правило, одного дизель-генератора та накопичувача енергії. Перший підхід поширений при модернізації застарілих тепловозів у США [7, 14, 19] та пропонується європейськими виробниками для нових локомотивів [6, 9, 12]. Разом з тим на сьогодення на локомотивах застосовуються гібридні енергетичні установки. Гібридною енергетичною установкою обладнано локомотив HD300 виробництва Toshiba [11], серія локомотивів виробництва CRRC [13], локомотиви серії Traxx Shunter виробництва Alstom [18] та інші. Ключовими перевагами застосування таких локомотивів вказуються зменшення споживання дизельного пального, скорочення шкідливих викидів, зниження рівня шуму.

Аналіз технічних параметрів показує, що параметри гібридних енергетичних установок локомотивів суттєво різняться, що вказує те, що кожен локомотив адаптований від певні умови експлуатації. Це забезпечує ефективність його використання.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

Мета

Метою роботи є визначення параметрів plug-in гібридної енергетичної установки локомотиву, який використовується для маневрової та вивізної роботи на промислових підприємствах.

Методика

Для визначення параметрів експлуатаційних режимів найбільш доцільним опрацювання даних бортових систем локомотивів [5]. У табл. 1 та 2 наведено параметри режимів роботи тепловозів ЧМЕ3 та ТЕМ2, які переважно виконували маневрову та вивізну роботу відповідно. Дані отримані за дванадцятигодинні робочі зміни.

Таблиця 1

Параметри режимів роботи тепловозу ЧМЕ3 при виконанні маневрових операцій на ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»

Table 1

Operating parameters of the ChME3 diesel locomotive when performing shunting operations at Ferrexpo Poltava Mining PJSC

Позиція контролера машиніста	Відносна тривалість роботи, %			
	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3	Зміна 4
0	59,4	56,1	67,6	54,8
1	13	18,9	15	15,8
2	12,8	17,7	12,3	18,2
3	5,5	4,4	5,1	6,3
4	2,6	0,8	0	1,4
5	2	0,9	0	1,4
6	1,2	1,2	0	1,8
7	3,1	0	0	0,1
8	0	0	0	0,1

З даних табл. 1 слідує, що при маневровій роботі в основному рух здійснюється на 1–3 позиції контролера машиніста. Тривалість роботи на вищих позиціях контролера машиніста складає кілька відсотків часу.

Таблиця 2

Параметри режимів роботи тепловозу ТЕМ2 при виконанні вивізної роботи на ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»

Table 2

Operating parameters of the TEM2 locomotive when performing haulage work at PJSC DTEK Pavlogradvuhillya

Позиція контролера машиніста	Відносна тривалість роботи, %		
	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3
0	63,5	60,8	67,2
1	9,2	6,5	4,2
2	8,3	7,5	7,5
3	5,4	8,1	5,8
4	3,8	4	4
5	2,6	3,3	5,6
6	5,6	7,6	3,1
7	0,2	2,3	2,7
8	0	0	0

При вивізній роботі (табл. 2) задіяні 1…7 позиції машиніста з досить рівномірним розподілом відносної тривалості роботи на цих позиціях.

В обох випадках відносна тривалість холостого ходу складає не менше 50 %.

Як вказувалося вище, при маневрових операціях робота здійснюється на 1–3 позиції машиніста. Для врахування роботи на більш високих позиціях можна прийняти, що найвищою позицією є четверта, які відповідає потужність близько 350 кВт.

Для оцінки ефективності використання накопичувача енергії доцільно провести порівняльну оцінку споживання пального при різних варіантах побудови енергетичних установок.

Розглянемо три випадки. У першому живлення тягового системи здійснюється від дизельного двигуна Cummins QST30–L2 потужністю 895 кВт, який застосовується для модернізації маневрових тепловозів промислових підприємств. У другому – живлення здійснюється від дизельного двигуна Cummins QSZ13 потужністю 401 кВт, який можна використати у гібрид-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

ній енергетичній установці. У третьому – живлення здійснюється від накопичувача енергії, який попередньо заряджався від дизельного двигуна QSZ13.

Споживання пального протягом зміни дизельним двигуном визначалося за виразом:

$$G = \alpha_0 T g_0 P_0 + \sum_{l=1}^{4} \alpha_i T g_i P_i \left(1 + \beta_i\right), \qquad (1)$$

де α_0 – відносна тривалість роботи на холостому ході; g_0 – питома витрата пального при мінімальній частоті обертання і відповідній їй потужності; T – тривалість зміни, рівна 12 год; P_0 – потужність, яка споживається при холостому ході, прийнята рівною 5 кВт; i – номер режиму, відповідає позиції контролера машиніста; α_i – відносна тривалість роботи на і-й позиції контролера машиніста; g_i – питома витрата пального дизельним двигуном в і-му режимі роботи; P_i – потужність на клемах тягового генератора на і-й позиції контролера машиніста; β_i – відносна потужність допоміжних систем на і-й позиції контролера машиніста. Для спрощення розрахунків прийнята рівною 0,1 для усіх позицій.

При розрахунках за (1) не враховується підвищення споживання пального у перехідних режимах при зміні позиції контролера машиніста. У випадку використання паливних характеристик дизельного двигуна, які пов'язують питому витрату пального та потужність «на маховику», необхідно враховувати втрати у тяговому генераторі та випрямлячі (при використанні генератора змінного струму). При оціночних розрахунках, ці втрати можуть бути визначені у 5–6 % потужності, яка передається від дизельного двигуна. Це відповідає сумарному ККД генератора та випрямляча, рівному 94…95 %.

При розрахунках використовувалися паливні характеристики двигунів Cummins QST30–L2 (табл. 3) та Cummins QSZ13 (табл. 4) відповідно до технічних специфікацій на дизельні двигуни. Для отримання даних у точках, які не наведені у таблицях, використовувалося інтерполяція.

Таблиця 3

Паливна характеристика дизельного двигуна Cummins QST30–L2

Table 3

Fuel characteristics of the Cummins QST30–L2 diesel engine

Потужність «на маховику», кВт	Частота обертання, об/хв	Питома витрата пального, кг/кВт·год
13	650	0,2837
64	800	0,2187
97	850	0,2116
211	1 060	0,2066
281	1 180	0,2091
352	1 360	0,2099
442	1 450	0,2103
542	1 560	0,2111
850	1 800	0,2095

Таблиця 4

Паливна характеристика дизельного двигуна Cummins QSZ13

Table 4

Fuel characteristics of the Cummins QSZ13 diesel engine

Потужність «на маховику», кВт	Частота обертання, об/хв	Питома витрата пального по кривій BSFC, кг/кВт·год
194	1 000	0,203
259	1 100	0,197
289	1 200	0,194
313	1 300	0,200
337	1 400	0,218
361	1 500	0,202
385	1 600	0,206
409	1 700	0,204
401	1 800	0,211

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

Споживання пального при заряджанні накопичувача енергії визначалося за виразом [13]:

$$G' = g_e E, \qquad (2)$$

де g_e – еквівалентна питома витрата пального, яка може бути прийнятою на 15…20 відсотків вищою за питому витрату пального у режимі, при якому заряджався накопичувач енергії. Для розрахунків прийнято, що заряджання накопичувача здійснюється при потужності дизельного двигуна 350 кВт з питомим споживанням пального 0,202 кг/кВт·год, тому еквівалента питома витрата пального прийнята 0,24 кг/кВт·год; E – енергія, яка споживається при маневрових операціях.

Енергія, яка споживається протягом зміни, може бути визначена за виразом:

$$E = T\left(\alpha_0 P_0 + \sum_{i=1}^{4}\left(\alpha_i P_i\left(1+\beta_i\right)\right)\right). \qquad (3)$$

Наведені вирази дозволяють виконувати обчислення для визначення енергії, яка споживається протягом зміни, та витрати пального за цей період.

Результати

Результати розрахунків витрати пального для випадків безпосереднього живлення навантаження від дизельних двигунів та від накопичувача енергії, які був попередньо заряджений від дизель-генератора, наведено у табл. 5. Відповідно до табл. 5 слідує, найнижчі витрати пального досягаються при використанні двигуна Cummins QSZ13. Це пояснюється нижчими значеннями питомої витрати пального при роботі з потужністю, яка відповідає маневровій роботі. Найвищі показники витрати пального досягаються при живленні тягової систем від накопичувача, який попередньо заряджався від дизельного двигуна. Це є наслідком того, що при процесах заряджання накопичувача та наступного відбору енергії з нього виникають додаткові втрати, що і спричиняє підвищене споживання пального [1]. Однак наявність бортового накопичувача дозволяє акумулювати енергію при електродинамічному гальмуванні. Це призводить до зменшення енергії, якою необхідно зарядити накопичувач від дизель-генератора, а отже і до зменшення витрати дизельного пального.

Втім варто відзначити, що отримані величини витрати пального є достатньо близькими, проте варто очікувати, що при використанні дизельного двигуна зменшеної потужності або гібридної енергетичної установки на його основі витрати на дизельне пальне будуть найнижчими. Для подальшого зниження витрат на паливно-енергетичні ресурси необхідно забезпечити заряджання накопичувача енергії від стаціонарного джерела енергії. На сьогодення вартість однієї кіловат-години електроенергії на промислових підприємствах становить близько 10 грн/кВт·год. А вартість кіловат-години енергії, отриманої від дизель-генератора, оцінюється у 12…14 грн/кВт·год. Тобто заряджання накопичувача енергії від електричної мережі зменшує витрати на близько 20…30%. Іншим аспектом, який виникає при заряджанні накопичувача від стаціонарного джерела електроенергії, є суттєве зменшення викидів CO_2. Середні викиди CO_2 для електроенергії становлять 0,278 кг/кВт·год [2]. При спалюванні одного кілограму дизельного пального виділяється 3,14 кг CO_2. У табл.6 наведено результати розрахунків викидів CO_2 при роботі з дизелем Cummins QSZ13 та у випадку заряджання накопичувача від стаціонарного джерела електроенергії.Як видно з табл. 6, при заряджанні накопичувача від електромережі витрати на електроенергію зменшуються на 30…35 % у порівнянні з витратами на дизельне пальне. Це пояснюється як нижчою вартістю кіловат-години енергії електроенергії, так і підвищеною втратою пального у режимах, близьких до холостого ходу дизель. Зменшення викидів CO_2 становить понад 2,5 рази у порівнянні з викидами при роботі дизельного двигуна. При цьому ємність накопичувача має відповідати споживанню енергії протягом зміни. З урахуванням акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні можна прийняти, що робоча енергоємність накопичувача має становити 500 кВт·год. Таким чином, для зменшення витрат на паливно-енергетичні ресурси при виконанні маневрових операцій необхідно здійснювати живлення систем локомотиву від накопичувача енергії, який був заряджений від джерела з низькою вартістю кіловат-години енергії.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

Разом з тим, локомотив може використовуватися для вивізної роботи. При вивізній роботі гібридна енергетична установка може працювати за такими алгоритмами:

– «ведучий накопичувач – ведений дизель-генератор». При такому алгоритмі живлення на нижчих позиціях контролера машиніста здійснюється від накопичувача енергії. Для збільшення потужності підключається дизель-генератор, внаслідок чого здійснюється спільне живлення навантаження від накопичувача і дизель-генератора;

– «ведучий дизель-генератор – ведений накопичувач». При цьому алгоритмі дизель-генератор завжди здійснює живлення навантаження. При необхідності збільшення потужності підключається накопичувача енергії і здійснюється спільне живлення навантаження від дизель-генератора та накопичувача енергії.

У табл. 7 наведено результати розрахунків витрат на паливно-енергетичні ресурси при різних вказаних алгоритмах роботи гібридної енергетичної установки. Для розрахунків прийнято, що потужність накопичувача енергії становить 350 кВт, а заряджання накопичувача енергії здійснюється від стаціонарного джерела електроенергії.

Таблиця 5

Витрата пального при виконанні маневрових операцій

Table 5

Fuel consumption during maneuvering operations

Параметр	Значення			
	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3	Зміна 4
Енергія, спожита при маневровій роботі, кВт·год	508,1	487,2	396,5	558,6
Витрата дизельного пального при живлення від дизельного двигуна Cummins QST30–L2, кг	118,7	114,8	97,1	129,0
Витрата дизельного пального при живленні від дизельного двигуна Cummins QSZ13, кг	114,2	111,9	92,9	125,5
Витрата дизельного пального для заряджання накопичувача від дизель-генератора з дизельним двигуном Cummins QSZ13, кг	121,9	116,7	95,2	134,1

Таблиця 6

Результати розрахунку вартості паливно-енергетичних ресурсів та викидів CO_2

Table 6

Results of calculating the cost of fuel and energy resources and CO_2 emissions

Параметр	Значення			
	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3	Зміна 4
Cummins QSZ13				
– вартість дизельного пального, грн	7 477,0	7 326,0	6 083,2	8 217,3
– викиди CO_2, кг	358,6	351,4	291,7	394,1
Заряджання накопичувача від електромережі				
– вартість електроенергії, грн	5 081,0	4 872,0	3 965,0	5 586,0
– викиди CO_2, кг	141,2	135,4	110,0	155,3

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

Таблиця 7

Результати розрахунку ємності накопичувача локомотиву для вивізної роботи

Table 7

Results of calculating the capacity of the locomotive storage tank for export work

Параметр	Значення		
	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3
Енергія, спожита системами, кВт·год	864,8	1 228,4	1 031,8
Енергія, яка споживається при потужності меншій 350 кВт, кВт·год	740,2	976,3	849,8
Різниця між загальним споживанням енергії та споживанням енергії на маневрові операції з потужністю не вище 350 кВт, кВт·год	124,6	252,1	182,0
Робота від дизельного двигуна:			
– вартість дизельного пального, грн	10 377,6	14 740,8	12 381,6
– викиди CO_2, кг	597,4	848,6	712,8
«Ведучий дизель генератор-ведений накопичувач», грн			
– вартість паливно-енергетичних ресурсів, грн	10 128,4	14 236,6	12 017,6
– викиди CO_2, кг	557,9	744,5	637,6
«Ведучий накопичувач-ведений дизель-генератор»,			
– вартість паливно-енергетичних ресурсів, грн	8 897,2	12 788,2	10 682,0
– викиди CO_2, кг	291,8	445,2	362,0

З табл.7 слідує, що при алгоритмі «ведучий дизель-генератор – ведений накопичувач» витрати на паливно-енергетичні ресурси практично не змінюються. Для цього алгоритму роботи спостерігається зменшення викидів CO_2 на 6…12 %. Це пояснюється тим, що основним є режим живлення від дизель-генератора, а енергія, яка споживається від накопичувача, становить 14…20 % загального споживання енергії. Зменшенню витрат сприятиме акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні, що зменшить виробництво енергії дизель-генератором. Також доцільне забезпечити живлення систем локомотиву від накопичувача енергії у режимах, в яких дизельний двигуна працює з низькою паливною ефективністю.

При роботі за алгоритмом «ведучий накопичувач – ведений дизель-генератор» зменшення витрат на паливно-енергетичні ресурси становить 12…14 %, а скорочення викидів CO_2 – щонайменше удвічі. Це пояснюється тим, що живлення систем локомотиву здійснюється переважно від накопичувача енергії, який заряджається енергією з нижчою вартістю кіловат-години.

Таким чином, при роботі за алгоритмом «ведучий накопичувач – ведений дизель-генератор» досягаються дещо нижчі витрати на паливно-енергетичні ресурси. Виходячи з вище наведеного, параметри накопичувача енергії для маневрово-вивізного локомотиву раціонально встановлювати за даними маневрового режиму роботи, а саме: потужність – 350 кВт, ємність – 500 кВт·год. На сьогодення накопичувачі енергії створюються з використанням літієвих елементів з високими показниками питомої енергії. Такими елементами є літій-титанат-оксидні (LTO), літій-залізо-фосфатні (LFP) та нікель-кадмієві (NMC) комірки. У табл. 8 наведено розрахунки масо-габаритних параметрів накопичувачів енергії. Розрахунки виконані для комірок LTO SCiB 20Ah [17], CALB L194F130B [8],

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

SVOLT 3.7V 51Ah [16], EVE MB30 [10] відповідно до методики [15]. Вартість комірок визначалася за інформацією з маркетплейсів. Як видно з табл.8, потужність та ємність накопичувача достатньо суттєво перевищують необхідні величини. Це пов'язане з тим, що необхідно забезпечити роботу накопичувача у межах лінійних ділянок розрядно-зарядних характеристик. Цьому відповідає SOC-window 10…90 %, тобто 20 % ємності накопичувача не використовується. Також при розрахунку ємності необхідно враховувати деградацію комірок протягом служби, що призводить до зменшення їх ємності (зазвичай, робиться «запас» у 20 % від робочої енергоємності). Відповідно, на початку експлуатації ємність накопичувача буде вищою, ніж у кінці терміну експлуатації.

З табл. 8 слідує, найбільшу масу та об'єм мають LTO-комірки Toshiba, SCiB 20Ah, найменші – LFP-комірки EVE MB30-комірки CALB L194F130B. Варто відзначити, що накопичувачі енергії з вказаних комірок можуть бути розміщені на локомотиві. Однак ресурс комірок та їх вартість – різна. Для визначення раціонального варіанту доцільно провести оцінку загальної вартість комірок, які необхідно встановити протягом певного терміну служби локомотиву. Розглянемо періоди у 10 та 20 років. При споживанні енергії 500 кВт·год цикл «заряд-розряд» буде відбуватися кожної зміни, тобто за одну добу буде два цикли заряду-розряду. При розрахунках прийнято, що вартість комірок з часом не змінюється і відповідає вартості в момент придбання першого комплект. Результати розрахунків наведено у табл. 9. З табл. 9 слідує, що найменшу загальну вартість мають комплекти комірок EVE MB30. Комірки CALB L194F130B мають дещо вищу вартість, проте при їх використанні потужність накопичувача буде достатня для здійснення вивізних операцій. Крім того, висока потужність накопичувача енергії розширює акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні та зменшує час заряджання від стаціонарного джерела енергії.

Таблиця 8

Масо-габаритні показники накопичувачів

Table 8

Weight and dimensions of storage devices

Параметр	Значення			
	Toshiba SCiB 20Ah	CALB L194F130B	Samsung SDI94 Li Ion 3.7V 94AH	EVE MB30
Тип елементу	LTO	LFP	NMC	LFP
Кількість комірок	19 039	2 088	2 567	870
Ємність, кВт·год	876	868	888	852
Потужність, кВт	819	868	591	426
Маса комірок, кг	9,8	4,9	5,4	4,9
Об'єм комірок, м3	5,2	2,3	2,5	2,2
Діапазон зміни напруги, В	603…517	600…554	604…478	600…552
Ресурс, циклів	20 000	9 000	3 000	8 000
Вартість комірок, тис.євро	476,0	58,8	115,0	50,5

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

Таблиця 9

Результати розрахунків вартості комірок

Table 9

Results of cell cost calculations

Параметр	Значення			
Тип комірки	Toshiba SCiB 20Ah	CALB L194F130B	Samsung SDI94 Li Ion 3.7V 94AH	EVE MB30
Кількість діб до вичерпання ресурсу	10 000	4 500	1600	4 000
Термін служби одного комплекту, роки	27,8	12,5	4,4	11,1
Кількість комплектів для терміну служби 10 років	1	1	3	1
Загальна вартість комплектів комірок за 10 років	476,0	58,5	345,0	50,5
Кількість комплектів для терміну служби 20 років	1	2	5	2
Загальна вартість комплектів комірок за 20 років	476,0	117,0	575,0	101,0

Таким чином, проведені розрахунки показують доцільність застосування plug-in гібридної енергетичної установки на маневрово-вивізному локомотиві, призначеному для експлуатації на промислових підприємствах.

Наукова новизна та практична значимість

У статті обґрунтовано доцільність використання plug-in гібридних енергетичних установок на локомотивах, які використовуються на промислових підприємствах для маневрової та вивізної роботи. Запропоновано методику визначення параметрів елементів plug-in гібридної енергетичної установки на основі аналізу параметрів експлуатаційних режимів, яка може використовуватися для рухомого складу різного призначення.

Висновки

Оновлення локомотивного парку промислових підприємства є важливим для забезпечення стабільного функціонування виробничих процесів. Для уніфікації локомотивного парку раціональним є використання маневрово-вивізних локомотивів.

За результатами розрахунків показано, що зменшення витрат на паливно-енергетичні ресурси можливо досягнути при використанні plug-in гібридних енергетичних установок, в яких накопичувач енергії необхідно заряджати від джерела енергії з низькою вартістю кіловат-години енергії. За результатами розрахунків показано, що це дозволяє зменшити витрати на паливно-енергетичні ресурси на 30…35% у порівнянні з витратами на дизель пальне при виконанні маневрових операцій. Для цього необхідне використання накопичувача енергії потужністю 350 кВт та робочою енергоємністю 500 кВт·год, а живлення тягового електроприводу та допоміжних систем необхідно здійснювати від накопичувача енергії.

Для забезпечення вивізної роботи до складу plug-in гібридної енергетичної установки має входити дизельний двигун потужністю близько 400 кВт. У цьому випадку здійснюється сумісне живлення тягового електроприводу і допоміжних систем, можливе зниження витрат на паливно-енергетичні ресурси може становити 12…14 %.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

За результатами розрахунку масо-габаритних та вартісних показників plug-in накопичувача енергії визначено, що раціональним є використання комірок CALB L194F130B. Загальна вартість комірок для такого накопичувача є однією з найнижчих, а підвищена потужність сприяє розширенню акумулювання енергії, що зменшує її споживання від джерел енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буряковський С. Г., Овер'янова Л. В., Нещерет В. О., Подоляк А. С. Керування plug-in гібридною енергетичною установкою дизель-поїзду. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2024. №2(18). С. 57–62. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.07
2. *Коефіцієнт викидів парникових газів для виробництва та споживання електроенергії* : Аналітичне дослідження та опис методологічного підходу до розрахунку. 2024. 112 с. URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf (дата звернення: 09.11.2025).
3. Модернізація та ремонт. *Миколаївський тепловозоремонтний завод.* URL: https://ntrz.com.ua/modernyzaczyya-y-remont/ (дата звернення: 09.11.2025).
4. Рой С. В., Качан А. В., Тихонов А. С., Якунін Д. І., Рябов Є. С. Застосування тягового електроприводу при модернізації тепловозу ТГМ6. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. № 46. С. 93–102. DOI: https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177
5. Рябов Є. С., Якунін Д. І., Рой С. В., Яготін В. О., Качан А. В. Визначення параметрів plug-in гібридної тягової системи для промислового маневрового локомотиву. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2024. №2(18). С. 63–68. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-774x.2024.02.08
6. *Alstom Platform H3/H4 SBB Aem 940 Lokomotive*. URL: https://tst-suisse.ch/files/folder.78/sbb-aem-940.pdf?utm_source (date of access: 09.11.2025).
7. Brookville Equipment Corporation. *Brookville.* URL: https://www.brookvillecorp.com/products/locomotive/low-zero-emission-locomotive/ (date of access: 09.11.2025).
8. CALB L194F130B 3.2V 130Ah LiFePO4 Battery Cell. *Evlithium.* URL: https://www.evlithium.com/CALB_Battery/calb-l194f130b-130ah-lifepo4-battery-cell.html (date of access: 09.11.2025).
9. Diesel Locomotives. *Express Service*. URL: https://lz1866.com/diesel-locomotives#mdd5 (date of access: 10.01.2026).
10. EVE MB30 3.2V 306Ah LiFePO4 Battery Cell for ESS. *Evlithium.* URL: https://www.evlithium.com/LiFePO4-Battery/eve-mb30-306ah-lifepo4-battery-cell.html (date of access: 09.11.2025).
11. Hybrid Locomotives: Locomotive System:Information System. Railway Systems. *Toshiba*. URL: https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/railway/locomotives/hybrid.html (date of access: 09.11.2025).
12. Kinoshita H., Ogawa K. Series Hybrid Locomotive Equipped with Energy-Saving Electrical Equipment for European Market. *TOSHIBA REVIEW.* Vol. 76, No. 4. July 2021. p. 1–5. URL: https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/Toshiba%20Review%20(Hybrid%20Locomotive).pdf (date of access: 09.11.2025).
13. New Energy Locomotive. *CRRC Ziyang Co., Ltd*. URL: https://www.crrcgc.cc/zyjcen/173_11506/173_11515/173_19725/index.html (date of access: 09.11.2025).
14. R. J. Corman Railroad Group. *Rjcorman*. URL: http://www.rjcorman.com/ (date of access: 10.01.2026).
15. Riabov I., Kachan A. Selection of energy storage for an industrial battery locomotive. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. 105881. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105881
16. Svolt 3.7V 51ah lithium ternary PHEV prismatic Battery cell. *Evlithium*. URL: https://www.evlithium.com/nmc-battery/svolt-51ah-lithium-ternary-phev-battery.html (date of access: 09.11.2025).
17. TOSHIBA SCIB 20Ah LTO Battery Cell. *Evlithium.* URL: https://www.evlithium.com/Lithium-Titanate-Battery-LTO/scib-20ah-lto-battery-cell.html (date of access: 09.11.2025).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

18. Traxx Shunter locomotives: Modularity and tractive effort. *Alstom.* URL: https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/locomotives/traxx-shunter-locomotives-modularity-and-tractive-effort (date of access: 09.11.2025).
19. TRM NRE Locomotives, Locomotive Leasing, Repairs, Overhauls. *NRE – Moving Forward*. URL: https://nre.com/ (date of access: 09.11.2025).

S. V. ROI[1,2], Ye. S. RIABOV[3*]

[1]Mykolaiv Locomotive Repair Plant LLC, Znamyanska St., 16-A, Mykolaiv, Ukraine, 54037, tel. +38 (0512) 70 99 70, e-mail Serhii.Roi@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0009-0610-308X
[2]Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail Serhii.Roi@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0009-0610-308X
[3*]Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 302 14 54, e-mail riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

Determination of Parameters for Plug-in Hybrid Power Plant for a Shunting and Haulage Locomotive for Industrial Enterprises

Purpose. The purpose of the article is to determine the parameters of a plug-in hybrid power plant for a shunting and haulage locomotive for industrial enterprises. **Methodology.** An analysis of the parameters of the operating modes of diesel locomotives used for shunting operations and haulage work at domestic industrial enterprises was carried out. Data from the on-board systems of diesel locomotives operated by PJSC Poltava Mining and Processing Plant and PJSC DTEK Pavlogradvuhillya were used for the analysis. **Finding.** It was determined that during shunting operations, energy consumption does not exceed 600 kWh at a maximum power of 350 kW. During haulage operations, energy consumption is 850–1200 kWh at a maximum power of 650 kW. A comparison of fuel consumption, fuel and energy costs, and CO2 emissions for different power plant options was carried out. The fuel characteristics of Cummins QST30–L2 diesel engines with a power of 895 kW and Cummins QSZ13 diesel engines with a power of 401 kW were used for a comparative assessment of hybrid power plant options. It was found that it is rational to use plug-in power plants in which the energy storage device must be charged from an energy source with a low cost per kilowatt-hour of energy. This allows reducing fuel and energy costs by 30–35% compared to diesel fuel costs when performing maneuvering operations. To ensure export operation, the plug-in hybrid power plant must include a diesel engine with a capacity of about 400 kW. In this case, the traction electric drive and auxiliary systems are powered jointly, and the possible reduction in fuel and energy costs can be 12–14%. It has been shown that the type of storage cell should be selected taking into account their service life. For the plug-in power plant under study, it is rational to use CALB L194F130B lithium iron phosphate cells. **Originality.** The use of a plug-in hybrid power plant on shunting and haulage locomotives used in industrial enterprises has been justified, and the parameters of the power plant have been determined. **Practical value.** The results obtained can be used in the creation of hybrid power units for shunting and haulage locomotives for industrial enterprises. The proposed method for determining the parameters of a hybrid power unit can be used for other rolling stock.

Keywords: plug-in hybrid traction system; diesel engine; energy storage; traction electric drive; energy efficiency; rolling stock; locomotive

REFERENCE

1. Buriakovskyi, S. H., Overianova, L. V., Neshcheret, V. O., & Podoliak, A. S. (2024). Control of the plug-in hybrid power unit ofdemu. *NTU «KhPI» Bulletin: Power and heat engineering processes and equipment*, *2(18)*, 57-62. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.07 (in Ukrainian)
2. *Koefitsiient vykydiv parnykovykh haziv dlia vyrobnytstva ta spozhyvannia elektroenerhii* : Analitychne doslidzhennia ta opys metodolohichnoho pidkhodu do rozrakhunku. Retrieved from https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf (in Ukrainian)
3. Modernizatsiia ta remont. *Mykolaivskyi teplovozoremontnyi zavod.* Retrieved from https://ntrz.com.ua/modernyzaczyya-y-remont/ (in Ukrainian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

4. Roi, S. V., Kachan, A. V., Tykhonov, A. S., Iakunin, D. I., & Riabov, Ye. S. (2023). Application of electric traction drive for the modernization of locomotives with hydraulic power transmission. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences, 46,* 93-102. DOI: https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177 (in Ukrainian)
5. Riabov, I., Iakunin, D., Roi, S., Yahotin, V., & Kachan, A. (2024). Determination of Parameters for a Plug-In Hybrid Traction System for an Industrial Shunting Locomotive. *NTU «KhPI» Bulletin: Power and Heat Engineering Processes and Equipment, 2(18)*, 63-68. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.08 (in Ukrainian)
6. *Alstom Platform H3/H4 SBB Aem 940 Lokomotive*. URL: https://tst-suisse.ch/files/folder.78/sbb-aem-940.pdf?utm_source (in English)
7. Brookville Equipment Corporation. *Brookville.* URL: https://www.brookvillecorp.com/products/locomotive/low-zero-emission-locomotive/ (in English)
8. CALB L194F130B 3.2V 130Ah LiFePO4 Battery Cell. *Evlithium.* URL: https://www.evlithium.com/CALB_Battery/calb-l194f130b-130ah-lifepo4-battery-cell.html (in English)
9. Diesel Locomotives. *Express Service*. URL: https://lz1866.com/diesel-locomotives#mdd5 (in English)
10. EVE MB30 3.2V 306Ah LiFePO4 Battery Cell for ESS. *Evlithium.* URL: https://www.evlithium.com/LiFePO4-Battery/eve-mb30-306ah-lifepo4-battery-cell.html (in English)
11. Hybrid Locomotives: Locomotive System:Information System. Railway Systems. *Toshiba*. URL: https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/railway/locomotives/hybrid.html (in English)
12. Kinoshita, H., & Ogawa, K. (2021). Series Hybrid Locomotive Equipped with Energy-Saving. Electrical Equipment for European Market. *TOSHIBA REVIEW, 76*(4), 1-5 URL: https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/Toshiba%20Review%20(Hybrid%20Locomotive).pdf (in English)
13. New Energy Locomotive. *CRRC Ziyang Co., Ltd*. URL: https://www.crrcgc.cc/zyjcen/173_11506/173_11515/173_19725/index.html (in English)
14. R. J. Corman Railroad Group. *Rjcorman*. URL: http://www.rjcorman.com/ (in English)
15. Riabov, I. & Kachan, A. (2025). Selection of energy storage for an industrial battery locomotive. *Results in Engineering*, *27*, 105881. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105881 (in English)
16. Svolt 3.7V 51ah lithium ternary PHEV prismatic Battery cell. *Evlithium*. URL: https://www.evlithium.com/nmc-battery/svolt-51ah-lithium-ternary-phev-battery.html (in English)
17. TOSHIBA SCIB 20Ah LTO Battery Cell. *Evlithium.* URL: https://www.evlithium.com/Lithium-Titanate-Battery-LTO/scib-20ah-lto-battery-cell.html (in English)
18. Traxx Shunter locomotives: Modularity and tractive effort. *Alstom.* URL: https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/locomotives/traxx-shunter-locomotives-modularity-and-tractive-effort (in English)
19. TRM NRE Locomotives, Locomotive Leasing, Repairs, Overhauls. *NRE – Moving Forward*. URL: https://nre.com/ (in English)

Надійшла до редколегії: 10.11.2025
Дата рецензування: 18.12.2025
Дата публікації: 26.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353407
© С. В. Рой, Є. С. Рябов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК [656.216.2:656.13]-026.87

М. Б. КУРГАН[1*], Р. В. ІВАНОВ[2]

[1*]Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта m.b.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8182-7709
[2]Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

Комплексна оцінка небезпеки перетинів в одному рівні залізниці й автомобільної дороги з урахуванням когнітивного фактору

Мета. Створення діагностичної системи оцінки небезпеки залізничних переїздів, яка базується на багатофакторному аналізі ризику в межах структурованої системи критеріїв. Для досягнення поставленої мети проведено аналіз вітчизняних і міжнародних нормативних документів, що регламентують проєктування та експлуатацію переїздів в одному рівні залізниці й автомобільної дороги, а також оцінено їхні експлуатаційні та економічні характеристики. **Методика.** Запропонована методика спрямована на підвищення деталізації та інформативності оцінки небезпеки на етапі практичного застосування. Діагностична цінність методики полягає в створенні підґрунтя для планування адресних, цільових заходів безпеки, спрямованих на усунення конкретних факторів небезпеки. Показано, що включення когнітивного фактору забезпечує більш точне ранжування переїздів і створює підґрунтя для обґрунтування адресних заходів підвищення безпеки руху. **Результати.** Перевірка методики показала, що врахування когнітивного фактору помітно впливає на загальну оцінку небезпеки та змінює порядок розташування переїздів за рівнем ризику. Встановлено, що підвищений ризик пов’язаний не лише з інтенсивністю руху, а й із надмірною кількістю інформації та суперечливими сигналами. Отримані результати підтверджують доцільність цільових заходів із вдосконалення роботи сигналізації та зменшення візуальних перешкод без значних фінансових витрат. **Наукова новизна.** Вперше розроблено багатофакторну методику оцінки когнітивної небезпеки на залізничних переїздах, що ґрунтується на інтеграції психофізіологічних факторів водія (когнітивне навантаження, когнітивний дисонанс, втома) у систему розрахунку загального ризику. На відміну від існуючих нормативних підходів, запропонована методика дозволяє діагностувати конкретні причини когнітивного ризику та визначати пріоритетність цільових заходів, спрямованих на зниження ймовірності помилки водія. **Практичне значення.** В умовах, коли фізичні параметри залізничного переїзду (кількість колій, просторове розташування, тип покриття, наявність та тип сигналізації) є технічно або економічно складними для зміни, методика пропонує інструмент оптимізації інформаційного середовища в межах існуючої інфраструктури. Це дозволяє вирішувати аспекти безпеки руху, які не охоплюються чинними нормативними документами.

Ключові слова: залізничний переїзд; безпека руху; діагностування; когнітивна небезпека; когнітивний дисонанс; психофізіологічні фактори

Вступ

Залізничні переїзди залишаються одними з найбільш небезпечних елементів транспортної інфраструктури, оскільки поєднують у межах одного простору рух залізничного та автомобільного транспорту [5, 6]. Чинні нормативні підходи до класифікації та оцінювання небезпеки переїздів базуються переважно на показниках інтенсивності руху поїздів і транспортних засобів [6, 7] та не враховують у повному обсязі вплив поведінкових і когнітивних особливостей водія [9]. Практика експлуатації свідчить, що

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

значна частина дорожньо-транспортних пригод на залізничних переїздах зумовлена не лише інтенсивністю руху, а й особливостями сприйняття інформації, когнітивним навантаженням, наявністю суперечливих сигналів та втомою водіїв [10, 15].

У зв'язку з цим актуальним є розвиток існуючих методик у напрямку багатофакторних моделей, які дозволяють не лише визначати рівень ризику, але й діагностувати причини їх формування [11]. Особливої актуальності такі підходи набувають для об'єктів інфраструктури з високим класом наслідків (СС3), де навіть одинична помилка водія може призвести до значних матеріальних та соціальних втрат [3].

Методи оцінки економічної ефективності інвестицій широко застосовуються для вирішення завдань, що виникають під час формування перспективних планів розвитку залізничного транспорту, обґрунтування інвестиційних проєктів на предпроєктному етапі, підготовки проєктно-кошторисної документації, а також при оцінюванні ефективності впровадження інновацій у галузі та залученні інвестиційних ресурсів.

Ефективність проєктних рішень традиційно визначається за допомогою показників загальної та порівняльної ефективності інвестиційних витрат. Водночас зазначені підходи орієнтовані переважно на економічні критерії та не враховують у повному обсязі фактори безпеки руху, зокрема пов'язані з поведінкою та когнітивним навантаженням учасників дорожнього руху на залізничних переїздах. У зв'язку з цим виникає необхідність розвитку класичних методів економічної оцінки в напрямку багатокритеріальних моделей, які дозволяють одночасно враховувати інвестиційні витрати, експлуатаційні показники та безпекові чинники.

Для досягнення поставленої мети проведено аналіз вітчизняних і міжнародних нормативних документів щодо проєктування та експлуатації переїздів в одному рівні, а також оцінено їх експлуатаційні й економічні характеристики [14].

Мета

Мета роботи полягає у створенні діагностичної системи оцінки небезпеки залізничних переїздів, що базується на багатофакторній оцінці ризику в межах структурованої системи критеріїв, та розроблення комплексної методики оцінювання небезпеки залізничних переїздів з урахуванням когнітивних факторів водія. Для досягнення мети у роботі поставлено такі завдання:

– проаналізувати обмеження існуючих підходів до оцінювання небезпеки переїздів;

– розробити інтегральну багатофакторну модель оцінювання ризику;

– сформувати систему критеріїв когнітивної небезпеки;

– запропонувати класифікацію рівнів когнітивного ризику.

Методика

Більшість існуючих методик оцінювання небезпеки залізничних переїздів базуються на двох основних групах показників: МСЗ – соціально-економічна значущість переїзду і КД – динамічний ризик, зумовлений інтенсивністю руху.

У даній роботі пропонується розширити інтегральний індекс небезпеки шляхом введення третього зваженого компонента – коефіцієнта когнітивної небезпеки.

Запропонована методика спрямована на підвищення комплексності та деталізації оцінки небезпеки на етапі практичного застосування. Діагностична цінність методики полягає в можливості не лише визначати рівень ризику, а й ідентифікувати його першопричини, що дозволяє обґрунтовувати цільові та ефективні заходи з підвищення безпеки руху.

Під когнітивно-дистанційною моделлю у роботі розглядається модель оцінювання ризику, що враховує зміну когнітивного навантаження водія залежно від просторових параметрів переїзду та інтенсивності інформаційних стимулів.

Інтегральна значимість залізничного переїзду в транспортній мережі визначається на основі сукупності соціально-економічних і транспортних факторів, наведених у табл. 1.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Таблиця 1

Фактори, що впливають на значимість переїзду

Table 1

Factors influencing the significance of relocation

Номер	Показник	Приклад оцінювання
1	Інтенсивність автомобільного руху (авт/добу)	>5000 авто – 5 балів; <500 – 1 бал
2	Інтенсивність залізничного руху (поїзди/добу)	>80 – 5 балів; <10 – 1 бал
3	Категорія дороги (державна, місцева)	державна – 5; місцева – 2
4	Наявність об'їзду	немає – 5; є – 1
5	Соціально-економічна значущість (зв'язок з містами, портами, промзонами)	висока – 5; низька – 1

1. *МСЗ – нормована соціально-економічна значущість переїзду*. Соціально-економічна значущість переїзду визначається як зважена сума бальних оцінок окремих критеріїв (інтенсивність руху, категорія дороги, наявність об'їзду, соціальна роль тощо) з подальшим нормуванням до інтервалу [0; 1]

Нехай МСЗ – нормована соціально-економічна значущість, S_i – бальна оцінка і-го критерію значущості (табл. факторів), а w_i – його вага, $\sum w_i = 1$. Тоді:

$$MSZ_{(1-5)} = \sum_{i=1}^{m} w_i S_i , \qquad (1)$$

де m — кількість критеріїв (наприклад, інтенсивність авто/залізн. руху, категорія дороги, наявність об'їзду, соціально-економічна роль тощо).

Провівши нормування до інтервалу [0, 1], отримаємо:

$$MSZ = \frac{\sum_{i=1}^{m} w_i S_i - 1}{4}, \qquad (1, a)$$

За результатами оцінювання визначається міра ступеня значимості переїзду *MSZ*, (формула 1, *а*):

– 1 – 2 – малозначимі переїзди місцевого значення;

– 3 – 4 – переїзди середньої важливості;

– 5 – стратегічно важливі або вузлові переїзди.

2. *КД – нормований коефіцієнт динамічності руху*. Коефіцієнт динамічності руху характеризує інтенсивність взаємодії автомобільного та залізничного потоків і визначається на основі добової інтенсивності руху з подальшим нормуванням. Базовий коефіцієнт динамічності КД* характеризує інтенсивність взаємодії автомобільного та залізничного потоків і визначається через добову інтенсивність руху з подальшим нормуванням за формулою:

$$KD^* = \frac{N_{авт} \cdot N_{поїз}}{10^4}, \qquad (2)$$

де $N_{авт}$ – кількість транспортних засобів за добу; $N_{поїз}$ – кількість поїздів за добу.

3. Отримане значення нормується до шкали 1–10 відповідно до табл. 2.

Відповідно до шкали, використаної в табл. 2:

$$KD = \frac{K_D^* - K_{D,\min}^*}{K_{D,\max}^* - K_{D,\min}^*} \quad (2, a)$$

де $K_{D,\min}^*, K_{D,\max}^*$ беруться з вибірки досліджуваних переїздів або з нормативно заданих меж.

Зростання коефіцієнта динамічності призводить до підвищення когнітивного навантаження водія, збільшення часу прийняття рішень та ймовірності помилок, що є критичним для переїздів з високим класом наслідків (СС3).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

Таблиця 2

Рівні динамічності залізничного переїзду

Table 2

Levels of dynamism of a railroad crossing

Рівень	Характеристика	Опис
1–2	Дуже низький	Малий рух, незначна взаємодія
3–4	Низький	Поодинокі конфліктні ситуації
5–6	Середній	Періодичне блокування руху
7–8	Високий	Часте накладання транспортних потоків
9–10	Дуже високий	Постійна напруженість руху, критичний рівень ризику

Клас наслідків є характеристикою рівня можливої небезпеки для життя і здоров'я людей, а також обсягів матеріальних або соціальних втрат у разі порушення чи припинення експлуатації об'єкта. В Україні встановлено три класи наслідків: CC1 – незначні, CC2 – середні, CC3 – значні. Для об'єктів швидкісного залізничного транспорту характерним є найвищий клас наслідків – CC3, що зумовлює підвищені вимоги до безпеки та надійності інфраструктури.

3. $I_{когн}$ *– нормований коефіцієнт когнітивної небезпеки.* Сумарний коефіцієнт когнітивної небезпеки визначається на основі багатофакторної оцінки психофізіологічних умов сприйняття водієм інформації на переїзді:

$$KD_{COG} = \sum_{j=1}^{n} w_j k_j , \qquad (3)$$

де k_j – бальна оцінка j-го когнітивного критерію (1–5); w_j – ваговий коефіцієнт критерію; $\sum w_j = 1$; n – кількість когнітивних критеріїв.

Нормування [0; 1]:

$$I_{когн} = \frac{K_{COG(1–5)} - 1}{4} . \qquad (4)$$

Поглиблений аналіз показав, що використання одного узагальненого коефіцієнта когнітивної небезпеки k_j не забезпечує достатньої діагностичної точності. Тому у роботі застосовано багатофакторну оцінку, яка дозволяє перейти від формальної оцінки до ідентифікації першопричин ризику. Формування критеріїв когнітивної небезпеки здійснюється за схемою, наведеною в табл. 3

У прикладі оцінювання (табл. 3) застосовується розширена система з п'яти критеріїв (включаючи k_{cd}, k_{ck} …), кожен з яких має свою вагу (w_i) та отриману оцінку (від 1 до 5).

Для знаходження сумарного балу (загального коефіцієнта KD_{COG}) виконується підсумовування зважених балів:

$$K = (5 \cdot 0{,}25 + (4 \cdot 0{,}25) + (3 \cdot 0{,}20) + $$
$$+ (4 \cdot 0{,}15) + (2 \cdot 0{,}15)$$
$$K = 1{,}25 + 1{,}00 + 0{,}60 + 0{,}60 + 0{,}30$$
$$K = 3{,}75$$

Отриманий загальний бал 3,75 відповідає 4 рівню небезпеки – «високий». Це свідчить про те, що даний об'єкт має значний когнітивний ризик, спричинений високою оцінкою Когнітивного дисонансу (5) та Когнітивного навантаження (4). На основі цього робиться рекомендація щодо необхідності підвищення інформаційної підтримки або модернізації сигналізації.

4. I_{Σ}^{COG} *– інтегральний індекс небезпеки з урахуванням когнітивного фактору.* Підсумковий індекс небезпеки, значення якого наведені в таблиці, визначається як лінійна згортка нормованих компонентів:

$$I_{\Sigma}^{COG} = w_{MSZ} \cdot MSZ + w_{KD} \cdot KD + $$
$$+ w_{COG} \cdot I_{когн} , \qquad (5)$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

де I_{Σ}^{COG} – підсумковий індекс небезпеки у когнітивно-дистанційній моделі; I_{cog} – коефіцієнт когнітивної небезпеки, нормований до шкали [0; 1]; w_{MSZ}, w_{KD}, w_{COG} – вагові коефіцієнти факторів; за умови $w_{MSZ}, w_{KD}, w_{COG} \geq 0$ і $w_{MSZ} + w_{KD} + w_{COG} = 1$.

У розрахунках, наведених у таблиці результатів, використовувалося співвідношення ваг: $w_{MSZ} = 0,30$, $w_{KD} = 0,40$, $w_{COG} = 0,30$.

Таблиця 3

Формування критеріїв когнітивної небезпеки залізничного переїзду

Table 3

Formulation of criteria for cognitive danger at railroad crossings

№	Критерій оцінювання	Опис показника	Оцінка	Вага, w_i	Зважений бал
1	Когнітивний дисонанс k_{cd}	Суперечливі або неоднозначні сигнали	5	0,25	1,25
2	Когнітивне навантаження k_{ck}	Інтенсивність інформаційних стимулів	4	0,25	1,00
3	Когнітивна наочність k_{cn}	Видимість і зрозумілість сигналів	3	0,20	0,60
4	Когнітивна втома k_{cf}	Тривалість очікування	4	0,15	0,60
5	Інформаційна підтримка k_{ci}	Додаткові засоби інформування	2	0,15	0,30
	Підсумок:			1.00	**3,75**

Клас ризику залізничного переїзду встановлюється відповідно до інтервалів значень інтегрального індексу I_{Σ}^{COG} (див. табл. 4).

Класифікація рівнів когнітивної небезпеки залізничних переїздів за сумарним зваженим балом ґрунтується на логічному поділі шкали, типовому для експертних систем багатофакторного оцінювання ризику. Оскільки окремі критерії оцінюють за шкалою 1–5, сумарний зважений бал KD_{COG} в інтервалі 1,00 (мінімальний ризик) – 5,00 (максимальний ризик). Загальний діапазон значень поділено на п’ять інтервалів (табл. 4). Межі інтервалів сформовано на основі рівномірного поділу шкали з експертним коригуванням, що враховує нелінійне зростання ризику у зоні високих значень.

Запропонована класифікація дозволяє ідентифікувати домінуючі чинники ризику та обґрунтовувати пріоритетність заходів безпеки. За наведеним прикладом K = 3,75 відповідає IV рівню (високий), що вказує на необхідність першочергових заходів зі зниження когнітивного ризику.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

Таблиця 4

Класифікація рівнів когнітивної небезпеки за сумарним балом

Table 4

Classification of cognitive risk levels based on total score

Рівень	Назва рівня	Діапазон KD_{COG}	Характеристика
I	Низький	1,00 – < 2,00	Прийнятний рівень когнітивного навантаження
II	Помірний	2,00 – < 3,00	Збалансований ризик, можливі локальні корективи
III	Підвищений	3,00 – < 3,50	Ризик помітний, потрібне планування заходів
IV	Високий	3,50 – < 4,50	Значний ризик, потрібне першочергове втручання
V	Критичний	4,50 – 5,00	Неприйнятний рівень небезпеки

Діагностика ключових факторів когнітивного ризику. Перевагою багатофакторної моделі є можливість визначити домінуючі причини високого значення . Для розглянутого прикладу найбільший внесок у сумарний бал формують два критерії:

1. *Когнітивний дисонанс (k_{cd}),* зважений внесок 1,25 (оцінка 5). Це означає наявність критичних суперечливих або неоднозначних стимулів (наприклад, активна сигналізація за відсутності візуального підтвердження наближення поїзда, суперечливі знаки, «візуальний шум»). Дисонанс підвищує ймовірність помилки через сумніви у достовірності сигналів та затримку реакції.

2. *Когнітивне навантаження (k_{ck}),* зважений внесок 1,00 (оцінка 4). Висока інтенсивність стимулів (шум, вібрації, надлишкова кількість об’єктів/сигналів) ускладнює оброблення інформації, збільшує імовірність пропуску важливого сигналу та прискорює настання втоми. Окремо виділяється критерій, оптимізація якого дає оперативне зниження ризику та належить до першочергових заходів швидкого впровадження**.**

3. *Інформаційна підтримка (k_{ci}),* зважений внесок 0,30 (оцінка 2). Низький рівень додаткових засобів інформування (табло, голосові повідомлення, динамічна інформація) не компенсує високий дисонанс і навантаження. Підвищення інформаційної підтримки може забезпечити відносно швидке зниження інтегрального когнітивного ризику без капітальних змін інфраструктури.

Узагальнення. Високе значення K у даному прикладі є результатом поєднання критичного дисонансу та високого навантаження, які не компенсуються достатньою інформаційною підтримкою

Результати

Застосування запропонованої методики виконано для низки залізничних переїздів регіональної філії «Придніпровська залізниця». Результати розрахунків показали, що включення когнітивного фактора суттєво впливає на інтегральну оцінку небезпеки та дозволяє виявляти об’єкти з підвищеним ризиком навіть за помірних значень динамічності руху.

Нормовані показники соціально-економічної значущості МСЗ, динамічності руху КД та когнітивної небезпеки I_{cog} визначалися в інтервалі [0; 1]. Інтегральний індекс небезпеки з урахуванням когнітивного фактора обчислювався за формулою (5). Клас ризику встановлювали відповідно до прийнятих інтервалів значень: w_{MSZ} =0,30 (значущість), w_{KD} =0,40 (динамічний ризик), w_{COG} = 0,30 (когнітивний фактор). Тоді для переїзду Дніпро–Чаплине:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

$$I_{\Sigma}^{COG} = 0,30 \cdot 0,80 + 0,40 \cdot 0,85 + \\ +0,30 \cdot 0,72 = 0,796$$

Результати комплексної оцінки небезпеки залізничних переїздів, що розташовані на різних напрямках регіональної філії «Придніпровська залізниця» наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати комплексної оцінки небезпеки залізничних переїздів

Table 5

Results of a comprehensive assessment of the dangers of railroad crossings

№	Назва переїзду	МСЗ	КД	$I_{когн}$	I_{Σ}^{COG}	Клас ризику
1	Дніпро – Чаплине	0,80	0,85	0,72	0,80	Високий
2	Наумівка – Севастополь	0,90	0,95	0,60	0,83	Високий
3	П’ятихатки – Дніпро	0,75	0,70	0,55	0,67	Підвищений
4	Лозова – Синельникове	0,65	0,40	0,35	0,46	Помірний

Відповідно до табл. 5 переїзди на напрямках Дніпро – Чаплине та Наумівка – Севастополь за результатами оцінювання віднесено до високого класу ризику, що зумовлено поєднанням високого когнітивного дисонансу та значного когнітивного навантаження водіїв. Отримані результати свідчать про доцільність першочергового впровадження адресних заходів, спрямованих на оптимізацію інформаційного середовища та зниження ймовірності помилкових рішень.

Для наочності на рис. 1 наведена інтегральна оцінка небезпеки залізничних переїздів з урахуванням когнітивного фактору.

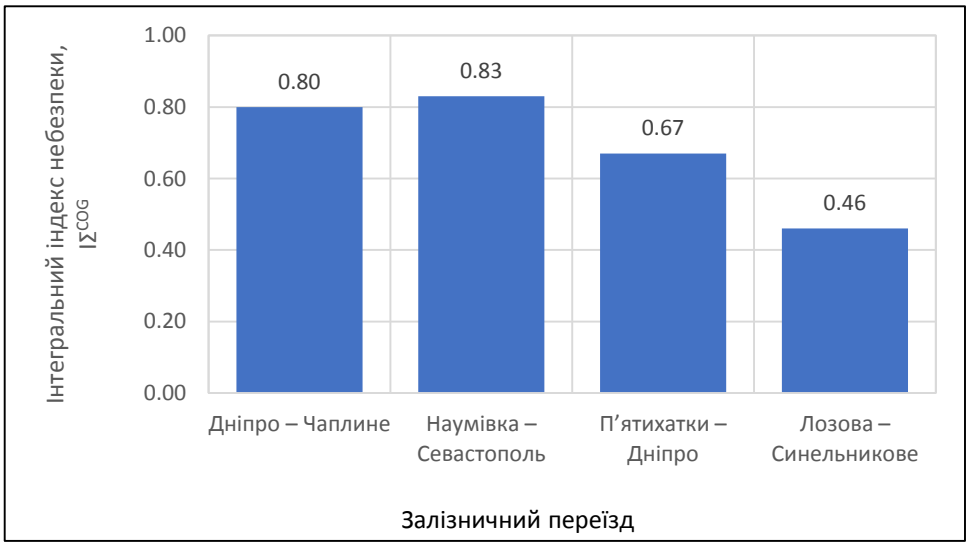


Рис. 1. Інтегральна оцінка небезпеки залізничних переїздів з урахуванням когнітивного фактору

Fig. 1. Integrated assessment of the danger of railroad crossings, taking into account the cognitive factor

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

Запропонована багатофакторна модель оцінювання небезпеки розширює традиційні нормативні підходи та дозволяє враховувати когнітивний фактор як один із ключових елементів системи безпеки руху на залізничних переїздах. На відміну від існуючих методик, що оперують обмеженою кількістю формальних показників, розроблений підхід забезпечує перехід від формального ранжування об'єктів до діагностики конкретних причин ризику.

Результати дослідження підтверджують, що значна частина небезпечних ситуацій формується внаслідок перевантаження інформаційного середовища та наявності суперечливих сигналів, а не виключно через інтенсивність руху. Це створює передумови для реалізації ефективних заходів безпеки без суттєвих капітальних витрат шляхом удосконалення логіки сигналізації, підвищення наочності та зменшення візуального шуму.

Застосування багатофакторної класифікації дозволяє перейти від формального ранжування переїздів до діагностики конкретних причин ризику, що є принципово важливим для обґрунтування адресних заходів безпеки. При цьому значна частина таких заходів може реалізовуватися без суттєвих капітальних витрат, шляхом оптимізації інформаційного середовища, уніфікації сигналів та усунення візуального шуму.

Запропонований підхід узгоджується з чинними національними та європейськими принципами безпеки транспортної інфраструктури [13, 16] та не суперечить вимогам до технічних систем керування рухом, доповнюючи їх у частині взаємодії з учасниками дорожнього руху [8, 10].

Подальші дослідження доцільно спрямувати на валідацію запропонованої моделі на основі статистичних даних про дорожньо-транспортні пригоди на залізничних переїздах, уточнення вагових коефіцієнтів когнітивних критеріїв із застосуванням методів експертного оцінювання та аналізу ієрархій [4].

Наукова новизна й практична значимість

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше запропонована багатофакторна методика оцінювання когнітивної небезпеки на залізничних переїздах, яка ґрунтується на інтеграції психофізіологічних факторів водія у систему розрахунку загального ризику. Розроблений підхід дозволяє діагностувати першопричини формування небезпечних ситуацій та обґрунтовувати пріоритетність цільових заходів з підвищення безпеки руху.

Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості застосування запропонованої методики для оптимізації інформаційного середовища залізничних переїздів в межах існуючої інфраструктури, що є особливо актуальним за умов обмежених фінансових ресурсів та високого класу наслідків об'єктів.

Висновки

1. Проаналізовано обмеження існуючих нормативних підходів до оцінювання небезпеки залізничних переїздів, які базуються переважно на показниках інтенсивності руху та не враховують поведінкові й когнітивні чинники водія.
2. Запропоновано багатокритеріальну модель оцінювання небезпеки переїздів, що є розвитком класичної концепції приведених витрат і адаптована до об'єктів інфраструктури з високим класом наслідків (СС3).
3. Розроблено систему критеріїв когнітивної небезпеки та класифікацію рівнів когнітивного ризику, що дозволяє ідентифікувати домінуючі чинники формування небезпечних ситуацій.
4. Показано, що включення когнітивного фактора до інтегрального індексу небезпеки забезпечує більш точне ранжування залізничних переїздів та підвищує обґрунтованість планування адресних заходів з підвищення безпеки руху.
5. Запропонована класифікація рівнів когнітивної небезпеки дозволяє не лише визначати клас ризику, але й ідентифікувати домінуючі фактори, що формують небезпечний стан конкретного переїзду.
6. Отримані результати підтверджують доцільність використання когнітивних критеріїв у системах управління безпекою залізничних переїздів та можуть бути використані при розробленні національних нормативних документів і стандартів.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *ДСТУ 4100:2021. Безпека дорожнього руху. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування.* [Чинний від 2021-11-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 144 с.
2. *ДСТУ 2587:2021. Безпека дорожнього руху. Розмітка дорожня. Загальні технічні умови*. [Чинний від 2021-08-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 102 с.
3. *ДСТУ 8855:2019. Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності)*. [Чинний від 2019-12-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 17 с.
4. Курган М. Б., Лужицький О. Ф., Іванов Р. В., Хмелевська Н. П., Хмелевський В. С. Упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1(105). С. 62–83. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2024/303191
5. *Про затвердження Інструкції з улаштування та експлуатації залізничних переїздів* : Наказ М-ва трансп. та зв'язку України від 26.01.2007 № 54 : станом на 15 квіт. 2011 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0162-07#Text
6. *Про затвердження Правил технічної експлуатації залізниць України* : Наказ М-ва трансп. України від 20.12.1996 № 411 : станом на 14 листоп. 2025 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97#Text
7. *Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту* : Постанова Каб. Міністрів України від 11.07.2013 № 494 : станом на 3 трав. 2025 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-п#Text
8. Commission Implementing Regulation (EU) 2023/1695 of 10 August 2023. TSI CCS – Control, Command and Signalling. *Official Journal of the European Union*. 2023. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1695/oj
9. Fischer S., Kurhan M., Kurhan D. Innovative Technologies and Cognitive Factors for Enhancing Safety of Train and Car Movement at Level Crossings. *Proceedings of the 3rd Cognitive Mobility Conference (COGMOB 2024).* 2024. P. 1–13. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81799-1_1
10. Human factors in railway safety. ERA Report. *European Union Agency for Railways*. Valenciennes, 2018.
11. *ISO 31000:2018. Risk management. Guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
12. *ISO 9241-210:2019. Ergonomics of human-system interaction. Part 210: Human-centred design for interactive systems.* Geneva: International Organization for Standardization, 2019. 13 p.
13. Kyriakidis M., Pak K. T., Majumdar A. Railway Accidents Caused by Human Error: Historic Analysis of UK Railways, 1945 to 2012. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2015. Vol. 2476, Iss. 1. P. 98–107. DOI: https://doi.org/10.3141/2476-17
14. Road Safety Annual Report 2024. *International Transport Forum*. 2024. 82 p. URL: https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/irtad-road-safety-annual-report-2024.pdf
15. Stanton N. A., Salmon P. M., Rafferty L. A., Walker G. H., Baber C., Jenkins D. P. *Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design*. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2017. 656 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781315587394
16. UIC Safety Level Crossing Index. *International Union of Railways (UIC)*. Paris : UIC, 2016.

M. B. KURHAN[1*], R. V. IVANOV[2]

[1*]Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail m.b.kurhan@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8182-7709
[2]Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

Comprehensive Hazard Assessment of Railway–Road Level Crossings Considering the Cognitive Factor

Purpose. The purpose of the study is to develop a diagnostic system for assessing the hazard level of railway level crossings based on a multifactor risk analysis within a structured set of criteria. To achieve this purpose, domestic and international regulatory documents governing the design and operation of at-grade railway–road crossings were reviewed, and their operational and economic characteristics were assessed. **Methodology**. The proposed methodology

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

is aimed at increasing the level of detail and the informativeness of hazard assessment at the stage of practical application. Its diagnostic value lies in providing a basis for planning targeted, site-specific safety measures intended to eliminate particular hazard factors. It is shown that incorporating the cognitive factor enables more accurate ranking of level crossings and forms a rationale for substantiating targeted measures to improve traffic safety. **Finding**. The proposed comprehensive hazard assessment methodology, which incorporates the cognitive factor, was tested on a sample of railway level crossings. Based on aggregated tabular results, two crossings were classified as high-risk, one as elevated-risk, and one as moderate-risk, according to the assessment indicator structure (MSZ, KD, cognitive hazard coefficient, and integrated hazard index). Comparative analysis confirmed that inclusion of the cognitive factor significantly affects the integrated hazard index and enables identification of facilities with increased risk under moderate traffic dynamics, taking into account the influence of drivers' cognitive dissonance and cognitive load. The high-risk class is associated with information-environment overload and contradictory signals as factors that contribute to hazardous situations. The results justify prioritizing measures such as improving signalling logic, unifying signal indications, increasing conspicuity, and reducing visual noise, and indicate that these measures can be implemented without substantial capital expenditure. **Originality**. For the first time, a multifactor methodology for assessing cognitive hazard at railway level crossings has been developed, based on integrating driver psychophysiological factors (cognitive load, cognitive dissonance, fatigue) into the overall risk calculation system. Unlike existing regulatory approaches, the proposed methodology makes it possible to diagnose specific causes of cognitive risk and to determine the priority of targeted measures aimed at reducing the probability of driver error. **Practical value**. In situations where the physical parameters of a railway level crossing (number of tracks, spatial layout, pavement type, presence and type of signalling) are technically or economically difficult to change, the methodology provides a tool for optimizing the information environment within the existing infrastructure. This makes it possible to address traffic-safety aspects that are not covered by current regulatory documents.

Keywords: railway level crossing; traffic safety; diagnostics; cognitive hazard; cognitive dissonance; psychophysiological factors

REFERENCES

1. *Bezpeka dorozhnoho rukhu. Znaky dorozhni. Zahalni tekhnichni umovy. Pravyla zastosuvannia, 144 DSTU 4100:2021*. (2021). (in Ukrainian)
2. *Bezpeka dorozhnoho rukhu. Rozmitka dorozhnia. Zahalni tekhnichni umovy, 102 DSTU 2587:2021*. (2021). (in Ukrainian)
3. *Budivli ta sporudy. Vyznachennia klasu naslidkiv (vidpovidalnosti), 17 DSTU 8855:2019*. (2019). (in Ukrainian)
4. Kurhan, M. B., Luzhytskyi, O. F., Ivanov, R. V., Khmelevska, N. P., & Khmelevskyi, V. S. (2024). Implementation of Innovative Technologies During the Modernization of Existing Level Crossings for High-Speed Train Traffic. *Science and Transport Progress, (1(105)*, 62-83. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2024/303191 (in Ukrainian)
5. Ministerstvo transportu ta zviazku Ukrainy. (2007). *Pro zatverdzhennia Instruktsii z ulashtuvannia ta ekspluatatsii zaliznychnykh pereizdiv*. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0162-07#Text (in Ukrainian)
6. Ministerstvo transportu Ukrainy. (2013). *Pro zatverdzhennia Pravyl tekhnichnoi ekspluatatsii zaliznyts Ukrainy*. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97#Text (in Ukrainian)
7. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2013). *Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlamentu bezpeky infrastruktury zaliznychnoho transportu*. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-п#Text (in Ukrainian)
8. Commission Implementing Regulation (EU) 2023/1695 of 10 August 2023. TSI CCS – Control, Command and Signalling. (2023). *Official Journal of the European Union*. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1695/oj (accessed: 15.02.2026). (in English)
9. *European Union Agency for Railways*. (2018). Human factors in railway safety. ERA Report. Valenciennes, France.
10. Fischer, S., Kurhan, M., & Kurhan, D. (2024). Innovative Technologies and Cognitive Factors for Enhancing Safety of Train and Car Movement at Level Crossings. *Proceedings of the 3rd Cognitive Mobility Conference (COGMOB 2024)*, 1-13. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81799-1_1 (in English)
11. *Risk management. Guidelines, ISO 31000:2018*. (2018). (in English)
12. *Ergonomics of human-system interaction. Part 210: Human-centred design for interactive systems, ISO 9241-210:2019*. (2019). (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

13. Kyriakidis, M., Pak, K. T., & Majumdar, A. (2015). Railway Accidents Caused by Human Error: Historic Analysis of UK Railways, 1945 to 2012. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2476*(1), 98-107. DOI: https://doi.org/10.3141/2476-17 (in English)
14. *International Transport Forum*. (2024). Road Safety Annual Report 2024. Retrieved from https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/irtad-road-safety-annual-report-2024.pdf (in English)
15. Stanton, N. A., Salmon, P. M., Rafferty, L. A., Walker, G. H., Baber, C., & Jenkins, D. P. (2017). *Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design*. Boca Raton: CRC Press. DOI: https://doi.org/10.1201/9781315587394 (in English)
16. *International Union of Railways*. (2016). UIC Safety Level Crossing Index. Paris, France: UIC.

Надійшла до редколегії: 04.12.2025
Дата рецензування: 26.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354458
© М. Б. Курган, Р. В. Іванов, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 378.018.43:004.9

О. П. ІВАНОВ[1*], І. М. ДЕМИДОВИЧ[2*]

[1*]Каф. «Комп'ютерних інформаційних технологій», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 52, ел. пошта o.p.ivanov@ust.edu.ua,
ORCID 0000-0003-1259-6377
[2*]Каф. «Комп'ютерних інформаційних технологій», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 58 699 48, ел. пошта i.m.demidovich@ust.edu.ua,
ORCID 0000-0002-3644-184x

Сучасні засоби підвищення якості навчання з застосуванням онлайн-системи обліку навантаження та успішності студентів

Мета. Підвищення якості навчання студентів за рахунок електронного обліку успішності та навантаження студентів, що забезпечує оперативний доступ студентів до власних результатів навчання, автоматизує облік навчальної діяльності для викладачів, підвищує мотивацію студентів через гейміфікацію та гарантує безперервність і надійність роботи завдяки кросплатформній архітектурі та відмовостійким рішенням. **Методика.** Для отримання релевантних даних авторами проведено аналіз сучасних LMS, електронних журналів та інтерактивних освітніх платформ, зокрема Moodle, Canvas та Top Hat, а також відповідних наукових публікацій за останні п'ять років. Оцінювались функціональні можливості, кросплатформність, відмовостійкість, інтеграція з університетськими базами та засоби мотивації студентів. **Результати.** На основі виконаного аналізу було розроблено інтегровану інформаційну систему з двома взаємопов'язаними модулями – студентським додатком «Успішність» та викладацьким «Кабінетом», що забезпечує автоматизацію обліку навчальної діяльності та підвищує ефективність взаємодії між студентами та викладачами. Було проведено інтеграцію з внутрішніми базами даних університету для автоматичного оновлення інформації про оцінки, відвідуваність та розклад занять. У системі використані система керування базами даних MongoDB та фреймворк Flutter для кросплатформної розробки інтерфейсів. **Наукова новизна.** Вперше у запропонованій системі поєднано дві взаємопов'язані платформи для студентів і викладачів, що забезпечує безперервний доступ до освітніх даних у режимі реального часу. Використання елементів гейміфікації та мотиваційних індикаторів трансформує облік успішності у систему, яка стимулює активність та самостійність студентів. Архітектура з високою відмовостійкістю та кросплатформна реалізація забезпечують надійність і мобільність використання системи в різних освітніх середовищах. **Практична значимість.** Можливість забезпечення оперативного доступу студентів та викладачів до актуальних даних про навчальну діяльність, що сприяє підвищенню прозорості та контролю навчального процесу. Впровадження системи дозволяє автоматизувати облік відвідуваності та оцінок, зменшуючи адміністративне навантаження викладачів. Додавання елементів гейміфікації стимулює мотивацію студентів і покращує їхню залученість до навчання. Система вже впроваджена та успішно використовується протягом трьох семестрів, що підтверджує її ефективність і практичну цінність для університетського освітнього середовища.

Ключові слова: електронний журнал; система управління навчанням; гейміфікація; відмовостійкість; кросплатформність; багатокомпонентність; програмне забезпечення; інформаційні технології

Вступ

Сучасна вища освіта вимагає інтегрованих цифрових рішень для ефективного управління навчальним процесом, що враховують потреби студентів, викладачів та адміністрації університету. Традиційні паперові журнали обліку студентів не забезпечують належної оперативності, прозорості та інтерактивності, які необхідні

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355435
© О. П. Іванов, І. М. Демидович, 2026

для сучасного університету, а також ускладнюють своєчасний моніторинг академічної успішності та планування навчального процесу. У зв'язку з цим активно впроваджуються електронні журнали та комплексні інформаційні системи, які дозволяють студентам і викладачам отримувати актуальні дані про успішність та відвідуваність, швидко обмінюватися інформацією, аналізувати результати навчання в режимі реального часу та формувати персоналізовані рекомендації. Наукові дослідження підтверджують ефективність таких підходів у підвищенні прозорості освітнього процесу, мотивації студентів та оптимізації адміністративних функцій.

Мета

Враховуючи вищезгадане, автори мали на меті розробити інтегровану онлайн-систему обліку успішності та навантаження студентів, яка забезпечує оперативний доступ студентів до власних результатів навчання, автоматизує облік навчальної діяльності для викладачів, підвищує мотивацію студентів через гейміфікацію та гарантує безперервність і надійність роботи завдяки кросплатформній архітектурі та відмовостійким рішенням.

Додатково система передбачає інтеграцію з університетськими базами даних та календарем занять, що дозволяє синхронізувати інформацію, надавати актуальні повідомлення та створювати умови для ефективної взаємодії між студентами та викладачами в реальному часі.

Методика

Упродовж останніх років електронні журнали обліку студентів та суміжні інформаційні системи стали об'єктом активного впровадження і наукового аналізу у сфері вищої освіти. Основною метою таких систем є автоматизація процесів обліку навчальної діяльності студентів, зокрема відвідуваності, поточної та підсумкової успішності, а також забезпечення прозорого доступу до освітніх даних для викладачів, адміністрації та студентів.

У наукових працях українських дослідників електронний журнал розглядається як інструмент оптимізації управління навчальним процесом. Зокрема, у роботі Я. Шендюха та Н. Думанського наведено порівняльний аналіз різних електронних журналів обліку успішності студентів, у якому підкреслюється, що цифрові журнали значно зменшують адміністративне навантаження на викладачів і підвищують оперативність аналізу навчальних результатів [3]. Автори також зазначають, що функціональність таких систем зазвичай включає ведення оцінок, формування звітів та можливість експорту даних для подальшої аналітики [3].

Подібні висновки отримано в дослідженні О. В. Діденка та Д. А. Купрієнка, де електронний журнал обліку навчальних досягнень студентів описується як ефективний засіб підвищення якості освітнього процесу та раннього виявлення академічних проблем [1]. У роботі наголошується, що електронні журнали створюють основу для систематичного моніторингу прогресу студентів і можуть бути інтегровані з іншими освітніми інформаційними системами [1].

Окрім локальних або спеціалізованих електронних журналів, у практиці університетів широко використовуються комплексні системи управління студентською інформацією (Student Information Systems, SIS) та системи управління навчанням (Learning Management Systems, LMS). Одним із прикладів є OpenSIS – система, що забезпечує централізоване зберігання даних про студентів, їхню успішність, розклад занять і навчальні курси [10]. Такі системи фактично виконують роль розширеного електронного журналу, поєднуючи облік навчальних результатів з адміністративними функціями [10].

Окрему групу аналогів становлять інтерактивні освітні платформи, які не є класичними електронними журналами, проте доповнюють або розширюють їх функціональність. До таких платформ належить Top Hat, що активно використовується у закладах вищої освіти для залучення студентів до навчального процесу. Платформа Top Hat забезпечує проведення інтерактивних опитувань, тестів і завдань у реальному часі, а також підтримує автоматичне відстеження відвідуваності та активності студентів [12]. Важливою особливістю Top Hat є можливість інтеграції з поширеними LMS, що дозволяє синхронізувати результати оцінювання та використовувати їх у межах електронного журналу або SIS [5]. Таким чином, Top Hat можна розглядати як інструмент, що доповнює електронний журнал

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355435
© О. П. Іванов, І. М. Демидович, 2026

функціями аналітики та активного навчання [5, 12].

У міжнародних дослідженнях значна увага приділяється порівнянню LMS-платформ та аналізу їх ролі у цифровій трансформації університетів. Зокрема, огляди, опубліковані у наукових виданнях Springer, свідчать про те, що сучасні LMS і пов'язані з ними електронні журнали формують єдину освітню екосистему, у межах якої облік успішності, комунікація між учасниками освітнього процесу та навчальний контент інтегровані в одному цифровому середовищі [2, 13]. Дослідження тенденцій розвитку LMS свідчить про зростання ролі мобільності, персоналізації та інтеграції таких платформ у змішане навчання [6]. Позитивний вплив використання LMS на навчальні результати студентів підтверджено у роботі [11], де показано важливість інтерактивних компонентів та зручного доступу до ресурсу. Впровадження цифрових управлінських платформ у підготовці майбутніх педагогів також розглядається як чинник підвищення якості освітнього процесу та індивідуалізації навчання [2, 8].

Поряд із цим сучасні дослідження зосереджуються на порівняльному аналізі відкритих LMS, що широко використовуються у вищих навчальних закладах, зокрема Moodle, Open edX, Sakai, ILIAS та Canvas, з акцентом на їхні функціональні можливості та вплив на організацію дистанційного навчання [9]. У науковій літературі також підкреслюється позитивний вплив LMS на розвиток самостійності студентів і покращення навчальних результатів, що значною мірою залежить від рівня цифрової компетентності викладачів та якості проєктування електронних курсів [14]. Окремі дослідження присвячені впровадженню технологій блокчейн у LMS з метою підвищення безпеки зберігання даних та сертифікації результатів навчання [7]. Крім того, результати останніх наукових робіт засвідчують, що LMS продовжують адаптуватися до складних зовнішніх викликів, зокрема пандемії COVID–19 та умов воєнного стану, підтверджуючи свою гнучкість і ключову роль у забезпеченні безперервності освітнього процесу [4].

Таким чином, аналіз існуючих робіт і практичних рішень показує, що електронний журнал обліку студентів може реалізовуватися як окрема система або як складова більш комплексних SIS і LMS. Платформи на кшталт Top Hat демонструють сучасний підхід до розширення традиційного електронного журналу за рахунок інтерактивності та збору даних про навчальну активність. Результати попередніх досліджень підтверджують актуальність розробки та впровадження електронних журналів, а також необхідність їх інтеграції з іншими цифровими освітніми інструментами.

Результати

Запропонована інформаційна система є інтегрованим цифровим рішенням, що складається з двох взаємопов'язаних платформ, які забезпечують повноцінну взаємодію між студентами та викладачами, формуючи єдиний освітній інформаційний простір.

Перша з платформ – студентський додаток «Успішність», орієнтований на студента, і призначений для забезпечення оперативного доступу до актуальних результатів навчальної діяльності. Ці дані автоматично синхронізуються з внутрішніми університетськими базами даних, такими як «Деканат» та «Розклад». Додаток надає студенту повну інформацію щодо академічної успішності, включно з поточними оцінками, деталізацією результатів за семестрами та відомостями про відвідуваність і пропуски занять.

Крім цього, інтеграція з модулем «Розклад» дозволяє отримувати оперативні повідомлення від викладачів, у тому числі посилання на онлайн-заняття, наприклад Zoom-конференції. Для підвищення мотивації студентів реалізовано модуль гейміфікації «Досягнення», який трансформує статистичні дані в систему мотиваційних індикаторів. Студенти можуть оцінювати власний прогрес у порівнянні з іншими членами групи, курсом чи університетом, що сприяє формуванню здорової конкуренції та активного залучення до навчального процесу. Система дозволяє студентам отримувати візуальні підтвердження своїх успіхів, такі як статус «Справжній лідер» для топ-10 % рейтингу, «Невідсутній» для високої відвідуваності або «Все встиг» за відсутність прострочених завдань.

Друга платформа – «Кабінет» для викладача, який виступає інструментом автоматизації обліку навчальної діяльності (рис. 1).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355435
© О. П. Іванов, І. М. Демидович, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

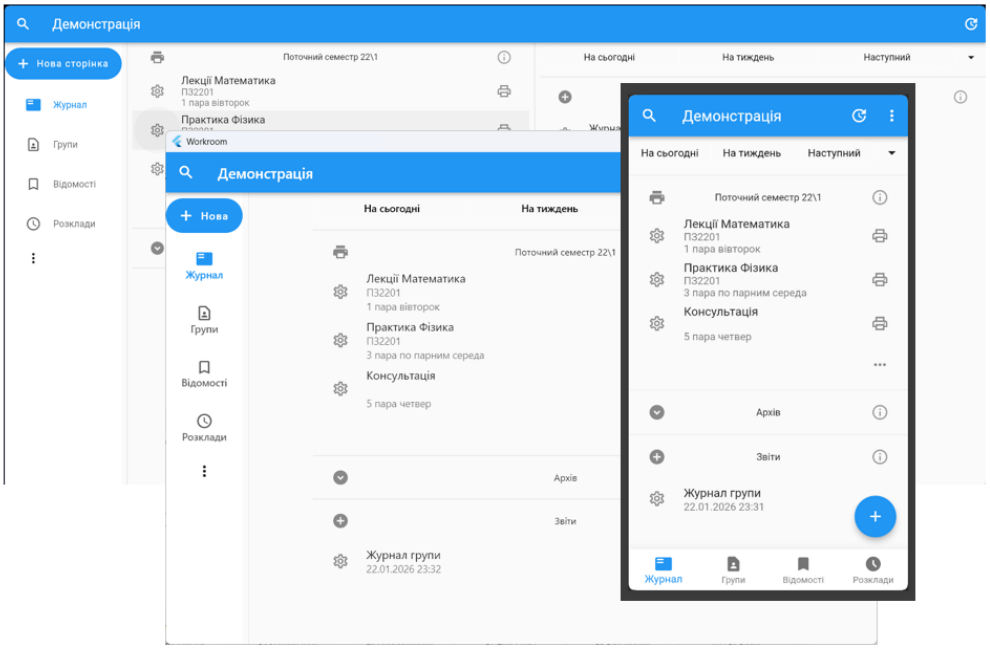


Рис. 1. Демонстрація мультиплатформовості – роботи системи на різних пристроях

Fig. 1. multiplatform functionality demonstration with system operation on different devices

Вона замінює традиційні паперові форми та забезпечує розширений функціонал управління освітнім процесом. Викладачі мають змогу швидко фіксувати факт проведення заняття та присутність студентів безпосередньо під час пари за допомогою мобільного інтерфейсу.

На рис. 1 представлено інтерфейс додатку «Кабінет» для викладачів у різних режимах: десктопному та мобільному. Інтерфейс побудований за принципами мінімалізму та зручності для користувача, з використанням чистого білого фону та блакитних елементів для виділення ключових функцій.

У лівій частині екрану розташоване вертикальне меню з основними розділами: «Нова сторінка», «Журнал», «Групи», «Відомості» та «Розклади», що забезпечує швидкий доступ до різних функціональних блоків системи.

Основна робоча область містить список занять на поточний день та на тиждень із зазначенням дисципліни, коду предмета та номеру пари, а також типу заняття (лекція, практика, консультація). Для кожного заняття присутні іконки для друку або перегляду додаткових деталей.

У верхній частині розташована панель навігації з пошуком і фільтрацією за датою («На сьогодні», «На тиждень», «Наступний»), що полегшує орієнтацію у навчальному плані.

Мобільна версія адаптована під сенсорні екрани: елементи розташовані компактно, меню винесено в нижню навігаційну панель, а кнопка «+» дозволяє швидко додавати нові сторінки в обраний розділ. Такий дизайн забезпечує інтуїтивність використання, швидкий доступ до даних та можливість роботи з будь-якого пристрою.

Інтерфейс додатку «Кабінет» забезпечує викладачу зручну роботу з обліком навчальної діяльності та плануванням занять. Через розділ «Журнал» можна фіксувати відвідуваність студентів та відмітки про проведені пари в режимі реального часу. Розділ «Групи» дозволяє переглядати склад груп, керувати списками студентів та переглядати цифрові відомості, «Відомості» дають доступ до поточних результатів навчальної діяльності студентів та їх успішності. Розділ «Розклади» інтегрований із системою планування навантаження і надає можливість перегляду очного та заочного розкладу лекцій,

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355435
© О. П. Іванов, І. М. Демидович, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

практичних занять та консультацій за датою, із швидким доступом до друку або більш детальної інформації.

Кнопка «Нова сторінка» та контекстне меню дозволяють додавати записи, плани занять або оцінки. Система підтримує швидкий пошук та фільтрацію за датою або типом заняття, що спрощує навігацію в навчальному процесі.

Мобільна версія знижує навантаження на користувача, забезпечуючи компактне відображення елементів і доступ до всіх функцій на сенсорному екрані, що дозволяє викладачу залишатися мобільним та оперативно управляти даними незалежно від місця знаходження.

Система передбачає формування планових занять із зазначенням тем та коментарів, які активуються у день проведення уроку. Викладачі можуть переглядати актуальні дані про результати навчання студентів, що дозволяє своєчасно виявляти проблемні випадки та приймати необхідні управлінські рішення.

У системі реалізовано можливість внесення оцінок у цифрові відомості, які інтегруються з університетською базою даних, що гарантує точність та оперативність обліку. Система також генерує агреговані звіти за тиждень або семестр, що дозволяє контролювати своєчасність введення даних і надає можливість експорту журналів у форматі Excel для подальшого друку та аналізу.

Система гейміфікації перетворює сухі статистичні дані на інтерактивну систему досягнень, яка враховує три ключові метрики: індивідуальний рейтинг студента, відсоток відвідування занять та відсутність невиконаних завдань на поточний момент. Студент може оцінити свій прогрес у трьох вимірах: у межах групи, серед студентів своєї спеціальності або курсу та в масштабах університету. Крім того, система забезпечує зворотний зв’язок від викладачів, дозволяючи публікувати оголошення та посилання на онлайн-заняття безпосередньо в розкладі студентів, що підвищує прозорість та оперативність взаємодії.

Окрема цінність системи полягає у забезпеченні доступності, зручності та надійності освітніх даних. Завдяки кросплатформності додатків, студенти та викладачі можуть користуватися системою на різних пристроях, включно з веб-браузером, мобільними телефонами та операційними системами Windows. Архітектура передбачає наявність основного та резервного серверів, що гарантує безперервність обліку та високу відмовостійкість у разі технічних збоїв (рис. 2). Інтерфейс побудовано з орієнтацією на простоту та скорочення зусиль користувача: вбудовані підказки допомагають швидко освоїти систему, а процеси реєстрації та верифікації автоматизовано шляхом зіставлення даних із університетськими базами.

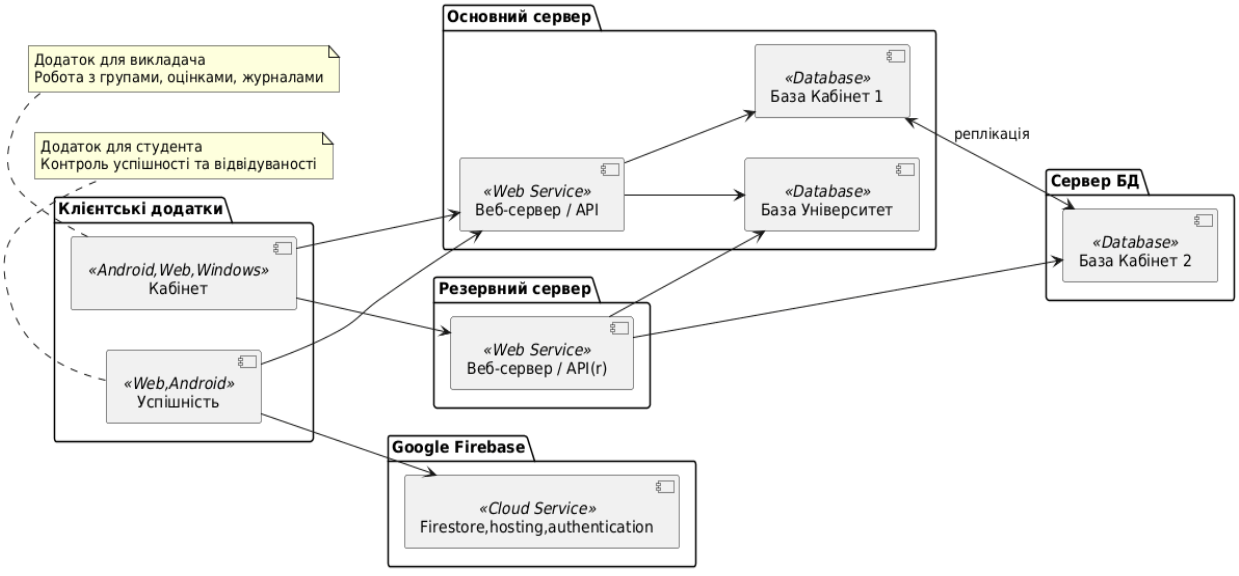


Рис. 2. Компонентна діаграма системи обслуговування студентів та викладачів

Fig. 2. Component diagram of the student and faculty service system

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355435
© О. П. Іванов, І. М. Демидович, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Технологічна реалізація системи передбачає використання системи керування баз даних MongoDB, яка забезпечує гнучке зберігання різнорідних освітніх даних у форматі документів та масштабованість під навантаження університетських баз. Документоорієнтована модель дозволяє обробляти великі масиви даних, включно з оцінками, відвідуваністю та розкладом, у єдиній структурі. Система використовує горизонтальне масштабування, що забезпечує стабільність роботи при зростанні кількості студентів і викладачів, а також індексацію для оптимізації пошуку та аналітики. Реплікація даних між кількома вузлами гарантує відмовостійкість і захист від втрати інформації, а автоматичне перемикання на резервний сервер забезпечує безперервність доступу навіть у разі технічних збоїв. Шардінг дозволяє великі масиви даних розподіляти між декількома серверами, що забезпечує паралельну обробку навантаження та запобігає «вузьким місцям» у системі.

Для розробки клієнтських додатків використовується фреймворк Flutter, що дозволяє створити єдиний кодовий базис для Web, Android, iOS та Windows, зменшуючи витрати на розробку та підтримку при збереженні високої якості інтерфейсу. Використання Flutter забезпечує адаптивність інтерфейсів під різні розміри екранів і операційні системи, швидке тестування змін завдяки механізму hot reload, високошвидкісне рендерування через графічний рушій Skia, а також можливість підключення сторонніх бібліотек для розширення функціоналу. Таким чином, система створює сучасне, єдине та продуктивне середовище для студентів і викладачів, яке легко розширювати та підтримувати.

UX/UI дизайн системи реалізовано відповідно до принципів Material Design, що забезпечує інтуїтивність, адаптивність і мінімізацію дій користувача для досягнення результатів. Інтерфейс побудований з акцентом на чистоту, простоту та логічну структуру елементів, включає візуальні підказки та індикацію станів, а також оптимізацію під сенсорні екрани і гарячі клавіші для десктопних користувачів. Це дозволяє створити єдиний користувацький досвід на різних платформах, забезпечуючи для студентів мотиваційний інструмент через гейміфікацію та оперативні сповіщення, а для викладачів – швидкий і простий засіб обліку навчальної діяльності.

На рис. 2 зображена загальна архітектура системи додатку та його інтеграція з сервісами для обліку навчальної діяльності. Система складається з клієнтських додатків, серверної частини та зовнішніх хмарних сервісів.

Клієнтські додатки представлені двома основними компонентами: додатком для викладача («Кабінет»), що забезпечує роботу з групами, оцінками та журналами, та додатком для студента («Успішність»), який дозволяє контролювати успішність і відвідуваність. Додатки реалізовані для різних платформ: Android, Web та Windows.

Серверна частина включає основний та резервний сервери. Обидва сервери містять вебсервіси (Web Service / API), які забезпечують обмін даними з клієнтськими додатками та управління запитами користувачів. Основний сервер взаємодіє з двома базами даних: «База Кабінет 1» та «База Університет». Для резервування і забезпечення безперервної роботи передбачено резервний сервер із власним вебсервісом.

Сервер баз даних відповідає за зберігання дубльованих даних «База Кабінет 2» і підтримує реплікацію з основного сервера, що гарантує надійність і цілісність інформації.

Для автентифікації студентів та зберігання проміжних даних використано хмарну платформу Google Firebase, яка надає сервіси Firestore, хостинг та засоби аутентифікації.

Загалом, архітектура системи забезпечує надійний облік навчальної діяльності, високу доступність сервісу та безпечний обмін даними між користувачами і серверною частиною, з можливістю масштабування та інтеграції хмарних технологій.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні концепції інтегрованої інформаційної системи підтримки освітнього процесу, яка поєднує облік навчальних результатів, комунікацію та мотиваційні механізми в єдиному цифровому середовищі. На відміну від наявних рішень, запропонований підхід передбачає синхронне функціонування студентського та викладацького модулів, що забезпечує узгодженість даних і мінімізує затримки в оновлен-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355435
© О. П. Іванов, І. М. Демидович, 2026

ні інформації. Особливістю є використання гейміфікаційної моделі оцінювання прогресу, яка трансформує кількісні показники успішності та відвідуваності у візуалізовані індикатори досягнень, орієнтовані на формування внутрішньої мотивації студентів.

Науково обґрунтованим є застосування архітектурних рішень, що поєднують кросплатформні клієнтські додатки з розподіленою системою зберігання даних, що дозволяє забезпечити безперервність доступу до освітньої інформації навіть за умов нестабільної роботи окремих компонентів. Запропонована модель може слугувати основою для подальших досліджень у сфері цифрової трансформації закладів вищої освіти та розроблення адаптивних освітніх екосистем.

Практична значимість роботи полягає у можливості безпосереднього впровадження системи в діяльність закладів вищої освіти з метою автоматизації обліку навчального процесу та підвищення прозорості взаємодії між студентами і викладачами. Використання мобільних і веб-рішень сприяє зменшенню трудомісткості рутинних операцій, скороченню часу на оформлення звітної документації та підвищенню точності введення даних. Реалізовані механізми зворотного зв’язку та аналітики дозволяють своєчасно виявляти проблемні аспекти у навчанні та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Отримані результати можуть бути використані як у практиці університетів, так і під час розроблення подібних інформаційних систем освітнього призначення.

Висновки

У межах дослідження розроблено та обґрунтовано концепцію інформаційної системи електронного журналу обліку успішності студентів, орієнтованої на створення єдиного цифрового освітнього простору для взаємодії студентів і викладачів. Запропоноване рішення поєднує інструменти автоматизації обліку навчальної діяльності, механізми оперативної комунікації та мотиваційні елементи, що забезпечує підвищення прозорості освітнього процесу та доступності академічної інформації. Реалізація кросплатформного підходу дозволяє використовувати систему на різних типах пристроїв, що сприяє мобільності користувачів та зручності роботи з даними.

Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції гейміфікаційних механізмів у системи управління навчальними даними, оскільки візуалізація досягнень і рейтингових показників сприяє зростанню мотивації студентів та формуванню відповідального ставлення до власного навчання. Поєднання таких механізмів із відмовостійкою архітектурою та розподіленим зберіганням даних становить наукову новизну дослідження й створює підґрунтя для подальшого розвитку подібних цифрових рішень у сфері освіти.

Практична цінність запропонованої системи полягає у можливості її впровадження в закладах вищої освіти для скорочення обсягу паперової документації, підвищення точності обліку та оперативності формування звітності. Система також сприяє підвищенню залученості учасників освітнього процесу та створює умови для більш ефективного моніторингу навчальних результатів.

Перспективи подальшого розвитку пов’язані з розширенням функціоналу мобільних додатків для платформ Android та iOS, впровадженням інтелектуальних модулів аналізу даних, зокрема для прогнозування ризиків академічної неуспішності та формування персоналізованих рекомендацій студентам. Доцільним є також створення модуля зворотного зв’язку на основі анкетування та опитувань, що дозволить враховувати думку користувачів під час удосконалення системи.

Окремим напрямом розвитку може стати міжуніверситетська інтеграція, яка забезпечить можливість використання платформи різними закладами освіти та формування масштабованої освітньої екосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Діденко О. В., Купрієнко Д. А. Електронний журнал обліку успішності слухачів (курсантів, студентів) як засіб раціоналізації навчально-виховного процесу. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2015. Т. 47, № 3. С. 110–123. DOI: https://doi.org/10.33407/itlt.v47i3.1226

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355435
© О. П. Іванов, І. М. Демидович, 2026

2. Хоменко І. О., Кичко І. І., Фридрих Р. О. Сучасні напрями використання систем управління навчанням персоналу компаніями в умовах пандемії коронавірусу та воєнного стану. *Київський економічний науковий журнал*. 2025. № 8. С. 158–165. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-765x/2025-8-21
3. Шендюх Я. М., Думанський Н. О. Порівняння електронних журналів обліку успішності студентів. *Інформація, комунікація, суспільство 2016. Матеріали 5-ї Міжнар. наук. конф. ICS-2016*. (Львів, 19–21 травня 2016 р). Львівська політехніка Львів, 2016. С. 198–199. URL: https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/33374
4. Яланецький В. Системи управління навчанням на блокчейні. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2023. Т. 3, № 19. С. 56–68. DOI: https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.19.5668
5. A Teaching Platform With Live Polling, eTexts+More. *Top Hat*. URL: https://tophat.com/features/
6. Aljad R. R. Analysis of development trends and experience of using LMS in modern education: An overview. *E-Learning Innovations Journal*. 2023. Vol. 1, Iss. 2. P. 86–104. DOI: https://doi.org/10.57125/elij.2023.09.25.05
7. Haikal A., Azahra N., Awalia A. A. (2024). A Literature Review: The Effectiveness of Learning Management Systems (LMS) in Enhancing Students' Learning Independence and Learning Outcomes in the Digital Era. *Paedagogie*. 2025. Vol. 20, Iss. 2. P. 343–352. DOI: https://doi.org/10.31603/paedagogie.v20i2.15324
8. Orlov O. The integration of digital management platforms in teacher training: A practice of students. *Pedagogical Sciences*. 2025. Vol. 85. P. 46–53. DOI: https://doi.org/10.33989/2524-2474.2025.1.46
9. Sanchez L., Penarreta J., Soria Poma X. Learning Management Systems for Higher Education: A Brief Comparison. *Discover Education*. 2024. Vol. 3, Iss. 1. Art. 58. DOI: https://doi.org/10.1007/s44217-024-00143-5
10. Software:OpenSIS, 2025. *HandWiki*. URL: https://handwiki.org/wiki/Software:OpenSIS
11. Sun J., Phakamacha P. The influence of learning management system platform on learners' performance in Suzhou Early Childhood Education College of China. *Jurnal Edusci*. 2024. Vol. 2, Iss. 2. P. 125–144. DOI: https://doi.org/10.62885/edusci.v2i2.511
12. Top Hat. Interactive Learning Platform for Higher Education. *Top Hat.* URL: https://tophat.com/
13. What is Top Hat? Student Help. Instructional Technology Help Center. *Student Help*. URL: https://studenthelp.intech.arizona.edu/article/493-what-is-top-hat
14. Yılmaz E., Elen A., Kuran E., Kaya E., Dönmez E. A Comparison of Open-Source Learning Management Systems Used for Distance Education in Higher Education Institutions. *International Scientific and Vocational Studies Journal*. 2024. Vol. 8, Iss 2. P. 211–222. DOI: https://doi.org/10.47897/bilmes.1597768

O. P. IVANOV[1*], I. M. DEMIDOVICH[2*]

[1*]Dep. «Computer Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 52, e-mail o.p.ivanov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1259-6377
[2*]Dep. «Computer Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 58 699 48, e-mail i.m.demidovich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3644-184x

Modern Means of Improving the Education Quality Using an Online System for Recording Student Workload and Performance

Purpose. To improve the quality of student learning through electronic accounting of student success and workload, which will provide students with prompt access to their own learning outcomes, automate the accounting of educational activities for teachers, increase student motivation through gamification, and guarantee continuity and reliability of work thanks to cross-platform architecture and fault-tolerant solutions. **Methodology.** To obtain relevant data, the authors analyzed modern LMS, electronic journals, and interactive educational platforms, including Moodle, Canvas, and Top Hat, as well as relevant scientific publications over the past five years. Functionality, cross-platform, fault-tolerant, integration with university databases, and means of motivating students were assessed. **Findings**. Based on this analysis, an integrated information system was developed with two interconnected modules – the student's application «Success» and the teacher's «Cabinet», which provides automation of accounting of educational activities and increases the efficiency of interaction between students and teachers. Integration with the university's internal databases was carried out to automatically update information on grades, attendance, and class schedules. The system uses MongoDB for data storage and Flutter for cross-platform interface development. **Originality**. For the first time, the proposed system combines two interconnected platforms for students and teachers, which provides uninterrupted access to educational data in real time. The use of gamification elements and mo-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355435
© О. П. Іванов, І. М. Демидович, 2026

tivational indicators transforms performance accounting into a system that stimulates student activity and independence. The architecture with high fault tolerance and cross-platform implementation ensures reliability and mobility of the system in various educational environments. **Practical value**. The ability to provide students and teachers with prompt access to current data on educational activities, which contributes to increased transparency and control of the educational process. The implementation of the system allows you to automate attendance and grades, reducing the administrative burden on teachers. Adding gamification elements stimulates student motivation and improves their engagement in learning. The system has already been implemented and successfully used for three semesters, which confirms its effectiveness and practical value for the university educational environment.

Keywords: electronic journal; learning management system; gamification; fault tolerance; cross-platform; multicomponent; software; information technology

REFERENCES

1. Didenko, O. V., & Kupriienko, D. A. (2015). Electronic journal to record students' progress (cadets, students) as a means of rationalization of the educational process. *Information Technologies and Learning Tools, 47*(3), 110–123. DOI: https://doi.org/10.33407/itlt.v47i3.1226 (in Ukrainian)
2. Khomenko, I. O., Kychko, I. I., & Frydrykh, R. O. (2025). Current approaches to the use of learning management systems by companies during the COVID-19 pandemic and martial law. *Kyiv Economic Scientific Journal, 8,* 158-165. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-765x/2025-8-21 (in Ukrainian)
3. Shendiukh, Ya. M., & Dumanskyi, N. O. (2016, May). Porivniannia elektronnykh zhurnaliv obliku uspishnosti studentiv. Informatsiia, komunikatsiia, suspilstvo 2016. In *Proceedings of the 5th International Scientific Conference «Information, Communication, Society 2016»* (pp. 198-199). Lviv: Polytechnic Publishing House. Retrieved from https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/33374 (in Ukrainian)
4. Yalanetskyi, V. (2023). Blockchain-based learning management systems. *Cybersecurity: Education, Science, Technology, 3*(19), 56-68. DOI: https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.19.5668 (in Ukrainian)
5. *Top Hat*. (n. d.). A Teaching Platform With Live Polling, eTexts+More. Retrieved from https://tophat.com/features/ (in English)
6. Aljad, R. R. (2023). Analysis of development trends and experience of using LMS in modern education: An overview. *E-Learning Innovations Journal, 1*(2), 86-104. DOI: https://doi.org/10.57125/elij.2023.09.25.05 (in English)
7. Haikal, A., Azahra, N., & Awalia, A. A. (2025). A Literature Review: The Effectiveness of Learning Management Systems (LMS) in Enhancing Students' Learning Independence and Learning Outcomes in the Digital Era. *Paedagogie, 20*(2), 343-352. DOI: https://doi.org/10.31603/paedagogie.v20i2.15324 (in English)
8. Orlov, O. (2025). The integration of digital management platforms in teacher training: A practice of students. *Pedagogical Sciences, 85*, 46-53. DOI: https://doi.org/10.33989/2524-2474.2025.1.46 (in English)
9. Sanchez, L., Penarreta, J., & Soria Poma, X. (2024). Learning Management Systems for Higher Education: A Brief Comparison. *Discover Education, 3*(1), 58. DOI: https://doi.org/10.1007/s44217-024-00143-5 (in English)
10. *HandWiki*. (2025, 28 november). Software:OpenSIS. Retrieved from https://handwiki.org/wiki/Software:OpenSIS (in English)
11. Sun, J., & Phakamacha, P. (2024). The influence of learning management system platform on learners' performance in Suzhou Early Childhood Education College of China. *Jurnal Edusci, 2*(2), 125-144. DOI: https://doi.org/10.62885/edusci.v2i2.511 (in English)
12. *Top Hat*. (n. d.). Top Hat. Interactive Learning Platform for Higher Education. Retrieved from https://tophat.com/ (in English)
13. *Student Help*. (n. d.). What is Top Hat? Student Help. Instructional Technology Help Center. Retrieved from https://studenthelp.intech.arizona.edu/article/493-what-is-top-hat (in English)
14. Yılmaz, E., Elen, A., Kuran, E., Kaya, E., & Dönmez, E. (2024). A Comparison of Open-Source Learning Management Systems Used for Distance Education in Higher Education *Institutions. International Scientific and Vocational Studies Journal, 8*(2), 211-222. DOI: https://doi.org/10.47897/bilmes.1597768 (in English)

Дата надходження рукопису: 24.11.2025
Дата прийняття до публікації: 26.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355435
© О. П. Іванов, І. М. Демидович, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК 004.415.2:004.89

Д. О. КАРПОВСЬКИЙ[1*]

[1*]Каф. «Комп'ютерні науки», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта karpovskyi.d@gmail.com, ORCID 0009-0002-0020-5148

Методи та засоби рефакторингу онтологій

Мета. Робота спрямована на дослідження еволюції концепції рефакторингу – від інструмента оптимізації програмного коду до потужного засобу вдосконалення структур даних, алгоритмів та бізнес-процесів. Основною метою дослідження є вивчення історичного процесу становлення рефакторингу програмного забезпечення та онтологій, можливостей застосування методів покращення до онтологій як специфічного виду програмних структур, що відіграють ключову роль у знання-орієнтованих системах, семантичному вебі та кіберфізичних системах нового покоління. **Методика.** Методологічну основу дослідження становлять загальнонаукові та спеціальні методи аналізу й узагальнення. Застосовано систематичний огляд наукових публікацій у галузі рефакторингу програмного забезпечення та онтологічної інженерії з використанням повнотекстових і реферативних наукометричних баз даних. У роботі використано методи порівняльного аналізу для зіставлення різних підходів до рефакторингу, структурно-функціональний аналіз для дослідження змін у програмних та онтологічних моделях, а також методи класифікації для групування існуючих технік рефакторингу за рівнем абстракції та сферою застосування. **Результати.** У межах дослідження проведено ґрунтовний аналіз наукових публікацій, присвячених тематиці рефакторингу та онтологічної інженерії, із залученням повнотекстових і реферативних баз даних. Розглянуто історію становлення підходів до рефакторингу, зокрема трансформації схем даних, концептуального рефакторингу, модифікації обмежень цілісності та еволюції інструментів для оцінки якості змін. Особливу увагу приділено застосуванню рефакторингу до онтологій, включно з аналізом його впливу на модульність, когерентність та повторне використання знань. **Наукова новизна** роботи полягає в систематичному дослідженні існуючих методів рефакторингу та їх класифікації за типами. Здійснено комплексний аналіз сильних і слабких сторін кожного з підходів, що дозволяє обґрунтовано обирати оптимальні стратегії вдосконалення програмного коду. Запропонований підхід сприяє глибшому розумінню механізмів рефакторингу в контексті різних сфер застосування. **Практична значимість** Представлені результати можуть бути використані під час проєктування, супроводу та еволюції знання-орієнтованих систем, де важливу роль відіграє структурна узгодженість і підтримка семантики даних. Окреслено перспективи подальших досліджень, що включають автоматизацію процесів рефакторингу онтологій за допомогою методів машинного навчання, розширення системи метрик оцінювання та адаптацію запропонованих рішень до предметних галузей, які характеризуються високою динамікою змін.

Ключові слова: інформаційні технології; онтологія; рефакторинг; бази знань; методи рефакторингу; програмне забезпечення; трансформація; якість

Вступ

Наразі створено велику кількість онтологій, які описують цілий ряд предметних областей, винайдено нові методи та розроблені застосунки, які дозволяють шукати потрібні онтології та обробляти їх. Можливо найбільш використовуваний застосунок для пошуку онтологій – це Swoogle [18], веб орієнтований інструмент, який дозволяє знайти бажану онтологію серед десятків тисяч існуючих.

Попри наявність сучасних технологій пошуку, що забезпечують широкий спектр інструментів для виявлення онтологій, які відповідають заданим критеріям, процес ідентифікації відповідної онтології все ще становить певну складність [20]. Навіть якщо пощастило, та бажана онтологія була знайдена, то існує велика вірогідність зіштовхнутись із новим викликом – як адаптувати онтологію так, щоб її можна було ефективно інтегрувати в конкретну бізнес модель [14]. Насправді, коли знайдено онтологію, то її необхідно реструктурувати, щоб зробити більш придатною для використання (за допомогою використання існуючих методів рефакторингу онтологій), та адаптувати до тієї концепції та бізнес термінології, яку використовує кінцевий користувач [15].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

Операції еволюціонування відігравали і відіграють важливу роль в розробці програмного забезпечення [22]. Деякі із цих операцій спрямовані на зміну програми, або концептуальної схеми та можуть використовуватись для додавання, видалення, або зміни певних функціональних можливостей системи без зміни її поведінки [30]. В контексті даних наукових досліджень такі операції називають «операції рефакторингу» [22]

Дослідники даної предметної області намагались використовувати операції рефакторингу не тільки в програмному забезпеченні, а і в елементах із більш високим рівнем абстракції: базах даних, UML моделях, Object Constraint Language (OCL) моделях і в набагато меншій мірі в онтологіях [5].

Логічно постає питання, чому до онтологій методи рефакторингу менше застосовувались на практиці. Двома основними недоліками застосування рефакторингу до онтологій була відсутність однозначного та узгодженого каталогу операцій рефакторингу, які мають практичний сенс [15]. Такі загально узгоджені операції присутні в інших сферах, таких як рефакторинг програмного забезпечення та баз даних [4].

Наслідком цього стало те, що дослідники намагались застосувати вже існуючи операції рефакторингу [16] до онтологій. Основними концепціями, які із цього вийшли стали «реструктуризація програми» та «трансформація схеми» [3].

Мета

Метою даної статті є комплексне дослідження еволюції підходів до рефакторингу в програмній інженерії та онтологічній інженерії як взаємопов’язаних напрямів розвитку сучасних знаннє-орієнтованих інформаційних систем. У роботі поставлено завдання проаналізувати історичні передумови виникнення рефакторингу, його трансформацію від локальних змін програмного коду до концептуального рівня, що охоплює структури даних, архітектурні рішення та онтологічні моделі. Особливу увагу приділено виявленню можливостей і обмежень застосування класичних та сучасних методів рефакторингу до онтологій як специфічного виду програмних структур, що забезпечують формалізацію знань у різноманітних системах. Додатковою метою дослідження є формування теоретичного підґрунтя для подальшої автоматизації процесів рефакторингу онтологій із використанням методів штучного інтелекту та машинного навчання, а також визначення критеріїв оцінювання ефективності таких змін з погляду якості, масштабованості та повторного використання знань.

Методика

Методологічну основу дослідження становить поєднання загальнонаукових і спеціалізованих методів аналізу, що забезпечує комплексний розгляд процесів рефакторингу програмного забезпечення та онтологій. У роботі застосовано систематичний аналіз наукових публікацій з питань рефакторингу, онтологічної інженерії та знаннє-орієнтованих систем із використанням повнотекстових і реферативних наукометричних баз даних, а також історико-аналітичний і порівняльний методи для дослідження еволюції підходів та зіставлення класичних і сучасних технік рефакторингу.

Для аналізу змін в онтологічних моделях використано структурно-функціональний аналіз і методи класифікації, що дозволило оцінити вплив рефакторингу на модульність, зв’язність, зчеплення та когерентність онтологій. Ефективність підходів оцінювалася на основі якісних і кількісних показників структурної узгодженості, підтримки семантики та можливостей повторного використання знань, що створює методологічне підґрунтя для подальшої автоматизації процесів рефакторингу онтологій із використанням методів штучного інтелекту.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій.

Становлення методів рефакторингу. Останніми десятиліттями схожі за своїми цілями операції були досліджені різними науковцями та детерміновані різними назвами: операції рефакторингу, операції реструктуризації, операції трансформації програм, операцій трансформації моделей [9]. Розглянемо в хронологічному порядку які техніки заховані за попередньо згаданими термінами, та які із них є найбільш ефективними для реструктуризації онтологій.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

Операції реструктуризації програм. Реструктуризація програм – методика яка була винайдена у 80х роках 20 століття [12]. Призначення даної методики – реструктуризація програм без зміни їх поведінки для кінцевого користувача [24]. Дана техніка відрізняється від загальноприйнятого у сьогоденні підходу рефакторингу тим, що вона має справу лише із необ'єктно-орієнтованою архітектурою програм.

В 1993 році дослідники Грізволд та Ноткін презентували у своїй науковій роботі певну кількість реструктуризаційних методів [24] для покращення якості програмного коду та підтримки програми в майбутньому. Дані методи надавали можливість змінювати назви змінних, змінювати вирази змінними і навпаки змінні виразами, замінювати деяку послідовність викликів команд окремим методом, який включав в себе даний набір команд. В даній роботі також було визначено яким чином можна автоматизувати виконання даних операцій [23].

Також в 1998 році цими ж авторами було видано роботу, в якій було визначено підхід (фреймворк), який підтримував користувача у визначенні місць для застосування змін та використанні конкретних методів реструктуризації для великих програм.

Існують додаткові методи реструктуризації програм, але вони не можуть бути застосовані до онтологій через певні обмеження. У роботі Бергстейна 1991 року [8] визначено методи реструктуризації, але обов'язковою умовою є те, що всі неабстрактні класи двох схем мають однакові назви та атрибути, включаючи успадковані.

Операції трансформації схем. Операції трансформації схем активно вивчаються вже протягом останніх 20 років [26]. Дана методика оперує схемами як такими. На вхід подається початкова схема, потім до неї застосовуються операції трансформації і на виході ми маємо нову покращену схему. Такі трансформації можуть бути класифіковані за принципом впливу на інформацію, яку схема містить в собі:

– перетворення зі збереженням – виконання операцій зберігає інформацію, яку містить в собі початкова схема [25]

– перетворення зі змінами – виконання операцій модифікує інформацію, яку містить в собі початкова схема [6]. Надалі такі операції можна класифікувати таким чином:

– перетворення із розширенням – результуюча схема містить додаткову інформацію у порівнянні з початковою;

– перетворення із скороченням – результуюча схема містить лише необхідні дані;

– непорівняні перетворення – жодна із попередніх категорій невірна.

Операції перетворення схем, які належать до першої групи, до них можна віднести «Перейменування елементів», «Виділення підкласу або суперкласу», «Злиття або поділ класів/таблиць», «Зміна типів властивостей», «Видалення надлишкових елементів», можна розглядати як рефакторинг операцій [3], оскільки вони зберігають семантику модифікованої схеми, тобто інформацію, яку вона містить. Використовуючи термін «операції перетворення схем» ми маємо на увазі операції перетворення зі збереженням інформації [26].

Зазначити, чи визначають дві концептуальні схеми однакову інформацію (тобто вони еквівалентні) дуже важко. Кілька авторів вивчали цю тему та представили різні пропозиції щодо еквівалентності на основі: наборів даних, логіки, контекстуальної еквівалентності, замінної еквівалентності тощо [25].

Таким чином, операція перетворення схеми може перетворити схему S1 в іншу схему S2 і скасувати зміни шляхом перетворення схеми S2 на схему S1 [26]. Батіні у своїй роботі 1992 року визначив набір операцій перетворення схеми зі збереженням інформації, які покращували читабельність і стислість концептуальних схем [6]. До цих операцій відноситься:

– видалення зайвих циклів зв'язків: ця операція видаляє зв'язки, що складаються з типів лінкування, які вже визначені іншими типами відносин;

– додавання або видалення похідних атрибутів/підмножин: ця операція додає або видаляє похідні атрибути або класи;

– усунення наслідуваних сутностей в ієрархіях узагальнення: ця операція об'єднує сутність з її підтипами; використання методу дійсне лише тоді, коли підтипи порожні;

– усунення підвішених елементів: сутність поглинає іншу сутність, пов'язану з нею відносинами типу;

– створення узагальнення: ця операція створює узагальнення та спеціалізує зв'язки між сутностями зі спільними атрибутами;

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

– створення узагальнення: ця операція створює зв'язки узагальнення та спеціалізації між сутностями зі спільними атрибута.

Ейк в своїй роботі 1991 року представив декілька операцій трансформації схеми, які дозволяють [20]:

– перемістити атрибути між типами сутностей концептуальної схеми, пов'язаними типами зв'язків і відношеннями узагальнення або спеціалізації;

– розділити клас навпіл і зв'язати два отримані класи за допомогою типу відношення;

– створити новий підтип або супертип існуючого типу сутності;

– перемістити кінців типів зв'язків через таксономію типів сутностей.

Також Ейком було складено на той час найбільш практичну схему збереження інформації під час використання операцій рефакторингу [20]. Також автором було досліджено, як використовувати згадані вище операції задля покращення якості концептуальної схеми. Вісім із дев'яти представлених операцій зосереджені на типах зв'язків реструктуризації, і лише один фокусується на типах сутностей реструктуризації. Автор згадує в статті, що представлений перелік операцій є неповним і було б корисно доповнити його новими операціями.

Рефакторинг ПЗ та його еволюція. Концепція рефакторингу народилася на початку 1980-х років, коли Опдайк у роботі 1992 року [30] визначив рефакторинг як «перетворення програми, яке реорганізує програму без зміни її поведінки».

До Опдайка кілька авторів представили ідею створення набору операцій модифікації для об'єктно-орієнтованих програм, які зберігають їх поведінку. Існують певні алгоритми та евристики, які забезпечують хорошу організацію класів [12].

Такі приклади включає робота Бергштейна 1991 року [8], де він запропонував набір операцій перетворення класу, які зберігають поведінку об'єктно-орієнтованої схеми з певними структурними обмеженнями. Також такі приклади є в роботі Казаєса 1989 року [12], де він представив набір методів для реструктуризації успадкування діаграми класів без втрати функціональності.

У своїй дисертації 1992 року Опдайк визначив 23 типи примітивних методів рефакторингу та показав, як їх компонувати, щоб створити більш складні операції рефакторингу. Для кожної операції рефакторингу автор визначив передумову, яка гарантує, що поведінка програми не зміниться після виконання операції. Опдайк визначив операції рефакторингу програмного забезпечення в термінах C++ [30].

Пізніше Робертс в 1994 році трошки видозмінив визначення Опдайком поняття рефакторингу, щоб мати можливість визначити нові методи рефакторингу, які не зберігають поведінку програми, але можуть бути корисними для дизайнерів [31]. Робертс також розширив визначення рефакторингу пост умовами, щоб спростити створення складних операцій рефакторингу шляхом упорядкування більш простих і зменшити кількість аналізу, необхідного для визначення того, які складні ланцюжки рефакторингу можна застосувати.

Проте вважається, що найкращим визначенням рефакторингу програмного забезпечення є те, яке надав Фаулер в 1999 році [22]:

– рефакторинг (іменник): зміна внутрішньої структури програмного забезпечення, щоб зробити її легшою для розуміння та дешевшою для модифікації без зміни її спостережуваної поведінки;

– рефакторинг (дієслово): реструктуризувати програмне забезпечення шляхом застосування серії рефакторингів без зміни його спостережуваної поведінки.

Відповідно до Філіпса та Румпе (2001) [19], визначення зовнішньої або спостережуваної поведінки даної програми залежить від її функціональних вимог. Наприклад, в інформаційних системах реального часу час виконання вважається функціональною вимогою. Таким чином, у цьому випадку багато типових операцій рефакторингу можуть бути незастосовними, оскільки їхні зміни можуть негативно вплинути на час виконання і, отже, порушити функціональні вимоги, а отже, змінити спостережувану поведінку.

Фаулер (1999) у своїй книзі визначає 72 типи рефакторингу та коротко підсумовує кожну з них, пояснюючи для кожної операції, за яких умов вона корисна, етапи її виконання та перевірки, які слід виконати після її виконання, щоб гарантувати збереження поведінки програми [22]. Фаулер також визначив ознаки поганого коду (далі ОПК) які є умовами, що позначають

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

певні структури в коді, які передбачають (і іноді вимагають) можливість рефакторингу. З кожним ОПК Фаулер пов'язує набір операцій рефакторингу, які можна застосувати для покращення програми.

Хоча рефакторинг був розроблений для застосування вручну, деякі інструменти були розроблені для його автоматичного виконання, такі як Refactoring Browser, RefactorIT5, Together ControlCenter, тощо [31].

Незважаючи на код ОПК, знати, коли і де застосовувати операції рефакторингу, все ще є великою проблемою. Виявлення того, які операції рефакторингу можна ефективно застосувати, і де знаходиться те, що називається «виявленням можливостей рефакторингу» [7]. При виявленні можливостей рефакторингу слід відповісти на такі запитання:

– які операції рефакторингу можна ефективно застосувати: необхідно отримати операції рефакторингу, виконання яких покращить програму;

– де їх можна застосувати: в яких частинах програми можна ефективно застосувати попередні операції рефакторингу;

– у якому порядку їх слід застосовувати: операції рефакторингу мають бути послідовними, якщо кілька операцій рефакторингу можуть бути ефективно застосовані одночасно. Зробити висновок, у якому порядку їх слід застосовувати, нелегко, оскільки це залежатиме від фактору якості, який ми хочемо покращити, і застосування однієї операції може означати, що інша операція більше не може бути застосована, і тому її слід відкинути;

– які операції рефакторингу не слід застосовувати: оскільки операції рефакторингу є односпрямованими, є операції, які скасовують зміни, внесені іншими операціями. Це слід враховувати, щоб уникнути циклів у виконанні операцій рефакторингу [29].

Щоб повністю автоматизувати процес рефакторингу, необхідно:

– визначити, які операції можна застосувати і до якої частини схеми;

– виконати їх автоматично.

Виявлення можливостей рефакторингу є недетермінованим процесом, і для визначення найкращої операції рефакторингу для кожного випадку потрібно багато семантичної інформації. Отже, це виявлення можливе лише в деяких випадках, і навіть у таких випадках його автоматизація не є тривіальною [27].

З усіх цих причин процес рефакторингу не може бути повністю автоматизований і потребує втручання дизайнера/програміста для його успішного застосування. Найдосконаліші інструменти виявляють деякі можливості рефакторингу та використовують їх, щоб запропонувати рефакторинг, але, як правило, програміст на останньому кроці повинен вручну вибрати, які операції рефакторингу застосувати та обрати порядок їх застосування [29].

Рефакторинг обмежень цілісності. Важливою частиною концептуальної схеми є її обмеження цілісності. Обмеження цілісності визначають умови, яким мають задовольняти екземпляри схеми, щоб бути коректними. Обмеження цілісності були найбільш забутим елементом у рефакторингу концептуальних схем. Корреа і Вернер першими запропонували обмеження цілісності рефакторингу в 2004 році [16]. Зокрема, їх робота стосується обмежень цілісності програм, написаних на мові OCL. Автори адаптували кілька класичних операцій рефакторингу програмного забезпечення до OCL і представили набір OCL ознак поганого коду, які потенційно можуть бути в програмі. Ознаки поганого коду OCL еквівалентні ОПК Фаулера: правила, які означають, що певне обмеження OCL можна покращити за допомогою рефакторингу.

Ознаки поганого коду OCL, представлені в цій статті, це:

– магічний літерал, який визначає, коли обмеження цілісності використовує літерал у джерелі обмеження;

– «I» ланцюг, який визначає, коли обмеження складається з двох або більше додаткових обмежень, пов'язаних оператором «and»;

– тривалий шлях – виявляє, коли вираз OCL проходить через велику кількість асоціацій.

– Корреа і Вернер також визначили чотири операції, які мають справу з вищезгаданими ознаками поганого коду OCL [16]:

– додати змінну до виразу: додає оголошення змінної до виразу OCL;

– замінити вираз змінною: частина виразу OCL замінюється змінною, яка пояснює його вміст;

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

– вираз «Розділення І»: розділяє обмеження цілісності, що складається з двох або більше обмежень, з'єднаних між собою;

– додати визначення операції з виразу та замінити вираз на вираз виклику операції: ці операції стосуються і мають ту саму функцію, що й перша та друга операції, наведені вище.

Як згадувалося вище, лише частина рефакторингу програмного забезпечення адаптується до OCL, щоб покращити якість обмежень OCL. Список ОПК і операцій OCL є неповним, оскільки існують інші операції рефакторингу програмного забезпечення, адаптація яких до OCL може бути дуже корисною, наприклад операції «Замінити алгоритм» і «Видалити подвійний негатив». Перший замінює фрагмент вихідного коду іншим кодом із тим самим значенням; останнє усуває подвійні негативи, які використовуються у вихідному фрагменті, тим самим значно покращуючи його читабельність [22].

Рефакторинг та його якість. Операції рефакторингу програмного забезпечення реструктуризують програми з метою покращення їх якості. Якість програмного забезпечення відносна і залежить від точки зору, з якої розглядається програма. Наприклад, для однієї людини якісною програмою є та, яка виконує свої завдання максимально швидко, а для іншої якісну програму легко зрозуміти та змінити [13].

Операції рефакторингу не впливають однаково на всі показники якості. Операція рефакторингу, яка покращує спільне використання та читабельність коду, може погіршити часову ефективність; або операція, яка покращує час виконання, може погіршити читабельність [37]. Як наслідок, існує значна залежність між факторами якості, які ми хочемо покращити, операціями рефакторингу, які ми маємо застосувати, і операціями, яких ми маємо уникати, щоб покращити бажані фактори якості [31].

Зв'язок між операціями рефакторингу та факторами якості не вивчався, доки рефакторинг не досяг певної зрілості. Тим не менш, сьогодні якість є однією з найпоширеніших тем для при дослідженні рефакторингу [28].

Саймон та ін. були одними з перших дослідників, які враховували показники якості в процесі рефакторингу (Саймон, Штейнбуккнер, 2001). Вони визначили структуру, яка використовує об'єктно-орієнтовані показники для виявлення певних можливостей рефакторингу для операцій «Move attribute», «Move method», «Extract class» і «Inline class». Зокрема, вони використовують метрики згуртованості на основі відстані, щоб визначити, коли можна застосувати рефакторинг [36].

Дю Буа в 2004 році [10] запропонував техніку переписування постумов операцій рефакторингу, щоб автоматично зробити висновок про те, як виконання операції рефакторингу вплине на якість програмного забезпечення з точки зору бажаних показників.

Дю Буа та Демейєр в свої роботі адаптували цю техніку для створення набору стратегій рефакторингу, які слід враховувати в процесі виявлення можливостей рефакторингу. Ці стратегії були створені для покращення згуртованості та зв'язку системи, яка підлягає рефакторингу. Ідея Дюбуа багатообіцяюча, але вона стосується кількох операцій рефакторингу (зокрема п'яти) і визначає лише шість стратегій, які не охоплюють усі можливі випадки [11].

Роботи інших авторів зосереджені на тому, як виявити можливості рефакторингу та виконати пов'язані з ними операції з урахуванням нефункціональних вимог системи, що рефакторингується.

У цьому контексті Мілопус та Ю представили структуру, в якій розробник використовував графи Schema integration graph (SIG) для ідентифікації операцій рефакторингу, які можна застосувати до програми, щоб задовольнити нефункціональні вимоги виражений у SIG. SIG – це графіки, які показують залежності між цілями, підзавданнями, ресурсами тощо [13].

Автори також представили чотириетапний алгоритм для ідентифікації та виконання операцій рефакторингу. Ця техніка повністю ручна. Крім того, його важко застосувати через дві проблеми: 1) незрозуміло, які операції рефакторингу можуть покращити певний аспект програмного забезпечення, і 2) незрозуміло, скільки операцій необхідно для досягнення заданої цілі.

Крім того, в загальному випадку збіжність процесу не гарантується, оскільки можуть існувати операції, які покращують і погіршують протилежні характеристики. У таких випадках застосування операції рефакторингу може задовольнити ціль g1, але порушити іншу g2, а застосування іншої операції рефакторингу для досягнення мети g2 може погіршитися

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

і, отже, порушити умову g1 (яка раніше була задоволена). У такому випадку алгоритм не сходиться.

Рефакторинг онтологій. Дотепер рефакторинг застосовувався до широкого діапазону джерел і артефактів: програмного забезпечення, моделей UML, варіантів використання тощо [35]. Пропонується визначення рефакторинга, яке, можливо, найкраще визначає його значення незалежно від артефакту, який потрібно рефакторингувати: рефакторинг – це процес переписування письмового матеріалу для покращення його читабельності чи структури з явною метою збереження його значення чи поведінки [15].

Всі артефакти, які були перероблені до теперішнього часу слідують граматиці і тому можуть бути виражені як текстове представлення, що робить вищенаведене визначення застосовним у всіх випадках. Однак кожен артефакт, як правило, має своє власне визначення рефакторингу, яке чітко визначає значення і поведінку в його контексті.

Наприклад, рефакторинг програмного забезпечення визначається як процес реструктуризації програмного забезпечення, із метою зробити його більш зрозумілим і легше підтримуваним без зміни його поведінки. Оскільки мета всіх програмних систем полягає в тому, щоб запропонувати заздалегідь визначену поведінку – тобто завжди повертати однакові виходи для певного набору входів – відповідність між двома рефакторинговими визначеннями є чіткою [22].

У контексті бази даних Амблер перевизначив рефакторинг [1] як процес зміни схеми бази даних, що покращує її дизайн, зберігаючи при цьому як її поведінкову, так і інформаційну семантику. Це визначення не дуже точне, але, як і попереднє, воно визначає якісні фактори, які необхідно покращити (дизайн), а також визначає поведінку бази даних, що характеризується як інформаційна семантика (виражена та сама інформаційна база) та поведінкова семантика (тригери, збережені процедури тощо).

Онтології не є ні програмами, ні базами даних. Тому їх рефакторингове визначення слід уточнити, як і в вищезгаданих випадках [2]. Рівень абстракції онтології вище, ніж у схеми бази даних або програми. Тому всі якісні фактори, пов’язані з конкретною реалізацією концептуалізації або представленням доменної популяції, не мають відношення до якості онтології, оскільки її цілі по суті є семантичними. Таким чином, можемо визначити онтологічний рефакторинг як: процес реструктуризації онтологій для поліпшення їх читабельності або структури, зберігаючи при цьому відповідні знання [33].

Онтології призначені для задоволення множини вимог [32]. Рефакторинг онтології має зберігати конкретні знання, якщо ці знання, необхідні для задоволення її вимог. Іншими словами, рефакторована онтологія повинна бути здатна вивести ті ж знання, що і оригінальна онтологія [34]. Тому метою онтологічного рефакторингу є не зміна асоційованої концептуалізації (концептуальної зміни), а спосіб представлення асоційованої концептуалізації (репрезентативної зміни).

Одним з найскладніших завдань при виконанні рефакторингових операцій є зміна вихідного коду, який відноситься до рефакторингових елементів [22]. Наприклад, якщо ми виконуємо рефакторинг операції «Change method», щоб змінити назву методу GetPersons на GetPeople, всі посилання на метод GetPersons у вихідному коді повинні бути ідентифіковані і замінені посиланнями на метод GetPeople. Ця проблема також виникає в онтологічному рефакторингу, навіть якщо онтологія не визначає поведінкову інформацію, оскільки онтології можуть містити загальні обмеження цілісності, наприклад, деякі правила SWRL – Semantic Web Rule Language. це мова правил, яка використовується для створення логічних правил у рамках семантичного вебу. Вона дозволяє описувати правила, які працюють разом із онтологіями, написаними, наприклад, на OWL (Web Ontology Language). Ці обмеження можуть стосуватися будь-якого поняття онтології. Тому після зміни концепції всі обмеження цілісності, які відносяться до цього поняття, повинні бути змінені для підтримки синтаксичної узгодженості онтології [16].

Іншою проблемою в онтологічному рефакторингу є той факт, що тести не можуть бути виконані, для того, щоб перевірити, що поведінка онтології не була змінена [17]. Тести такого роду необхідні в програмному забезпеченні та рефакторингу баз даних, але не можуть бути застосовані до онтологій, оскільки, як згадува-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

лося вище, онтології не можуть бути виконані. Однак перевірка певного роду може проводитися на різних онтологічних інстанціях для перевірки, після кожного виконання рефакторингової операції, чи були будь-які екземпляри втрачені внаслідок зміних [31]. Для виконання цього тесту операція рефакторингу повинна змінювати не тільки структуру онтології, але і її інформаційну базу (екземпляри онтології) [20].

Операції рефакторингу онтологій. Операції рефакторингу онтологій поділяються на два основних типи: структурний рефакторинг та рефакторинг обмежень цілісності [15].

Структурні рефакторингові операції: вони можуть рефакторувати структурні елементи онтології (поняття, типи відносин, узагальнюючі відносини та екземпляри та обмеження, вбудовані в мову онтології).

Рефакторинг обмежень цілісності: вони можуть рефакторувати динамічні елементи онтології, такі як правила виведення, написані в SWRL або OCL та його загальні обмеження цілісності [16].

Перша група рефакторингових операцій може бути застосована до будь-якої онтології, а друга група актуальна тільки в онтологіях, які містять загальні обмеження цілісності або операції [38].

Структурні рефакторингові операції – це ті, які змінюють структурні поняття онтології, тобто її класи, типи зв’язків, їх екземпляри та обмеження цілісності, які вбудовані в мову онтології, такі як відносини успадкування, які визначають, що поняття є підтипом іншого поняття, або обмеження типу відносин.

Рефакторингові операції структурного зв’язку класифікуються в межах трьох основних категорій відповідно до їх призначення [22]:

– переміщення ознак між поняттями: операції, які змінюють контекст, в якому визначаються властивості онтології (типи відносин і обмеження цілісності);

– організація даних: операції, які змінюють онтологічну структуру, щоб полегшити роботу з її даними;

– робота з узагальненням: операції, що використовуються для зміни таксономії або переміщення онтологічних властивостей (типів відносин і обмежень цілісності) через таксономію онтології.

Операції із даної категорії можуть бути використані для реструктуризації вмісту загальних обмежень цілісності. «Обмеженнями цілісності» називаються такі загальні обмеження цілісності, які не можуть бути представлені безпосередньо мовою онтології, і для їх вираження потрібно використовувати іншу мову, таку як мова OCL у випадку онтологій UML. Ці операції марні, коли онтологія, яка рефакторується, не допускає загальних обмежень цілісності, як у випадку онтології, яка використовує тільки мову OWL [16].

Рефакторингові операції обмеження цілісності класифікуються в межах двох основних категорій відповідно до їх призначення [21]:

– складання обмежень цілісності: операцій, які покращують якість обмежень цілісності;

– спрощення обмежень цілісності: операції, які спрощують умови та вирази, що використовуються в обмеженнях цілісності.



Рис. 1. Класифікація методів рефакторингу онтологій
Fig. 1. Classification of ontology refactoring methods

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

Результати

У результаті проведеного дослідження здійснено систематичний аналіз наукових праць, присвячених рефакторингу програмного забезпечення, концептуальних моделей та онтологій. Встановлено, що еволюція підходів до рефакторингу характеризується поступовим переходом від локальних змін програмного коду до більш абстрактних рівнів, зокрема схем даних, UML-моделей та онтологічних структур. Показано, що більшість існуючих підходів до рефакторингу онтологій мають фрагментарний характер і зосереджуються на окремих операціях або тактиках без формування цілісної методології.

У ході аналізу виявлено основні проблеми застосування рефакторингу до онтологій, серед яких відсутність узгодженого визначення поняття «рефакторинг онтології», нестача уніфікованих каталогів рефакторингових операцій та обмеженість інструментальної підтримки. Водночас встановлено, що застосування рефакторингових підходів до онтологій позитивно впливає на їх модульність, когерентність та можливості повторного використання знань за умови збереження семантичної цілісності.

На основі узагальнення результатів проаналізованих досліджень визначено перспективні напрями подальшого розвитку, зокрема необхідність формування системного підходу до рефакторингу онтологій, розроблення критеріїв оцінювання якості змін та створення методологічного підґрунтя для автоматизації відповідних процесів.

Наукова новизна і практична значимість

Наукова новизна роботи полягає в систематичному аналізі та узагальненні підходів до рефакторингу програмного забезпечення з подальшим перенесенням ідей та методів рефакторингу на рівень онтологій як специфічного класу програмних і знаннєвих структур. Уперше рефакторинг онтологій розглядається не лише як технічний процес реструктуризації, а як інструмент підтримки якості знань, що охоплює структурні, семантичні та концептуальні аспекти. Запропоновано класифікацію методів рефакторингу за рівнем абстракції та характером впливу на онтологічні моделі, що дозволяє систематизувати наявні підходи та визначити їх сильні й слабкі сторони. Отримані результати сприяють поглибленню теоретичного розуміння механізмів рефакторингу в контексті знаннє-орієнтованих систем, семантичного вебу та кіберфізичних систем.

Практична значимість роботи полягає в можливості використання отриманих результатів під час проєктування, супроводу та еволюції онтологій і знаннє-орієнтованих інформаційних систем. Запропоновані підходи можуть бути застосовані для підвищення модульності, когерентності та повторного використання онтологічних моделей, а також для зменшення зчеплення між концептами без порушення семантичної цілісності. Результати дослідження можуть слугувати методологічною основою для розроблення інструментів автоматизованого рефакторингу онтологій із використанням методів машинного навчання та штучного інтелекту, а також для адаптації процесів рефакторингу до предметних галузей, що характеризуються високою динамікою змін.

Висновки

Протягом останніх двадцяти років рефакторинг зарекомендував себе як потужний і ефективний інструмент покращення програмного забезпечення. Його застосування не обмежується лише кодом – концепції рефакторингу успішно були адаптовані до інших типів концептуальних артефактів, таких як бази даних та UML-моделі. Проте у випадку з онтологіями подібна практика все ще перебуває на стадії становлення. Попри численні спроби, повноцінного впровадження рефакторингу до онтологій досі не досягнуто, що вказує на потребу в подальшому дослідженні та систематизації.

Основні виклики пов’язані з відсутністю чіткого визначення самого поняття «рефакторинг онтології» та нестачею узгодженого й системного підходу. Також бракує уніфікованого каталогу рефакторингових операцій, подібного до того, який існує в інженерії програмного забезпечення. Це значно ускладнює процес практичного застосування рефакторингу до онто-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

логій, особливо в контексті досягнення конкретних цілей кінцевого користувача.

У межах дослідження було розглянуто еволюцію терміну «рефакторинг» і проаналізовано його застосування до різних типів інформаційних структур. Особливу увагу було приділено існуючим підходам до рефакторингу онтологій, аналізу ефективності окремих методів та критеріям якості. У ході аналізу виявлено, що більшість наукових праць зосереджуються на описі окремих методів або тактик рефакторингу, однак не пропонують комплексних інструментів чи практичних рекомендацій щодо їх інтеграції у загальну стратегію роботи з онтологіями.

Можна зробити висновок про необхідність подальшого розвитку цієї сфери, створення повноцінного методологічного підґрунтя та інструментарію, що дозволить ефективно адаптувати рефакторинг до задач онтологічного моделювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ambler S. *Agile database techniques: effective strategies for the agile software developer*. Hoboken : Wiley, 2003. 480 p.
2. Ambler S. *Agile modeling: effective practices for extreme programming and the unified process*. New York : John Wiley & Sons, 2002. 400 p.
3. Ambler S. W., Sadalage P. J. Refactoring databases: Evolutionary database design. Boston : Addison-Wesley Professional, 2006. 384 p.
4. Assenova P., Johannesson P. Improving quality in conceptual modelling by the use of schema transformations. *Conceptual modeling – ER'96 : 15th international conference on conceptual modeling*. Berlin : Springer, 1996. P. 277–291. DOI: https://doi.org/10.1007/BFb0019929
5. Astels D. Refactoring with UML. *Proceedings of the 3rd International Conference on eXtreme Programming and Flexible Processes in Software Engineering (XP2002)*. Alghero, Italy, 2002. P. 67–70.
6. Batini C., Ceri S., Navathe S. B. *Conceptual database design: an entity-relationship approach.* Redwood City : Benjamin/Cummings, 1992. 470 p.
7. Beck K. *Extreme programming explained.* Boston : Addison-Wesley, 1999.
8. Bergstein P. L. Object-preserving class transformations. Proceedings of the Conference on Object-Oriented Programming Systems, Languages, and Applications (OOPSLA '91). New York : ACM Press, 1991. P. 299–313. DOI: https://doi.org/10.1145/117954.117977
9. Bottoni P., Parisi-Presicce F., Taentzer G. Coordinated distributed diagram transformation for software evolution. *Electronic notes in theoretical computer science*. 2003. Vol. 72, Iss. 4. P. 59–70. DOI: https://doi.org/10.1016/s1571-0661(04)80626-1
10. Du Bois B. Opportunities and challenges in deriving metric impacts from refactoring postconditions. *Proceedings of WOOR'04*. 2004.
11. Du Bois B., Demeyer S., Verelst J. Refactoring – improving coupling and cohesion of existing code. *Proceedings of the 11th Working Conference on Reverse Engineering (WCRE 2004)*. Los Alamitos, CA : IEEE Computer Society, 2004. P. 144–151. DOI: https://doi.org/10.1109/wcre.2004.33
12. Casais E. Reorganizing an object system. *Object-oriented development.* Genève : Centre universitaire d'informatique, 1989. P. 161–189.
13. Chung L., Nixon B. A, Yu E., Mylopoulos J. *Non-Functional Requirements in Software Engineering* : monograph. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2000. 439 p.
14. Conesa Caralt J. Ontology-Driven Information Systems: Pruning and Refactoring of Ontologies. *Doctoral Symposium of the 7th International Conference on the Unified Modeling Language (UML 2004)*. Lisbon, 2004.
15. Conesa Caralt J. *Pruning and refactoring ontologies in the development of conceptual schemas of information systems* : doctoral dissertation. Barcelona : Technical University of Catalonia, 2008.
16. Correa A., Werner C. Applying refactoring techniques to UML/OCL models. *Proceedings of the International Conference on the Unified Modeling Language (UML 2004). Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 3273. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. P. 173–187. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30187-5_13
17. Critchlow M., Dodd K., Chou J., van der Hoek A. Refactoring product line architectures. *Proceedings of the Workshop on Refactoring: Achievements, Challenges, Effects (REFACE'03)*. 2003. P. 23–26.
18. Ding L., Finin T., Joshi A., Pan R., Cost R. S., Peng Y., Reddivari P., Doshi V., Sachs J. Swoogle: A search and metadata engine for the semantic web. *Proceedings of the 13th ACM Conference on Information and*

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

Knowledge Management (CIKM'04). (Washington, 8-13 November, 2004). Washington, 2004. P. 652–659. DOI: https://doi.org/10.1145/1031171.1031289

19. Eckhardt J., Vogelsang A., Méndez Fernández D. Are "Non-functional" Requirements Really Non-functional? An Investigation of Non-functional Requirements in Practice. *Proceedings of the 38th International Conference on Software Engineering (ICSE 2016)*. New York : ACM, 2016. P. 832–842. DOI: https://doi.org/10.1145/2884781.2884788
20. Eick S. G., Steffen J. L., Sumner E. E. SeeSoft – a tool for visualizing line-oriented software statistics. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1992. Vol. 18, Iss. 11. P. 957–968. DOI: https://doi.org/10.1109/32.177365
21. Ernst M. D., Cockrell J., Griswold W. G., Notkin D. Dynamically discovering likely program invariants to support program evolution. *IEEE transactions on software engineering*. 2001. Vol. 27, Iss. 2. P. 99–123. DOI: https://doi.org/10.1109/32.908957
22. Fowler M., Beck K., Brant J., Opdyke W., Roberts D. *Refactoring: Improving the Design of Existing Code.* Boston : Addison‑Wesley, 1999. 431 p.
23. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. Boston : Addison-Wesley, 1995. 395 p.
24. Griswold W. G., Notkin D. Automated assistance for program restructuring. *ACM transactions on software engineering and methodology*. 1993. Vol. 2, Iss. 3. P. 228–269. DOI: https://doi.org/10.1145/152388.152389
25. Halpin T. *Information modeling and relational databases: from conceptual analysis to logical design*. San Francisco : Morgan Kaufmann, 2001. 763 p.
26. Halpin T. A., Proper H. A. Database schema transformation and optimization. *Proceedings of the 14th International Conference on Object-Oriented and Entity-Relationship Modeling (OOER'95)*. (Gold Coast, 12-15 December, 1995). Gold Coast, 1995. P. 191–203.
27. Kataoka Y., Ernst M. D., Griswold W. G., Notkin D. Automated support for program refactoring using invariants. *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM 2001)*. (Florence, 07-09 November 2001). Florence, 2001. P. 736–743. DOI: https://doi.org/10.1109/icsm.2001.972794
28. Mens K., Tourwé T. Delving source code with formal concept analysis. *Computer languages, systems & structures*. 2005. Vol. 31, Iss. 3-4. P. 183–197. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cl.2004.11.004
29. Murphy-Hill E., Parnin C., Black A. P. How we refactor, and how we know it. *IEEE transactions on software engineering*. 2012. Vol. 38, Iss. 1. P. 5–18. DOI: https://doi.org/10.1109/tse.2011.41
30. Opdyke W. F. *Refactoring object-oriented frameworks* : PhD dissertation. Urbana-Champaign : University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992.
31. Roberts D., Brant J., Johnson R. A refactoring tool for Smalltalk. *Theory and practice of object systems*. 1997. Vol. 3, Iss. 4. P. 253–263.
32. Shynkarenko V., Zhuchyi L. Ontological harmonization of railway transport information systems. *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)* (Kharkiv, 22-23 April, 2021). Kharkiv, 2021. Vol. 2870. P. 541–554.
33. Shynkarenko V., Zhuchyi L. Semantic Checking of Different Type Information Sources About Permitted Speeds in Railway Transport. *CEUR Workshop Proceedings. 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)* (Gliwice, 12-13 May, 2022). Gliwice, 2022. Vol. 3171. P. 711–723.
34. Shynkarenko V., Zhuchyi L., Ivanov O. Conceptualization of the tabular representation of knowledge. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. (Lviv, 22-25 September, 2021). Lviv, 2021. P. 248–251. DOI: https://doi.org/10.1109/csit52700.2021.9648761
35. Shynkarenko V., Zhuchyi L., Ivanov O. Ontology-based semantic checking of data in railway infrastructure information systems. *Foundations of computing and decision sciences*. 2022. Vol. 47, Iss. 3. P. 291–319. DOI: https://doi.org/10.2478/fcds-2022-0016
36. Simon F., Steinbrückner F., Lewerentz C. Metrics based refactoring. *Proceedings of the 5th European Conference on Software Maintenance and Reengineering (CSMR 2001)*. (Lisbon, 14-16 March, 2001). Lisbon, 2001. P. 30–38. DOI: https://doi.org/10.1109/.2001.914965
37. Van Eetvelde N., Janssens D. A hierarchical program representation for refactoring. *Electronic notes in theoretical computer science*. 2004. Vol. 82, Iss. 7. P. 91–104. DOI: https://doi.org/10.1016/s1571-0661(04)80749-7
38. Van Gorp P., Stenten H., Mens T., Demeyer S. Towards automating source-consistent UML refactoring. «*UML» 2003 – The Unified Modeling Language. Modeling Languages and Applications. Lecture Notes in Computer Science*. 2003. Vol. 2863. P. 144–158. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-45221-8_15

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

D. O. KARPOVSKYI[1*]

[1*]Dep. «Computer Science», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, phone +38 (056) 733 19 61, e-mail karpovskyi.d@gmail.com, ORCID 0009-0002-0020-5148

Methods and Tools for Refactoring Ontologies

Purpose. This work is aimed at investigating the evolution of the refactoring concept – from a tool for optimizing program code to a powerful means of improving data structures, algorithms, and business processes. The main purpose of the study is to examine the historical development of software and ontology refactoring, as well as the possibilities of applying improvement methods to ontologies as a specific type of software structure that plays a key role in knowledge-oriented systems, the Semantic Web, and next-generation cyber-physical systems. **Methodology.** The methodological basis of the study consists of general scientific and specialized methods of analysis and synthesis. A systematic review of scientific publications in the fields of software refactoring and ontology engineering was conducted using full-text and abstract scientometric databases. Comparative analysis methods were applied to compare different refactoring approaches, structural and functional analysis was used to study changes in software and ontology models, and classification methods were employed to group existing refactoring techniques by level of abstraction and application domain. **Finding.** Within the scope of the study, a comprehensive analysis of scientific publications devoted to refactoring and ontology engineering was performed using full-text and abstract databases. The evolution of refactoring approaches was examined, including data schema transformations, conceptual refactoring, modification of integrity constraints, and the development of tools for assessing the quality of changes. Particular attention was paid to the application of refactoring to ontologies, including an analysis of its impact on modularity, coherence, and knowledge reuse. **Originality.** The scientific novelty of the work lies in the systematic study of existing refactoring methods and their classification by type. A comprehensive analysis of the strengths and weaknesses of each approach was carried out, enabling a well-founded selection of optimal strategies for software improvement. The proposed approach contributes to a deeper understanding of refactoring mechanisms in the context of various application domains. **Practical value.** The presented results can be used in the design, maintenance, and evolution of knowledge-oriented systems, where structural consistency and semantic support play an important role. Prospects for further research are outlined, including the automation of ontology refactoring processes using machine learning methods, the expansion of evaluation metric systems, and the adaptation of the proposed solutions to application domains characterized by a high degree of change dynamics.

Keywords: information technology; ontology; refactoring; knowledge bases; refactoring methods; quality metrics; software; schema transformation; refactoring quality

REFERENCES

1. Ambler, S. (2002). *Agile modeling: effective practices for extreme programming and the unified process*. New York: John Wiley & Sons. (in English)
2. Ambler, S. (2003). *Agile database techniques: effective strategies for the agile software developer*. Hoboken: Wiley. (in English)
3. Ambler, S. W., & Sadalage, P. J. (2006). Refactoring databases: Evolutionary database design. Boston : Addison-Wesley Professional. (in English)
4. Assenova, P., & Johannesson, P. (1996). Improving quality in conceptual modelling by the use of schema transformations. *Conceptual modeling – ER'96 : 15th international conference on conceptual modeling*. (pp. 277-291). Berlin: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/BFb0019929 (in English)
5. Astels, D. (2002). Refactoring with UML. In *Proceedings of the 3rd International Conference on eXtreme Programming and Flexible Processes in Software Engineering (XP2002)* (pp. 67-70). Alghero, Sardinia, Italy. (in English)
6. Batini, C., Ceri, S., & Navathe, S. B. (1992). *Conceptual database design: an entity-relationship approach*. Redwood City: Benjamin/Cummings. (in English)
7. Beck, K. (1999). *Extreme programming explained*. Boston: Addison-Wesley. (in English)
8. Bergstein, P. L. (1991). Object-preserving class transformations. *In Proceedings of the Conference on Object-Oriented Programming Systems, Languages, and Applications (OOPSLA '91)* (pp. 299-313). New York, NY: ACM Press. DOI: https://doi.org/10.1145/117954.117977 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

9. Bottoni, P., Parisi-Presicce, F., & Taentzer, G. (2003). Coordinated Distributed Diagram Transformation for Software Evolution. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 72*(4), 59-70. DOI: https://doi.org/10.1016/s1571-0661(04)80626-1 (in English)
10. Du Bois, B. (2004). Opportunities and challenges in deriving metric impacts from refactoring postconditions. *Proceedings of WOOR'04*. (in English)
11. Du Bois, B., Demeyer, S., & Verelst, J. (2004). Refactoring – improving coupling and cohesion of existing code. In *Proceedings of the 11th Working Conference on Reverse Engineering (WCRE 2004)* (pp. 144-151). IEEE. DOI: https://doi.org/10.1109/wcre.2004.33 (in English)
12. Casais, E. (1989). Reorganizing an object system. *Object-oriented development*. (pp. 161-189). Genève: Centre universitaire d'informatique (in English)
13. Chung, L., Nixon, B. A., Yu, E., & Mylopoulos, J. (2000). *Non-functional requirements in software engineering*: monograph. Boston: Kluwer Academic Publishers. (in English)
14. Conesa Caralt, J. (2004). Ontology-driven information systems: Pruning and refactoring of ontologies. In *Doctoral Symposium of the 7th International Conference on the Unified Modeling Language (UML 2004),* Lisbon, Portugal. (in English)
15. Conesa Caralt, J. (2008). *Pruning and refactoring ontologies in the development of conceptual schemas of information systems* (Doctoral dissertation). Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain. (in English)
16. Correa, A., & Werner, C. (2004). Applying refactoring techniques to UML/OCL models. In *Proceedings of the International Conference on the Unified Modeling Language (UML 2004) Lecture Notes in Computer Science*. (Vol. 3273, pp. 173-187). Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30187-5_13 (in English)
17. Critchlow, M., Dodd, K., Chou, J., & van der Hoek, A. (2003). Refactoring product line architectures. In *Proceedings of the Workshop on Refactoring: Achievements, Challenges, Effects (REFACE'03)* (pp. 23-26). (in English)
18. Ding, L., Finin, T., Joshi, A., Pan, R., Cost, R. S., Peng, Y., Reddivari, P., Doshi, V., & Sachs, J. (2004, November). Swoogle: A search and metadata engine for the semantic web. In *Proceedings of the 13th ACM Conference on Information and Knowledge Management (CIKM '04)* (pp. 652-659). Washington, USA. DOI: https://doi.org/10.1145/1031171.1031289 (in English)
19. Eckhardt, J., Vogelsang, A., & Méndez Fernández, D. (2016). Are "non-functional" requirements really non-functional? An investigation of non-functional requirements in practice. In *Proceedings of the 38th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 832-842). New York, USA. DOI: https://doi.org/10.1145/2884781.2884788 (in English)
20. Eick, S. G., Steffen, J. L., & Sumner, E. E. (1992). SeeSoft – A tool for visualizing line-oriented software statistics. *IEEE Transactions on Software Engineering, 18*(11), 957-968. DOI: https://doi.org/10.1109/32.177365 (in English)
21. Ernst, M. D., Cockrell, J., Griswold, W. G., & Notkin, D. (2001). Dynamically discovering likely program invariants to support program evolution. *IEEE Transactions on Software Engineering, 27*(2), 99-123. DOI: https://doi.org/10.1109/32.908957 (in English)
22. Fowler, M., Beck, K., Brant, J., Opdyke, W., & Roberts, D. (1999). *Refactoring: Improving the design of existing code.* Boston: Addison-Wesley. (in English)
23. Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J. (1995). *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. Boston: Addison-Wesley. (in English)
24. Griswold, W. G., & Notkin, D. (1993). Automated assistance for program restructuring. *ACM transactions on software engineering and methodology, 2*(3), 228-269. DOI: https://doi.org/10.1145/152388.152389 (in English)
25. Halpin, T. (2001). *Information modeling and relational databases: from conceptual analysis to logical design.* San Francisco: Morgan Kaufmann. (in English)
26. Halpin, T. A., & Proper, H. A. (1995, December). Database schema transformation and optimization. In *Proceedings of the 14th International Conference on Object-Oriented and Entity-Relationship Modeling (OOER'95)* (pp. 191-203). Gold Coast, Australia. (in English)
27. Kataoka, Y., Ernst, M. D., Griswold, W. G., & Notkin, D. (2001, November). Automated support for program refactoring using invariants. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM 2001)* (pp. 736-743). Florence, Italy. DOI: https://doi.org/10.1109/icsm.2001.972794 (in English)
28. Mens, K., & Tourwé, T. (2005). Delving source code with formal concept analysis. *Computer Languages, Systems & Structures, 31*(3-4), 183-197. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cl.2004.11.004 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

29. Murphy-Hill, E., Parnin, C., & Black, A. P. (2012). How we refactor, and how we know it. *IEEE transactions on software engineering*, *38*(1), 5-18. DOI: https://doi.org/10.1109/tse.2011.41 (in English)
30. Opdyke, W. F. (1992). *Refactoring object-oriented frameworks* (Doctoral dissertation). Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign (in English)
31. Roberts, D., Brant, J., & Johnson, R. (1997). A refactoring tool for Smalltalk. *Theory and practice of object systems*, *3*(4), 253-263. (in English)
32. Shynkarenko, V., & Zhuchyi, L. (2021, April). Ontological harmonization of railway transport information systems. In *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)* (Vol. 2870, pp. 541-554). Kharkiv, Ukraine. (in English)
33. Shynkarenko, V., & Zhuchyi, L. (2022, May). Semantic Checking of Different Type Information Sources About Permitted Speeds in Railway Transport. *CEUR Workshop Proceedings. 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)* (Vol. 3171, pp. 711-723). Gliwice, Poland. (in English)
34. Shynkarenko, V., Zhuchyi, L., & Ivanov, O. (2021, September). Conceptualization of the tabular representation of knowledge. In *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (pp. 248-251). Lviv, Ukraine. DOI: https://doi.org/10.1109/csit52700.2021.9648761 (in English)
35. 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. DOI: https://doi.org/10.2478/fcds-2022-0016 (in English)
36. Simon, F., Steinbrückner, F., & Lewerentz, C. (2001, March). Metrics based refactoring. In *Proceedings of the 5th European Conference on Software Maintenance and Reengineering (CSMR 2001)* (pp. 30-38). Lisbon, Portugal. DOI: https://doi.org/10.1109/.2001.914965 (in English)
37. Van Eetvelde, N., & Janssens, D. (2004). A hierarchical program representation for refactoring. *Electronic notes in theoretical computer science*, *82*(7), 91-104. DOI: https://doi.org/10.1016/s1571-0661(04)80749-7 (in English)
38. Van Gorp, P., Stenten, H., Mens, T., & Demeyer, S. (2003). Towards automating source-consistent UML refactoring. «*UML» 2003 – The Unified Modeling Language. Modeling Languages and Applications*. *Lecture Notes in Computer Science*, *2863*, 144-158. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45221-8_15 (in English)

Надійшла до редколегії: 12.11.2025
Дата рецензування: 22.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/356061
© Д. О. Карповський, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК 004.94:519.1

О. І. ЛЕТУЧИЙ[1*]

[1*]Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 375 15 35, ел. пошта o.i.letuchyi@ust.edu.ua, ORCID 0009-0004-9057-7029

Визначення експериментальної обчислювальної складності реалізації просторових графових фракталів засобами конструктивно-продукційного моделювання

Мета. Дослідження спрямовано на визначення показників обчислювальної складності з формування просторових графових фракталів, що у свою чергу вимагає розробки програмного застосунку для їх формування, який дає змогу їх візуально переглядати, а також засобів для підрахунку показників обчислювальної складності. **Методика.** Для формування просторових графових фракталів використовуються підхід конструктивно-продукційного моделювання, в основі якого лежать правила продукції притаманні формальним граматикам. Конструктивно-продукційне моделювання передбачає ряд перетворень, таких як: спеціалізація, інтерпретація та конкретизація. Перетворення структури описують яким чином можна сформувати просторовий графовий фрактал, що включає визначення предметної області, атрибутику, операцій над атрибутами, правіла підстановки, умови та обмеження над операціями, опис алгоритмів та реалізацію у вигляді програмного забезпечення. Визначаються показники базових операцій, що виконуються на асемблером рівні: арифметичні, присвоєння, порівнювання та переходу. Для підрахунку показників ітерації формування графового фракталу на рівні коду додаються спеціальні лічильники. Лічильники операцій знаходяться лише в тих ділянках коду, які безпосередньо виконуються під час кожної ітерації формування фракталів. **Результати.** Розроблено програму на мові C# з графічним інтерфейсом. Визначено показники експериментальної обчислюваної складності формування просторових графових фракталів засобами конструктивно-продукційного моделювання на основі використання різних типів кришталевих ґраток. Знайдені залежності мають кореляційне відношення близьке до одиниці. **Наукова новизна.** Було визначено експериментальну обчислювальну складність реалізації просторових графових фракталів засобами конструктивно-продукційного моделювання. В якості основи формування просторових ґрафових фракталів використовуються різні типи кристалічних ґраток, які описують розташування атомів кристалічних речовин. **Практична значимість**. Визначення показників обчислювальної складності базових операцій дає можливість прогнозувати час виконання ітерації формування просторових графових фракталів, а також оптимізувати алгоритми її реалізації. Аналіз показників базових операцій дає можливість знайти вузькі місця в алгоритмах з формування просторових графових фракталів.

Ключові слова: метрики; обчислювальна складність; фрактали; граф; конструктивно-продукційне моделювання; формальні граматики; програмне забезпечення; інформаційні технології

Вступ

Особливість фракталів полягає в їхній здатності відтворювати багаторівневі форми, що спостерігаються в природному середовищі, наприклад, у структурі дерев, системі кровоносних судин чи мінералів.

Для моделювання фракталів існує кілька підходів, серед яких виділяються алгоритмічний і функціонально-алгоритмічний методи. Зокрема, часто використовують систему ітерованих функцій, що базується на сукупності стискаючих відображень, L-системи, а також стискаючі афінні автомати. Окремої уваги заслуговує підхід, що базується на конструктивно-продукційному моделюванні (КПМ) [10, 11], який розроблений на основі формальних граматик.

Лексикографічний добуток графів є стандартним інструментом у теорії графів для побудови нових графів з існуючих [2]. Крім того у досліджені продемонстровано, як формувати такі графи рекурсивно, а також доводяться їх фрактальні властивості.

Інноваційні методи синтезу та самоасемблювання нанорозмірних фрактальних молекулярних структур описуються в [4], які не є традиційними дендритичними полімерами, а базуються

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355432
© О. І. Летучий, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

на математичних фракталах. Основна ідея – створення штучних молекул, що імітують природні фрактальні патерни для отримання матеріалів з унікальними властивостями на нанорівні. Ключовий приклад – нанорозмірний гексагональний трикутник Серпінського, який є плоскою молекулою діаметром близько 12 нм з порожнистим центром. Ця структура складається з менших гексагонів, що формують більші, з використанням металоорганічних зв'язків такі як іони рутенію (Ru) та заліза (Fe). Подібні структури можуть підпадати під визначення фрактального графу.

Розглядаються фрактальні просторові каркаси [5] (fractal space frames) – це ієрархічні структури з самоподібними патернами на кількох масштабах довжин, подібні до просторових каркасів, але з фрактальною геометрією для кращого розподілу навантажень. Виконаний аналіз як такі конструкції поводяться під м'яким стискаючим навантаженням, тобто в режимах, де тиск є відносно слабким і контрольованим. Подібні просторові каркаси можна вважати фрактальними графами у просторі.

КПМ використовується в різних наукових сферах: обробці природньомовних текстів [8, 9, 12], а саме: моделюванні природньої мови [12], визначенні авторства текстів [8, 9], аналізу ефективності стемування у задачах визначення авторства текстів [1]; дослідженнях фракталів: нетрадиційному представленні геометричних фракталів [6], моделюванні мультифракталів на основі мультиконструкторів [7], формуванні геометричних фракталів з онтологічною підтримкою [3], моделюванні фрактальних кристалічних ґраток [13]; при вирішенні задач удосконалення інформаційних систем залізничного транспорту: онтологічної гармонізації [14], семантичної перевірки джерел інформації різних типів про дозволені швидкості на залізничному транспорті [15].

Для вирішення задач зіставлення та виявлення відповідного семантичного змісту в текстах використовується конструктивно-продукційна модель [1, 8, 9, 12], яка розглядає природню мову як конструктивний процес, в межах якої мовні одинці подаються як сукупність правил та конструкцій.

Гнучкість КПМ досягається шляхом поступового перетворення конструктора: спеціалізації, інтерпретації, конкретизації, реалізації. Спеціалізація визначає предметну область носія, скінчену множину операцій, їх семантику, а також обмеження. Інтерпретація передбачає зв'язування операцій сигнатури з алгоритмами виконання певної алгоритмічної структури. Конкретизація КПМ полягає у розширенні аксіоматики множиною правил продукцій, визначенні конкретних множин нетермінальних і термінальних символів разом із їх атрибутами. Реалізація КПМ полягає у формуванні конструкції з елементів носія КПМ через виконання алгоритмів, які відповідають операціям сигнатури.

КПМ відкриває нові можливості для формування геометричних графів [3, 6, 7, 13]. Наприклад, комбінування різних, у тому числі класичних, фракталів у мультифрактал або формування фракталів з неоднорідних множин.

Нами представляється використання КПМ для побудови просторових графових фракталів. В якості основи для їх побудови використовується структура кристалічної ґратки, яку можна представити у вигляді просторового графу. Кристалічна ґратки лежить в основі кристалічної структури. При зміни масштабу кристалічної структури зберігається візуальна схожість з типом її кристалічної ґратки.

Мета

Метою дослідження є визначення показників експериментальної обчислювальної складності з формування просторових графових фракталів.

Методика

Для формування просторових графових фракталів використовується підхід конструктивно-продукційної моделювання (КПМ), який заснований на формальних граматиках. В роботі [10, 11] закладено роботи узагальненого конструктора:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle, \qquad (1),$$

де M – неоднорідний носій структури; Σ – сигнатура, що складається з множини операцій зв'язування, підстановки і виводу, операцій над атрибутами і відносин підстановки; Λ – інформаційне забезпечення, яке включає: онтологію,

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355432
© О. І. Летучий, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

ціль, правила, обмеження, умови початку та завершення конструювання.

Щоб сформувати просторовий графовий фрактал необхідно виконати ряд уточнюючих послідовних перетворень узагальненої КПМ [10, 11]: спеціалізація, інтерпретація, конкретизація, реалізація.

Спеціалізація конструктора – формування геометричних фігур (конструкцій) у просторі R^3, у тому числі просторових графових фракталів:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle_S \mapsto C_G = \langle M_G, \Sigma_G, \Lambda_G \rangle \quad (2),$$

де $\Lambda_G = \Lambda \cup \Lambda_1 \cup \Lambda_2$, $\Lambda_1 = \{M_G \supset R^3 \cup T_G \cup F_G \cup K_G, \Sigma_G = \{\Xi_G, \Theta_G, \Phi_G, \{\rightarrow, \hookleftarrow\}\}, \Phi_G = \{\gg, \circ, +, -, *, /, \bigstar\}, \Theta_G = \{\Rightarrow, |\Rightarrow, \|\Rightarrow\}\}$. Тут множина: T_G – умовно неподільних графічних елементів конструювання; F_G, K_G – проміжних форм та конструкцій відповідно; Ξ_G – відносини взаємного розташування геометричних фігур (зв'язування елементів), які задаються графічно; операції: Θ_G – підстановки та виведення; Φ_G – операції над атрибутами, а також відношення підстановки ($\rightarrow$) та атрибутивності ($\hookleftarrow$).

Λ_2 містить наступні визначення, доповнення та обмеження, які уточнюють алфавіт, атрибути носія, відносини підстановки, задають особливості виконання операцій підстановки та виведення.

Фігурою або об'єктом будемо називати зв'язану компактну множну в просторі R^3.

Наявність атрибута w у елемента носія m будем визначати як ${}_w m$ (ідентифікатор m з атрибутом w), а те, що w є атрибутом ідентифікатора $m - w \hookleftarrow m$.

Термінальний алфавіт T_G складається з множини геометричних об'єктів з атрибутами.

У конструкторі, що буде розглядатися далі, передбачені наступні операції зв'язування і над атрибутами:

– дублювання множини $f_i \gg f_j$, множина f_i копіюється в f_j;

– копіювання сентенційної форми f_k в $\overline{f_k}$, з послідовною заміною одних фігур на інші, у порядку віддалення від останньої $\circ(\overline{f_k}, f_k)$;

– математичні операції над дійсними числами, які включають додавання, віднімання, множення, ділення;

– $\bigstar$ заміна кольору фігури на інший (перефарбування) $\bigstar(a,b)$.

Умовою закінчення висновку є виконання N-ї операції часткового виведення (гіпотетично N може дорівнювати ∞).

Для інтерпретації операцій конструювання необхідно визначити алгоритмічний конструктор:

$$C_A = \langle M_A, V_A, \Sigma_A, \Lambda_A \rangle, \quad (3),$$

де M_A – неоднорідний носій, Σ_A – сигнатура та Λ_A – аксіоматика; $V_A \subset M_A$ – множина базових алгоритмів внутрішнього виконавця конструювання, $V_A \supset \{A_1|^{f_j}_{l_h, l_q, f_i}, A_2|^{f_j}_{f_i, \Psi}, A_3|^{\bar{\Omega}}_{\sigma, \Psi}, A_4|^{a}_{a,b}, A_5|^{a}_{a,b}, A_6|^{c}_{a,b}, A_7|^{c}_{a,b}, A_8|^{a}_{a,b}, A_9|^{\overline{f_i}}_{f_i}, A_{10}|^{f_i, f_j}_{f_i}\}$

Зазначені вище алгоритми реалізують наступні операції:

– $A_1|^{f_j}_{l_h, l_q, f_i}$ – підстановки;

– $A_2|^{f_j}_{f_i, \Psi}, A_3|^{\bar{\Omega}}_{\sigma, \Psi}$ – часткового та повного виводу, f_i, f_j – форми, σ – початковий термінал, $\bar{\Omega}$ – множина сформованих конструкцій;

– $A_4|^{a}_{a,b}, A_5|^{a}_{a,b}, A_6|^{c}_{a,b}, A_7|^{c}_{a,b}$ – множення, ділення, додавання і віднімання дійсних чисел;

– $A_8|^{a}_{a,b}$ – перефарбування;

– $A_9|^{\overline{f_i}}_{f_i}$ – реалізація операції $\circ(\overline{f_i}, f_i)$;

– $A_{10}|^{f_i, f_j}_{f_i}$ – реалізація операції $f_i \gg f_j$.

Інтерпретація операцій конструювання (формування конструктивної системи):

$$\langle C_G = \langle M_G, \Sigma_G, \Lambda_G \rangle, C_A = \langle M_A, V_A, \Sigma_A, \Lambda_A \rangle \rangle_I \mapsto C_{GI} = \langle M_{GI}, \Sigma_{GI}, \Lambda_{GI} \rangle \quad (4),$$

де $I \mapsto$ – операція інтерпретації;

$$\Lambda_{GI} = \Lambda_G \cup \Lambda_A \cup \Lambda_3, \Lambda_3 = \{(A_1|^{f_j}_{l_h, l_q, f_i} \hookleftarrow \Rightarrow) (A_2|^{f_j}_{f_i, \Psi} \hookleftarrow |\Rightarrow), (A_3|^{\bar{\Omega}}_{\sigma, \Psi} \hookleftarrow \|\Rightarrow), (A_4|^{a}_{a,b} \hookleftarrow *), (A_5|^{a}_{a,b} \hookleftarrow /), (A_6|^{a}_{a,b} \hookleftarrow +), (A_7|^{a}_{a,b} \hookleftarrow -).$$

$$(A_8|^{a}_{a,b} \hookleftarrow \bigstar), (A_9|^{\overline{f_i}}_{f_i} \hookleftarrow \circ), (A_{10}|^{f_i, f_j}_{f_i} \hookleftarrow \gg)\}. \quad (5)$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355432
© О. І. Летучий, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Конкретизація конструктора C_{MSGF}, з назвою MSGF, що є англійською абревіатурою «мультиатрибутивні просторові графові фрактали»:

$$C_{GI} = \langle M_{GI}, \Sigma_{GI}, \Lambda_{GI} \rangle_K$$

$$\mapsto C_{MSGF} = \langle M_{GI}, \Sigma_{GI}, \Lambda_{MSGF} \rangle, \qquad (6)$$

де $\Lambda_{MSGF} = \Lambda_{GI} \cup \Lambda_4$, частина Λ_4 визначає:

– вузол (термінал) – n, з атрибутами розміру $size = 1$, та координатами $pos(x, y, z)$, атрибутом кольору $col = red$, атрибутами зв'язків по осям, атрибутами навантаження, атрибутами закріплення;

– ребро (термінал) – e, з атрибутами початку $start = (x, y, z)$, та кінця $end = (x, y, z)$;

– граф (нетермінал) – graph, складається з вузлів *n* та ребер *e*;

– кристалічна ґратка (нетермінал) – lattice, складається з графу та має власні атрибути: довжини ребер у метрах a, b, c, кути між ребрами α, β, γ;

– початкові умови – граф, що має один вузол n_0, з атрибутами ${}_{size}n_0 = 1$, ${}_{pos}v_0 = (0,0,0)$, ${}_{col}v_0 = red$;

– правило підстановки $\psi =< s, g >$, в якому операція складається з єдиного відношення підстановки та операцій над атрибутами $g =< \bigstar(left, right) >$, права частина підстановки повинна містити хоча б один вузол з кольором як у лівому правилі, рис 1.

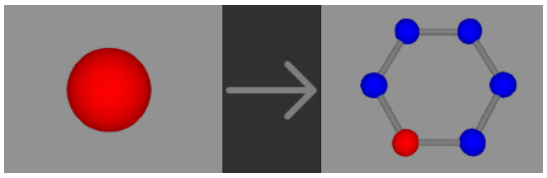


Рис. 1. Відношення підстановки конструктора C_{graph} з заданими кольорами заміни

Fig. 1. C_{graph} Constructor substitution relation with replacement colors

Реалізація виконується в такий спосіб:

– здійснюється операція часткового висновку перетворення форми f_i в f_{i+1};

– початкова форма f_0 (graph), згідно з підстановкою (див. рис. 1), одноразово застосовуючи операцію підстановки, перетворюється в f_1;

– виконується операцію над атрибутам кольору: взаємне перефарбування вузлів з кольором left на right і навпаки.

Представимо на рис. 2 реалізацію у вигляді послідовності сентенційних форм f_0, f_1, f_2, f_3, f_4.

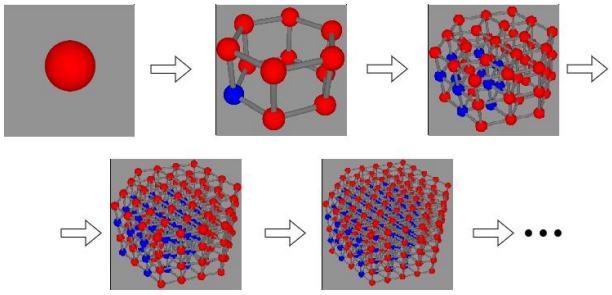


Рис. 2. Послідовність сентенційних форм просторового графового фракталу

Fig. 2. Sequence of sentential forms of a spatial graph fractal

Для формування просторових графових фракталів, а також для проведення досліджень розроблена об'єктно-орієнтована програма на мові C#, на фреймворку .NET Framework 4.8.1. Графічний інтерфейс користувача розроблено у розмітці xaml із виростанням фреймворку WPF. Для збору показників обчислювальної складності формування просторових графових фракталів використовується сервіс у бажаних методах.

Основні операції, які задіяні для підрахунку показників:

– арифметичні (arithmetics);
– присвоєння (assignments);
– порівнювання (comparisons);
– переходу (jumps).

Для підрахунку цих показників було переглянуто дизасембльований код, який був написаний на мові C#. Після аналізу дизасимбльованого коду написано іншу версію алгоритму з додатковими лічильниками операцій. Після виконання оновленої версії алгоритмів показники операцій можна переглянути в окремому вікні. Алгоритм формування просторового графового фракталу на рівні коду складається з різних методів, які можуть бути перевикористовувані доти, поки алгоритм не буде вважатися завершеним.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355432
© О. І. Летучий, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Дослідження для підрахунку операцій проводяться на окремій графовій структурі, яка формує просторовий графовий фрактал певної сентенційної форми. Для її отримання необхідно виконати певну кількість ітерацій, які дозволяють фракталу збільшуватись за допомогою операції заміни форми та операції над атрибутами. Тобто, заміна існуючої частини фракталу на іншу та перефарбування елементів.

Всього для кожного дослідження виконується десять ітерацій зі зростання фракталу і для кожної ітерації відбувається обчислення показників.

Результати

Після проведення досліджень отримали наступні результати для просторових графових фракталів, заснованих на різних типах кристалічних ґраток: моноклінної базоцентрованої рис. 3, ромбічної об'ємноцентрованої, ромбічної гранецентрованої, гексагональної.

Визначено тип емпіричної залежності для формування просторових графових фракталів, отриманих під час проведення експериментів. Для цього, визначається тип аналітичної залежності, який знаходиться за допомогою методу найменших квадратів а також знайдено коефіцієнт кореляції.

Вид залежності графіку – степенева функція, коефіцієнт кореляції = 0,99, залежність:

$$y = 2,73 * 3,15^{x}. \qquad (7)$$

На графіку представлені результати показників різних типів операцій для кожної ітерації, перші п'ять ітерацій можна графічно зобразити як послідовні сентенційні форми на рис. 4.

Графові фрактали, засновані на інших ромбічних об'ємноцентрованих кристалічних ґратках, які мають приблизно однакову структуру, показують приблизно такі ж результати, рис.5.

Вид залежності графіку – степенева функція, коефіцієнт кореляції = 0,99, залежність:

$$y = 2,74 * 3,39^{x}; \qquad (8)$$

Формування фрактальних графів на основі кристалічних ґраток з більш складною структурою (ромбічних гранецентрованих) дає помітне підвищення показників використаних операцій, рис. 6.

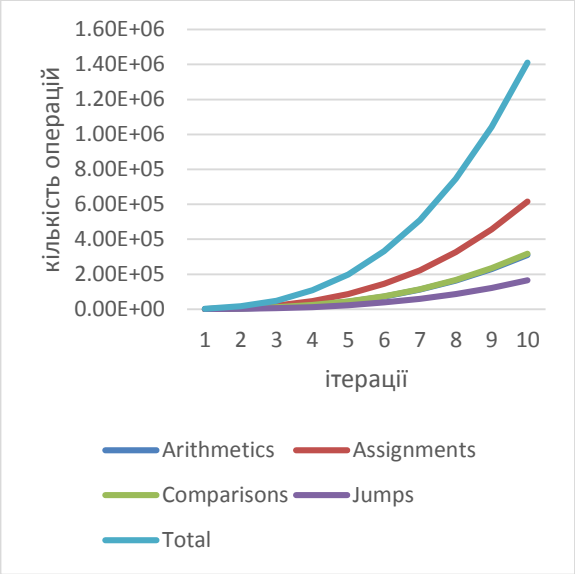


Рис. 3. Залежність кількості операцій від ітерацій формування фрактального графу на основі моноклінної базоцентрованої ґратки

Fig. 3. Dependence of the number of operations on the iterations of the formation of a fractal graph based on a monoclinic base-centered lattice

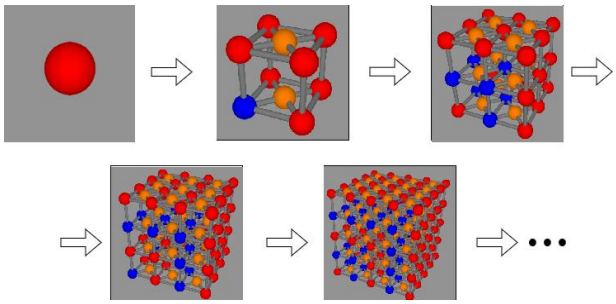


Рис. 4. Перші п'ять сентенційних форм фрактального графу на основі моноклінної базоцентрованої ґратки

Fig. 4. The first five sentential forms of a fractal graph based on a monoclinic base-centered lattice

Вид залежності графіку – степенева функція, коефіцієнт кореляції = 0,99, залежність:

$$y = 2,74 * 3,7^{x} \qquad (9)$$

Формування просторового фрактального графу на основі гексагональної кристалічної ґратки дає результат з найбільшими показниками, рис. 7.

Вид залежності графіку – дрібно-раціональна функція, коефіцієнт кореляції = 0,93, залежність:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355432
© О. І. Летучий, 2026

$$y = \frac{x}{0,00039 + 0,00007 * x} \qquad (10)$$

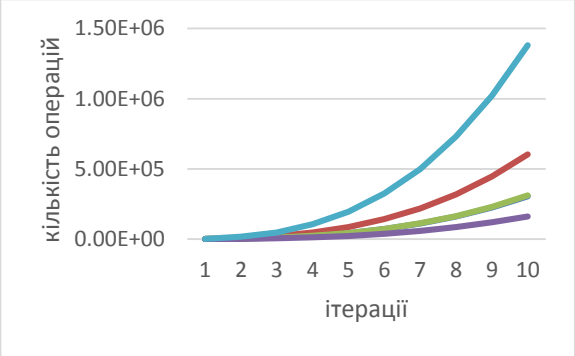


Рис. 5. Залежність кількості операцій від ітерацій формування фрактального графу на основі ромбічної об'ємноцентрованої ґратки

Fig. 5. Dependence of the number of operations on the iterations of the formation of a fractal graph based on a rhombic volume-centered lattice

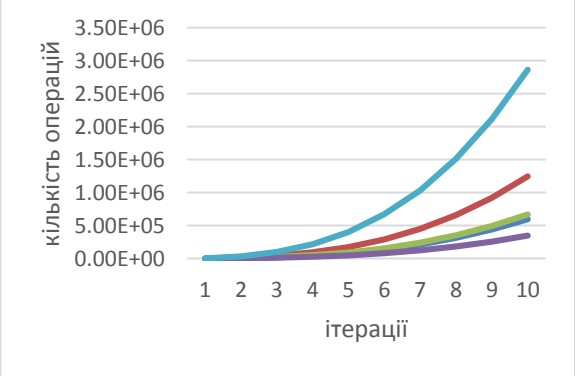


Рис. 6. Залежність кількості операцій від ітерацій формування фрактального графу на основі ромбічної гранецентрованої ґратки

Fig. 6. Dependence of the number of operations on the iterations of the formation of a fractal graph based on a rhombic face-centered lattice

Наукова новизна та практична значимість

У результаті експериментальних досліджень отримано показники базових операцій, що виконуються під час окремої ітерації для формування графового фракталу на основі різних кристалічних ґраток. Це надає можливість прогнозування часу формування фрактальних графів. Більш детальний аналіз показників на рівні коду дає змогу знайти вузькі місця реалізації КПМ. Як приклад, додавши деякі нові атрибути або їх вилучення вже існуючих атрибутів та подальша зміна реалізації КТС на рівні коду може дати результати меншої експериментальної обчислюваної складності.

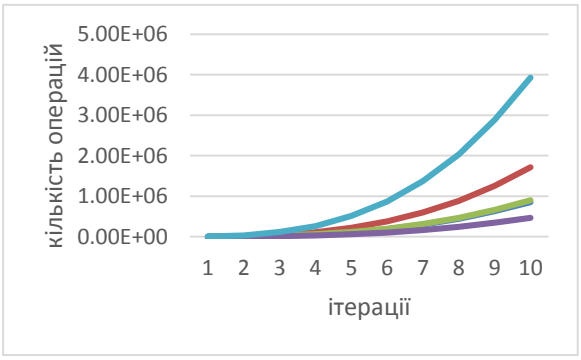


Рис. 7. Залежність кількості операцій від ітерацій формування фрактального графу на основі гексагональної ґратки

Fig. 7. Dependence of the number of operations on the iterations of the formation of a fractal graph based on a hexagonal lattice

Висновки

Проведено дослідження з визначення експериментальної обчислювальної складності реалізацій конструкцій просторових графових фракталів. Для цього було розроблено програму на мові C# з графічним інтерфейсом. Обчислювальна складність просторових графових фракталів залежіть від типу кристалічної ґратки, яка використовується для його формування. Аналіз обчислюваної складності дає змогу прогнозувати час формування просторових графових фракталів, а також дає можливості для оптимізації алгоритмів з їх формування.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355432
© О. І. Летучий, 2026

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Demidovich I., Shynkarenko V., Kuropiatnyk O., Kirichenko O. Processing Words Effectiveness Analysis in Solving the Natural Language Texts Authorship Determination Task. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2021)*. (Lviv, 22–25 September 2021). Львів, 2021. Vol. 2. P. 48–51. DOI: https://doi.org/10.1109/csit52700.2021.9648829
2. Ille P., Woodrow R., Fractal graphs. *Journal of Graph Theory*. 2019. Vol. 91, Iss. 1. P. 53–72. DOI: https://doi.org/10.1002/jgt.22420
3. Kuropiatnyk O., Shynkarenko V., Zhuchyi L., Lyakhova M. Geometric Fractals' Constructive-Synthesizing Models using Ontological Means. *CEUR Workshop Proceeding*. *Selected Papers of the XI International Scientific Conference «Information Technology and Implementation» (IT&I 2024)*. (Kyiv, 20-21 November. 2024). Kyiv, 2024. Vol. 3909. P. 419–431
4. Newkome G. R., Moorefield C. N. *Methods of nanoassembly of fractal polymer and materials formed thereby* : pat. application № 13/548,664.1 ; applic. 13.07.2012 ; public. 2013.
5. Rayneau-Kirkhope D., Mao Y., Farr R. Optimization of fractal space frames under gentle compressive load. *Physical Review E*. 2013. Vol. 87, Iss. 6. Art. 063204. DOI: https://doi.org/10.1103/physreve.87.063204
6. Shynkarenko V. Constructive-Synthesizing Representation of Geometric Fractals. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol. 55, Iss. 2. P. 186-199. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-019-00123-w
7. Shynkarenko V., Chyhir R. Constructive-Synthesizing Modelling of Multifractals Based on Multiconstructors. *CEUR Workshop Proceedings. 14th International Scientific and Practical Programming Conference. (UkrPROG 2024)*. (Kyiv, 14-15 May, 2024). Kyiv, 2024. Vol. 3806. P. 75–88.
8. Shynkarenko V., Demidovich I. Authorship Determination of Natural Language Texts by Several Classes of Indicators with Customizable Weights. *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021)*. (Lviv, April 22-23, 2021). Lviv, 2021. Vol. 2870. P. 832–844.
9. Shynkarenko V., Demidovich I. Natural Language Texts Authorship Establishing Based on the Sentences Structure. *CEUR Workshop Proceeding. Proceedings of the 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)*. (Gliwice, May 12-13, 2022). Gliwice, 2022. Vol. 3171. P. 328–337.
10. Shynkarenko V., Ilman V. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50, Iss. 5. P. 655–662. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-014-9655-z
11. Shynkarenko V., Ilman, V. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. II. Refining Transformations. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50, Iss. 6. P. 829–841. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-014-9674-9
12. Shynkarenko V., Kuropiatnyk O. Constructive Model of the Natural Language. *Acta Cybernetica*. 2018. Vol. 23, No. 4. P. 995–1015. DOI: https://doi.org/10.14232/actacyb.23.4.2018.2
13. Shynkarenko V., Letuchyi O., Chyhir R. Constructive-synthesizing modeling of fractal crystal lattices. *2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)* (Lviv, 19–21 October 2023). Lviv, 2023. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/csit61576.2023.10324251
14. Shynkarenko V., Zhuchyi L. Ontological Harmonization of Railway Transport Information Systems. *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021)*. (Lviv, April 22-23, 2021). Lviv, 2021. Vol. 2870. P. 541–554.
15. Shynkarenko V., Zhuchyi L. Semantic Checking of Different Type Information Sources About Permitted Speeds in Railway Transport. *CEUR Workshop Proceeding. Proceedings of the 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)*. (Gliwice, May 12-13, 2022). Gliwice, 2022. Vol. 3171. P. 711–723.

O. I. LETUCHYI[1*]

[1*]Dep. «Computer Information Technologies», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 375 15 35, e-mail o.i.letuchyi@ust.edu.ua, ORCID 0009-0004-9057-7029

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355432
© О. І. Летучий, 2026

Determination of the Experimental Computational Complexity of Formation of Spatial Graph Fractals Using Constructive-Synthesizing Modelling

Purpose. The study is aimed at obtaining indicators of computational complexity for the formation of spatial graph fractals, which in turn requires developing a software application for the formation of spatial graph fractals, which allows them to be visually viewed, as well as creating tools for calculating indicators of computational complexity. **Methodology**. The approach of constructive-synthesizing modeling is used to form spatial graph fractals, which is based on the rules of production inherent in formal grammars. Constructive- synthesizing modeling involves a number of transformations, such as: specialization, interpretation and concretization. Structural transformations describe how a spatial graph fractal can be formed, which includes the definition of the subject area, attributes, operations on attributes, substitution rules, conditions and restrictions on operations, description of algorithms, and implementation in the form of software. The indicators of basic operations performed at the assembler level are determined, such as: arithmetic, assignment, comparison and transition. To calculate the indicators of the iteration of the formation of a graph fractal at the code level, special counters are added. The operation counters are located only in those sections of the code that are directly executed during the iteration. **Findings**. A program was developed in C# with a graphical interface. The indicators of the experimental computational complexity for the formation of spatial graph fractals by means of constructive-synthesizing modeling based on the use of different types of crystal lattices have been determined. The found dependencies have a correlation ratio close to unity. **Originality**. The experimental computational complexity of the formation of spatial graph fractals by means of constructive-synthesizing modeling has been determined. As the basis for the formation of spatial graph fractals, various types of crystal lattices are used, which describe the arrangement of atoms of crystalline substances. **Practical value**. Determining the indicators of basic operations makes it possible to predict the execution time of an iteration of forming spatial graph fractals, as well as to optimize the algorithms for performing this iteration. Analysis of the indicators of basic operations makes it possible to find bottlenecks in the algorithms for forming spatial graph fractals.

Keywords: metrics; computational complexity; fractals; graph; constructive-synthesizing modelling; formal grammars; software; information technology

REFERENCES

1. Demidovich, I., Shynkarenko, V., Kuropiatnyk, O., & Kirichenko, O. (2021, September). Processing Words Effectiveness Analysis in Solving the Natural Language Texts Authorship Determination Task. In *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2021)*. (Vol. 2, pp. 48-51). Львів, Ukraine. DOI: https://doi.org/10.1109/csit52700.2021.9648829 (in English)
2. Ille, P., & Woodrow, R. (2019). Fractal graphs. *Journal of Graph Theory, 91*(1), 53-72. DOI: https://doi.org/10.1002/jgt.22420 (in English)
3. Kuropiatnyk, O., Shynkarenko, V., Zhuchyi, L., & Lyakhova, M. (2024, November). Geometric Fractals' Constructive-Synthesizing Models using Ontological Means. *CEUR Workshop Proceeding. Selected Papers of the XI International Scientific Conference «Information Technology and Implementation» (IT&I 2024).* (Vol. 3909, pp. 419-431). Kyiv, Ukraine. (in English)
4. Newkome, G. R., & Moorefield, C. N. (2013). *Methods of nanoassembly of fractal polymer and materials formed thereby* (U.S. Patent Application No. 13/548,664). United States Patent and Trademark Office (in English)
5. Rayneau-Kirkhope, D., Mao, Y., & Farr, R. (2013). Optimization of fractal space frames under gentle compressive load. *Physical Review E, 87*(6), 063204. DOI: https://doi.org/10.1103/physreve.87.063204 (in English)
6. Shynkarenko, V. (2019). Constructive-Synthesizing Representation of Geometric Fractals. *Cybernetics and Systems Analysis, 55*(2), 186-199. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-019-00123-w (in English)
7. Shynkarenko, V., & Chyhir, R. (2024, May). Constructive-Synthesizing Modelling of Multifractals Based on Multiconstructors. *CEUR Workshop Proceedings. 14th International Scientific and Practical Programming Conferenc. (UkrPROG 2024)*. (Vol. 3806, pp. 75-88). Kyiv, Ukraine. (in English)
8. Shynkarenko, V., & Demidovich, I. (2021, April). Authorship Determination of Natural Language Texts by Several Classes of Indicators with Customizable Weights. *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021).* (Vol. 2870, pp. 832-844). Lviv, Ukraine. (in English)
9. Shynkarenko, V., & Demidovich, I. (2022, May). Natural Language Texts Authorship Establishing Based on the Sentences Structure. *CEUR Workshop Proceeding. Proceedings of the 5th International Conference on*

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355432
© О. І. Летучий, 2026

Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021). (Vol. 3171, pp. 328-337). Gliwice, Poland (in English)

10. Shynkarenko, V., & Ilman, V. (2014). Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure. *Cybernetics and Systems Analysis, 50*(5), 655-662. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-014-9655-z (in English)
11. Shynkarenko, V., & Ilman, V. (2014). Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. II. Refining Transformations. *Cybernetics and Systems Analysis, 50*(6), 829-841. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-014-9674-9 (in English)
12. Shynkarenko, V., & Kuropiatnyk, O. (2018). Constructive Model of the Natural Language. *Acta Cybernetica*, *23*(4), 995-1015. DOI: https://doi.org/10.14232/actacyb.23.4.2018.2 (in English)
13. Shynkarenko, V., Letuchyi, O., & Chyhir, R. (2023, October). Constructive-synthesizing modeling of fractal crystal lattices. In *2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)* (pp. 1-4). Lviv, Ukraine. DOI: https://doi.org/10.1109/csit61576.2023.10324251 (in English)
14. Shynkarenko, V., & Zhuchyi, L. (2021, April). Ontological Harmonization of Railway Transport Information Systems. *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021)*. (Vol. 2870, pp. 541-554). Lviv, Ukraine. (in English)
15. Shynkarenko, V., & Zhuchyi, L. (2022). Semantic Checking of Different Type Information Sources About Permitted Speeds in Railway Transport. *CEUR Workshop Proceeding*. *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021)*. (Vol. 3171, pp. 711-723). Gliwice, Poland. (in English)

Дата надходження рукопису: 13.11.2025
Дата прийняття до публікації: 18.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355432
© О. І. Летучий, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

UDC 336.71:004.89

M. B. NAMAZOV[1], M. E. RAHIMOV[2*]

[1]Inst. «Cyber-Physical Systems and Cybersecurity», Azerbaijan Technical University, H. Javid Av., 25, Baku, Azerbaijan, AZ1073, tel. +994 (50) 346 57 07, e-mail manafeddin.namazov@aztu.edu.az, ORCID 0000-0003-1119-2442
[2*]Dep. «Engineering Mathematics and Artificial Intelligence», Azerbaijan Technical University, H. Javid Av., 25, Baku, Azerbaijan, AZ1073, tel. +994 (70) 530 39 60, e-mail musa.rahimov@aztu.edu.az, ORCID 0009-0009-0961-5064

Development of a Hybrid Fuzzy Logic and SHAP-Based Evaluation Framework for the Prediction of Bank Deposits in the Banking Sector

Purpose. This study examines the decision-making behavior of bank customers regarding deposit participation and addresses the challenge of accurately predicting deposit decisions in the presence of class imbalance, limited interpretability, and variability in customer engagement patterns. **Methodology.** A comparative experimental framework was developed to evaluate several classical and ensemble machine learning approaches using a banking customer dataset. To ensure a balanced and objective comparison of competing models, a hybrid evaluation framework based on fuzzy multi-criteria decision analysis and entropy-based weighting was employed. In addition, explainable artificial intelligence techniques were applied to interpret the contribution of individual variables, while temporal analysis was conducted to investigate behavioral variations in customer response over time. **Findings.** The results indicate that ensemble learning approaches demonstrate more stable predictive capability compared to conventional models. The hybrid evaluation framework enables consistent ranking of predictive methods and improves the reliability of model selection. Feature interpretation and temporal behavioral analysis reveal that customer interaction characteristics and communication-related variables play a decisive role in deposit participation decisions. **Originality.** The study proposes an integrated predictive modeling framework combining machine learning forecasting, entropy-weighted fuzzy decision evaluation, explainable artificial intelligence, and time-based behavioral analysis, providing a transparent and robust mechanism for model comparison. **Practical value.** The proposed approach can assist financial institutions in improving marketing campaign planning, optimizing customer targeting strategies, and supporting data-driven decision-making in deposit acquisition processes.

Keywords: deposit prediction; banking customer behavior; machine learning; fuzzy multi-criteria decision analysis; entropy-based weighting; explainable artificial intelligence; temporal behavior analysis

Introduction

Deposits continue to be one of the main pillars of financial stability, liquidity management, and long-term profitability in the contemporary banking industry [8]. Banks' ability to finance lending operations, maintain sufficient liquidity buffers, and guarantee resilience against market fluctuations are all directly impacted by their ability to draw in and hold onto deposit funds. Deposits have historically been thought of as one of the most dependable and economical sources of funding, and despite the significant structural changes in the global financial landscape, their strategic significance has not decreased.

The environment in which deposit products function has undergone significant change in the last ten years. Market dynamics have been drastically changed by the quickening pace of digital transformation and the expansion of fintech rivals [3]. Through shifting deposit betas and pass-through, the rising interest rate volatility has also had an impact on customer behavior and deposit pricing [2]. These days, many clients make more complicated and unpredictable decisions by contrasting traditional deposit offers with a variety of alternative investment options, such as government securities and digital assets [3]. Because of this, the competition for depositors has become more fierce, and predicting consumer behavior has become a crucial component of banking strategy.

Predicting consumer behavior with regard to deposit placement is still a challenging and unsolved issue from a scientific standpoint. Even though machine learning and artificial intelligence techniques have been effectively used in a number of banking domains, there are still issues with their application when it comes to predicting deposit decisions. These include the need for interpretable models that decision-makers can trust, the notable class imbalance in historical datasets, and the limited incorporation of predictive algorithms into practical multi-criteria decision-support systems [14]. Furthermore, the factors influencing deposit-related behavior are constantly

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457

© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

changing due to macroeconomic uncertainty, shifting regulatory frameworks, and the quick development of financial products; therefore, predictive models need to adjust to a constantly shifting environment.

Research on the development of precise, interpretable, and practically applicable techniques for forecasting consumer deposit decisions therefore remains highly relevant and continues to play an essential role in both academic research and real-world banking applications. In this context, recent technological advancements have enabled the widespread application of machine learning methods across various sectors, improving operational efficiency and supporting data-driven decision-making. In the banking sector, numerous studies have demonstrated significant progress in areas such as churn prediction, deposit campaign modeling, feature engineering, addressing class imbalance, and enhancing model interpretability.

The study [11] investigates churn modeling in banking, insurance, and telecommunications using homogeneous ensemble methods, with Random Forest emerging as the most effective. Reported accuracies reached 89.93% in banking, 95.90% in telecommunications, and 77.53% in insurance when coupled with feature extraction. Still, unresolved issues persist concerning probability calibration, cost-sensitive evaluation, and adapting models to term-deposit acceptance scenarios. These shortcomings may be attributed to the severe class imbalance common in deposit campaigns (positive class often below 10%), the difficulty in linking model outputs to ROI metrics, and the lack of detailed cost-related operational data, making cost-benefit analysis challenging. One viable strategy to address these concerns is to integrate calibrated probability estimates with cost-based decision thresholds within a multi-criteria decision-making (MCDM) framework. This strategy was examined in [17] for calibration and in [19] for SHAP-based interpretability; nevertheless, neither combined cost optimization with calibration for deposit-focused use cases. Collectively, these insights emphasize the need for a unified deposit prediction framework incorporating both calibration and cost sensitivity.

According to [9], resampling techniques such as SMOTE and ADASYN were compared for highly imbalanced churn datasets. The evidence indicates that recall and specificity can improve even under severe imbalance. Still, key obstacles remain, including distorted probability estimates and degraded calibration in streaming environments with concept drift. These problems may stem from the financial and operational burden of frequent recalibration, the need for real-time drift detection, and the infeasibility of continuous monitoring for many institutions. A practical solution is to combine resampling with calibrated models and implement scheduled recalibration intervals. This method was explored in [17] for calibration optimization; however, no existing work has jointly addressed cost, recall, specificity, and probability reliability for deposit prediction. Consequently, this calls for integrating these components into a single, cohesive framework.

The analysis in [1] reports on the use of tailored classifiers and extensive feature engineering to improve modeling of bank customer behavior. Findings illustrate that targeted feature selection and transformation can increase both accuracy and reliability. Even so, outstanding challenges remain in incorporating segmentation-based features into supervised deposit prediction while ensuring transparency and compliance with regulations. These barriers may result from fragmented modeling processes, legal restrictions on personal data (such as GDPR compliance costs), the expense of maintaining compliant feature sets, and the risk of feature drift in operational settings. A way forward is to develop a compliance-aware feature governance system supported by SHAP explanations. Such an approach was adopted in [19] for interpretability, though without addressing governance or compliance aspects. Altogether, these observations suggest pairing interpretability with compliance-focused governance in deposit modeling.

In summary, the literature points to significant potential for feature engineering, resampling, ensemble modeling, and interpretability in deposit prediction. Nonetheless, there is still no comprehensive, operationally feasible pipeline that addresses extreme imbalance with cost-sensitive learning, maintains calibration under drift, incorporates compliance-aware interpretability, and evaluates models through a multi-criteria framework including accuracy, recall, specificity, AUC, calibration quality, efficiency, and cost-effectiveness in real operational settings. Given the increasing reliance of banks on automated decision-making and the rising regulatory emphasis on transparency, addressing these gaps is both timely and necessary.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

Purpose

The purpose of this study is to develop a predictive framework based on machine learning methods for accurately forecasting customer decisions regarding bank deposit participation. The proposed framework aims to support financial institutions in improving marketing strategies, reducing potential revenue losses, and more effectively identifying customers who are likely to respond positively to deposit campaigns. To achieve this objective, classical and ensemble machine learning models are implemented and comparatively evaluated using standard performance indicators. In addition, temporal analysis of customer engagement is conducted to identify behavioral and seasonal patterns influencing deposit acceptance. A fuzzy logic-based multi-criteria evaluation framework is developed to integrate multiple performance metrics and enable more reliable model selection, while explainable artificial intelligence techniques are applied to enhance the interpretability of the best-performing model and to provide deeper insights into the influence of individual variables on customer decision-making.

Methodology

Dataset Description. This analysis utilized a dataset comprising 11,163 instances to forecast whether customers will make a deposit with a bank. The dataset reflects a range of customer attributes, with each record corresponding to an individual customer. The dataset features 16 predictor variables along with 1 target variable («deposit»). The target variable is represented in binary terms: «1» indicates that the customer will make a deposit, while «0» signifies they will not.

The included variables encompass age, type of employment, marital status, education level, annual financial balance, personal credit and mortgage conditions, mode of contact, timing and duration of the last communication, campaign history, and outcomes from prior campaigns. Among these variables, marital status, education, loan default, mortgage status, personal credit, means of contact, the results of the previous campaign, and the target variable «deposit» were identified as categorical variables. The dataset is devoid of missing values, and all variables are readily accessible for analysis.

Exploratory Data Analysis (EDA). The distribution of numerical variables and the presence of potential outliers are illustrated in Fig. 1.

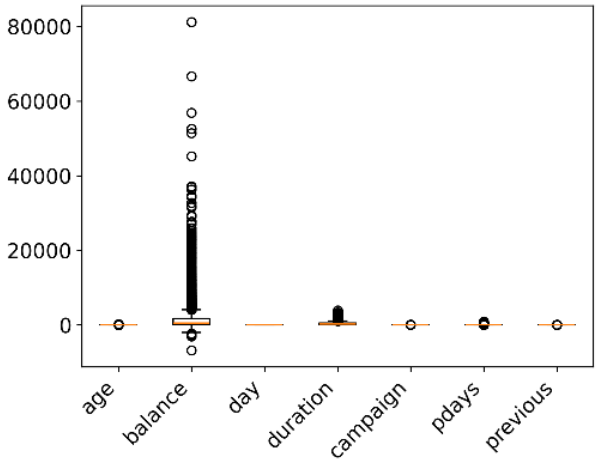


Fig. 1. Boxplots of Numerical Features

Boxplots of the dataset's numerical features are shown in Fig. 1. Significant variation can be seen in the plots for properties like balance and duration, both of which exhibit a sizable number of extreme values. These outliers show that a small percentage of clients have abnormally high balances or very extended call durations, even though the majority of observations fall within a small range. Age, campaign, pdays, and prior experience are among the other factors that have comparatively compact distributions with fewer extreme occurrences.

Based on the correlation matrix illustrated in Fig. 2, the relationships among the variables in the dataset and the target variable (deposit) were evaluated. The analysis included both numerical and categorical variables, with label encoding applied to the categorical ones.

The results indicated that the duration variable demonstrated the strongest positive correlation (r = 0.45) with the target variable, while the impacts of other variables such as balance, contact, and housing were comparatively weak.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

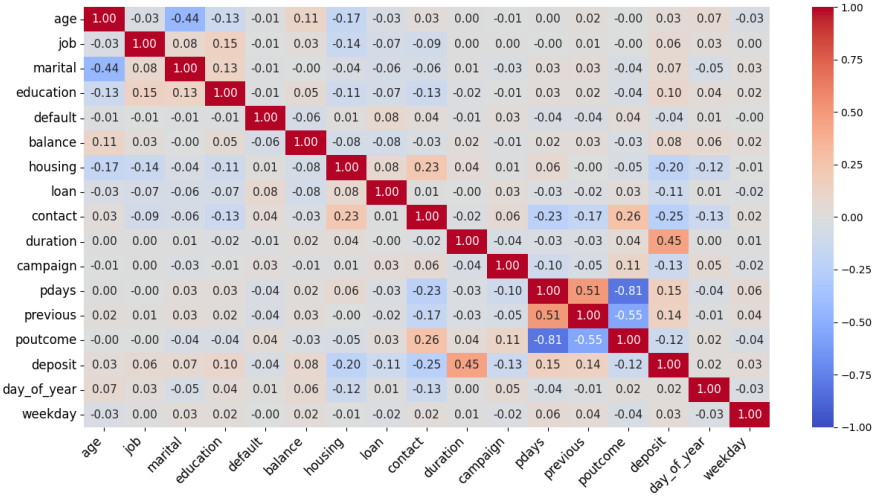


Fig. 2. Heatmap of Feature Correlations in the Dataset

Dataset Preprocessing. At the outset, the deposit target variable was encoded in a binary format as part of the study. Consequently, customers who made a deposit were classified as 1, while those who did not were classified as 0, based on their responses of «yes» and «no».

Since the categorical variables could not be incorporated directly into the model, the One-Hot Encoding technique was employed for these variables. This method transformed the values of each categorical variable into separate independent columns, making them suitable for the model.

Subsequently, the dataset was split into training and testing subsets in an 80–20% ratio, ensuring class balance through stratification. This approach was taken to achieve more reliable and balanced results when training the model.

Furthermore, given the data's unbalanced nature, the minority class in the training subset was artificially augmented and balanced using the SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) approach. This measure guaranteed that the model accurately recognized the minority class.

To fine-tune the model's hyperparameters, the GridSearchCV method was utilized. This technique enables the identification of the most effective combination by evaluating a defined parameter grid. Three-fold cross-validation was performed on each parameter set, which helped ensure that the model exhibited more consistent and generalizable performance.

All experiments were implemented in Python 3.10, using libraries such as scikit-learn, XGBoost, and pandas for model development and data processing. Visualizations were generated with matplotlib and seaborn.

Research Design and Workflow. This study introduces a novel hybrid predictive framework designed to enhance the accuracy, interpretability, and practical applicability of bank deposit decision modeling. Fig. 3 shows the general framework used in this investigation, giving a visual depiction of the methodical progression from data preparation to model evaluation.

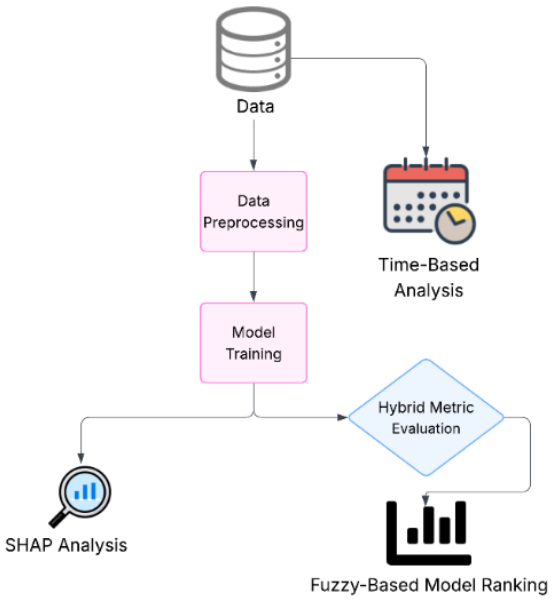


Fig. 3. Proposed Framework for Deposit Prediction

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

Following preprocessing, which includes class imbalance correction and categorical variable encoding, the chosen machine learning models are trained and evaluated. A hybrid metric evaluation approach is used to increase robustness and interpretability. This involves integrating domain-specific insights with traditional performance measurements that are weighted using Shannon entropy. Triangular membership functions are then used to process these weighted metrics through fuzzy logic, yielding a single fuzzy score for every model. This makes it possible to compare models in multiple dimensions while taking into account both mathematical performance and real-world applicability. Furthermore, time-based research examines the temporal patterns impacting deposit behavior, and SHAP analysis is used to assess feature interpretability.

Modeling and Evaluation Strategy. Logistic Regression. The logistic regression model aims to address binary classification challenges by analyzing features within a dataset that contains two distinct target outcomes. The primary objective of this model is to employ the logistic function, which computes the likelihood that a given result corresponds to a specific class [10]. The fundamental equation of the logistic function is expressed as follows (1):

$$P(Y=1|X)=\frac{1}{1+e^{-(\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_nX_n)}}, \quad (1)$$

where $P(Y=1|X)$ – the characteristics indicate the probability that an outcome belongs to class 1, based on X; β_0 – modeled intercept (initial value); β_i – it is the coefficient of each feature; e – neutral constant (approximately 2.718).

Random Forest. The Random Forest (RF) model is an ensemble method that constructs multiple decision trees using random subsets of features and observations. The final prediction is obtained by averaging the outputs of all trees or applying majority voting, which helps reduce overfitting and improve generalization [4]. The final output is determined either by the average of the responses from all trees or through the principle of majority voting, based on Equation (2):

$$\hat{y}=mode(\{F_1(X),F_2(X),\ldots,F_m(X)\}), \quad (2)$$

here, $\hat{y}$ is the prediction of the model, m is the total number of trees.

XGBoost. The XGBoost model, which stands for Extreme Gradient Boosting, represents a specialized version of the Gradient Boosting technique within ensemble learning. XGBoost conducts sequential training of decision trees to enhance their effectiveness [5]. The final prediction function of the XGBoost model is defined by the additive combination of multiple regression trees, as shown in Equation (3):

$$F(x)=\sum_{k=1}^{K}f_k(x), \quad (3)$$

here, $F(x)$ denotes the predicted value, K is the number of boosting rounds (trees), and each $f_k(x)$ represents an individual regression tree.

Gradient Boosting. The Gradient Boosting model is an ensemble technique that enhances prediction strength by integrating multiple weak learners. Key benefits of the Gradient Boosting model include its high accuracy and its flexibility to accommodate various types of data [5]. The fundamental formula is expressed as follows (4):

$$F(x)=f_0(x)+\sum_{k=1}^{K}\mu f_k(x), \quad (4)$$

here, $F(x)$ is the last, $f_0(x)$ initial prediction. μ is the degree of learning, K is the total number of trees.

SVM. The Support Vector Machine (SVM) is designed to identify an optimal hyperplane that separates data points of different classes. Using kernel functions, it can also handle non-linear relationships by mapping data into higher-dimensional spaces [15]. The decision function of the SVM model is mathematically expressed as follows (5):

$$f(x)=sign\left(\sum_{i=1}^{n}\alpha_i y_i K(x_i,x)+b\right), \quad (5)$$

here, $f(x)$ represents the decision function of SVM, combining support vectors, kernel functions, and a bias term to define the separating hyperplane.

To evaluate the performance of the classification models, several standard evaluation metrics were employed.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

Accuracy. This metric assesses the performance of a model by calculating the proportion of correct predictions made by the model relative to the total predictions [18]. The calculation of accuracy is performed using the formula (6):

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}. \quad (6)$$

In this context, TP stands for True Positives, TN for True Negatives, FP for False Positives, and FN for False Negatives.

Recall. This metric measures how many of the true positive samples were correctly predicted as positive [18]. Recall can be expressed mathematically as shown in Equation (7):

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (7)$$

Specificity. This metric measures how many of the true negative samples are correctly predicted as negative [13]. Specificity is calculated using the following formula (8):

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP}. \quad (8)$$

The F1 Score provides a balance between the model's ability to accurately identify positive classes (precision) and how many of these classes are actually correctly recognized (recall) [16]. It is calculated using the following formula (9):

$$F1Score = \frac{2\,x\,Precision\,x\,Recall}{Precision + Recall}. \quad (9)$$

Precision indicates the reliability of positive predictions by quantifying the ratio of true positive samples to the total number of predicted positive samples [6]. The mathematical expression of precision is given in Equation (10):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (10)$$

AUC (Area Under the Curve): The area under the ROC curve measures the ability of the model to distinguish between positive and negative classes under different decision thresholds [7]. AUC can be calculated as follows (11):

$$AUC = \int_0^1 ROC\,Curve(x)\,dx. \quad (11)$$

Fuzzy Logic–Based Evaluation Methodology. In this phase, a fuzzy logic method was employed to assess the performance of different machine learning models on a multi-criteria level. Fuzzy systems are adept at handling uncertain and ambiguous data, enabling the simultaneous assessment of various indicators [20]. For the evaluation, metrics such as accuracy, precision, recall, F1-score, specificity, and AUC–ROC were utilized. Initially, these indicators were standardized within the range of 0 – 1 using min-max normalization before being fed into the fuzzy system.

In the first stage, triangular membership functions were established for each metric indicator. The definitions of these functions are as follows (12):

$$\mu(x;a,b,c,) = \begin{cases} 0, & x \le a, x \ge c \\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a < x \le b \\ \dfrac{c-x}{c-b}, & b < x < c \end{cases}, \quad (12)$$

here, a – represents the lower bound of the triangular membership function. When $x \le a$, the membership degree is 0; b – denotes the peak point of the triangle where the membership degree reaches its maximum value of 1; c – upper bound of the function. For $x \ge c$, the membership degree again becomes 0; x – input value whose degree of belonging to the fuzzy set is being evaluated through this function.

The next phase involved employing a hybrid method to determine the weights. The weights are comprised of two elements:

1. Objective weights:

Each metric's information value is computed using Shannon entropy as outlined [16]. The formulas were defined as follows (13)–(15):

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{n} p_{ij} \ln\left(p_{ij}\right), \quad (13)$$

where $k = \dfrac{1}{\ln(n)}$

$$d_j = 1 - E_j; \quad (14)$$

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

$$w_j = \frac{d_j}{\sum d_j}, \quad (15)$$

where, p_{ij} – denotes the normalized value of model i for metric j; E_j – represents the entropy; d_j – degree of information; w_j – indicates the objective weight.

2. Subjective weights:

Incorporating domain knowledge, specific weights were assigned to each evaluation metric based on expert judgment: Accuracy (0.10), Precision (0.15), Recall (0.25), F1-score (0.30), Specificity (0.10), and AUC-ROC (0.10). These domain-based weights were later combined with entropy-derived values to produce hybrid weights, which were then used in the fuzzy logic-based evaluation to reflect both statistical significance and practical relevance in model assessment.

These two weight vectors were multiplied to create a hybrid weight vector, which was then normalized using the following formula (16):

$$w_j^{hybrid} = \frac{w_j^{objective} \cdot w_j^{subjective}}{\sum_{j=1}^{m} \left(w_j^{objective} \cdot w_j^{subjective} \right)}. \quad (16)$$

Using the derived weights, the membership values corresponding to the fuzzy levels for each model were multiplied by the weights, leading to the computation of the final fuzzy score as follows (17):

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} w_j^{hybrid} \cdot \mu_{ij}, \quad (17)$$

here, S_i – represents the fuzzy score for model i; w_j^{hybrid} – denotes the hybrid weight for metric j; μ_{ij} – refers to the fuzzy membership of model i regarding metric j; m – represents the total number of evaluation metrics.

Model Interpretability and Time-Based Analysis. The SHAP (SHapley Additive exPlanations) analysis was used to improve the interpretability of the model predictions. By giving each attribute an importance value derived from cooperative game theory, SHAP sheds light on how distinct features contribute to a particular prediction [12].

Date-related characteristics, like the year and weekday name, were extracted from the initial day and month variables in order to capture possible temporal influences in consumer behavior.

Findings

Evaluation Based on Classical Performance Metrics. In the context of the research, five distinct machine learning models – Logistic Regression, Random Forest, XGBoost, KNN, and SVM – were utilized for predicting deposits, and the effectiveness of each model was assessed based on a range of evaluation benchmarks. Throughout the assessment, the performance metrics of Accuracy, Precision, Recall, F1-score, AUC–ROC, and Specificity were used as the foundation for comparison.

Table 1 shows the performance indicators obtained for each model.

Table 1

Comparative performance metrics of classification models

Metrics	Logistic Regression	Random Forest	XGBoost	KNN	SVM
Accuracy	0.816	0.855	0.869	0.804	0.819
Recall	0.805	0.883	0.898	0.816	0.819
F1–Score	0.805	0.852	0.866	0.798	0.811
AUC	0.890	0.919	0.935	0.872	0.893
Precision	0.806	0.824	0.837	0.780	0.803
Specificity	0.825	0.830	0.843	0.793	0.820

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

Table 1 highlights that the Recall score of 0.898 for the XGBoost model demonstrates that it accurately identifies customers likely to make a deposit. From the perspective of the bank, this represents a significant strategic benefit in terms of promptly identifying potential revenue-generating customers and tailoring appropriate campaigns for them. The AUC-ROC score of 0.935 suggests that the model effectively differentiates between positive and negative classes. This accuracy helps the bank focus on the right customer segments for its offerings while mitigating resource wastage. Furthermore, the high F1-score of 0.866 indicates that the model achieves a balanced performance in acquiring customers while minimizing false positives.

The Random Forest model achieved the second-highest results, with a Recall of 0.883 and an F1-score of 0.852, indicating a fairly effective capability in identifying customers likely to deposit and classifying them correctly. Additionally, the AUC score of 0.919 confirms this model's excellent classification ability.

Although the Logistic Regression model features a simpler and more interpretable design, it still delivered a respectable AUC score of 0.890. This indicates its effectiveness in recognizing the primary trends in customer behavior, though it does not match the performance of more sophisticated models with complex data structures.

In contrast, the KNN model underperformed relative to the other models. Its lowest F1-score of 0.798 and Specificity score of 0.793 suggest that it produces inaccurate predictions and struggles to correctly distinguish between positive and negative cases in practical applications. This could result in inefficient resource usage and the potential loss of customers.

The SVM model showed moderate performance, with Recall and AUC values of 0.819 and 0.893, respectively, which positions it as a viable alternative for real-world applications, particularly when dealing with nonlinear data.

To evaluate the generalization capability of the model more effectively, 3-fold cross-validation was utilized, yielding F1-score values of 0.866, 0.853, and 0.867. The mean of these scores was calculated to be 0.8618, suggesting that the model exhibited consistent performance and that the likelihood of overfitting was minimal.

Time-Based Evaluation of Customer Engagement Patterns. To gain deeper insights into the influence of temporal factors on customer deposit behavior and campaign effectiveness, a time-based analysis was conducted focusing on daily, weekly, and monthly variations in acceptance rates.

Fig. 4. illustrates the campaign's success rate by day throughout the year. The graph reveals that the rate of deposit acceptance fluctuates greatly across different times of the year. This variation suggests that customer behavior can shift over time and underscores the importance of having adaptable and timely marketing strategies.

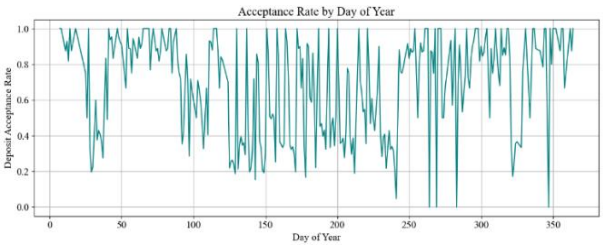


Fig. 4. Deposit Acceptance Trends by Day of Year

Fig. 5. illustrates the overall number of contacts alongside the success rate for each day of the week in parallel. The analysis reveals that the peak acceptance rate occurs on Wednesday, although the total contacts are greater on other days. This difference highlights the influence of strategic timing and targeting on the effectiveness of the campaign.

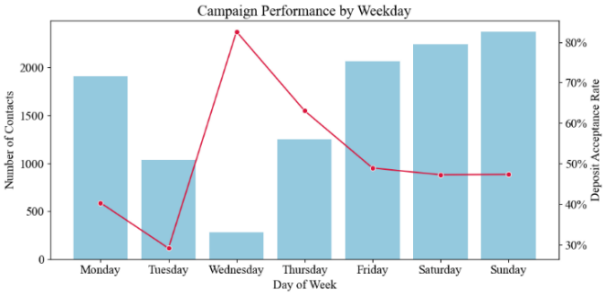


Fig. 5. Weekday-Based Campaign Efficiency and Acceptance Trends

Fig. 6 shows the acceptance rates for deposits on a monthly basis. The peak rates seen in March, September, and December suggest increased opportunities for successful campaigns during these times.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

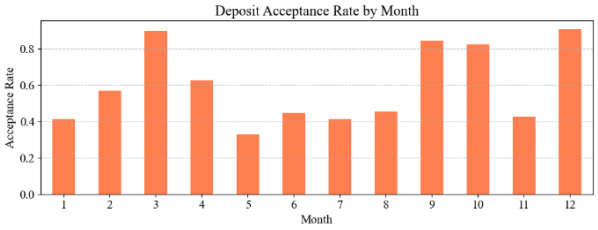


Fig. 6. Monthly Distribution of Deposit Acceptance Rates

Beyond these peaks, acceptance rates are notably lower in May – July, indicating a seasonal slowdown in customer activity, possibly due to vacation periods that shift consumer attention away from financial products. Stable mid-range results in January – February and August point to consistent receptiveness outside peak months, while November remains moderate.

Hybrid Fuzzy Evaluation Framework for Model Comparison. In this research, the effectiveness of the models predicting the likelihood of bank customers making deposits was assessed through a hybrid fuzzy decision support methodology, which integrates both statistical foundations and practical industry insights.

Fig. 7 illustrates the fuzzy logic-based scores calculated for each machine learning model.

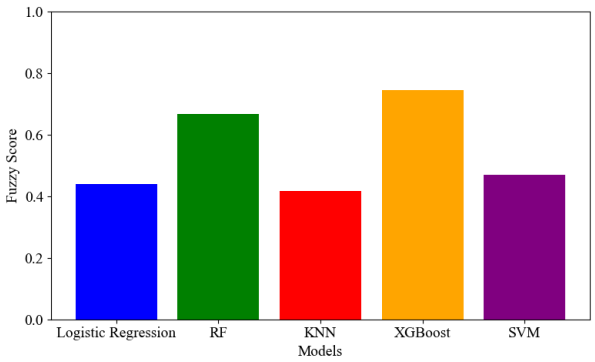


Fig. 7. Fuzzy Logic-Based Aggregated Scores for ML Models

The findings indicated that the XGBoost model achieved the highest performance with a fuzzy score of 0.7437. This model is deemed suitable for implementation in the banking industry, particularly for identifying intricate relationships and demonstrating resilience to erratic patterns. The Random Forest model followed in second place with a score of 0.6677, which exhibited greater stability, albeit with slightly lower prediction accuracy. The SVM model produced an average performance with a score of 0.4704, while the Logistic Regression (0.4401) and KNN (0.4161) models lagged behind with poorer results.

Interpretability Through SHAP Analysis. To achieve a better understanding of the model's decision-making process and interpret the outcomes, we employed the SHAP (SHapley Additive exPlanations) technique. This method enables us to clearly demonstrate how each variable influences the model's decisions, including the degree and direction of that influence. The beeswarm-type SHAP visualization utilized in this analysis (Fig. 8) illustrates how each observation impacts the model based on particular characteristics, the direction of variable influence, and whether high or low values of those variables strengthen or weaken that influence.

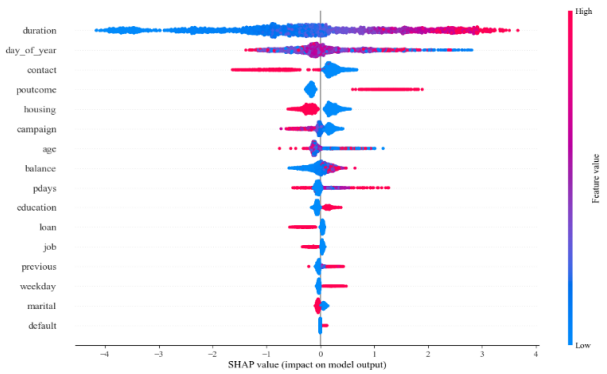


Fig. 8. SHAP Summary Plot Showing the Impact of Features on Deposit Prediction.

The call duration variable, referring to the length of time the customer remains engaged with the bank employee, has the most significant effect on the model's predictions. Specifically, longer call durations, indicated by high values in red, enhance the model's likelihood of predicting «placing a deposit». This suggests that extended communication between a bank employee and the customer positively influences the customer's decision-making, which is a crucial insight from a marketing perspective.

Moreover, the day_of_year variable emerged as an important factor in the model's predictions. This variable reflects the specific day of the year when the customer was contacted, and the findings indicate that campaigns and calls made during certain times of the year were linked to a higher success

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

rate. Additionally, the contact variable, which denotes the method of reaching the customer (e.g., telephone, mobile, etc.), also played a role in the decision-making process of the model. The results reveal that mobile contacts were correlated with more favorable outcomes than other forms of contact, implying that the way the bank interacts with customers affects the likelihood of achieving positive results.

While other variables present in the graph, such as housing, outcome, campaign, age, and balance, had some influence, their effect was comparatively minor compared to the top three variables. Nevertheless, their zones of positive and negative impact, along with color transitions, demonstrate that high values in some features can lead to changes in predictions, while others exert a more neutral or weak effect. In summary, this SHAP analysis has demystified the «black box» characteristic of the model, making its behavior more predictable and explicitly identifying which factors are most effective in bank marketing campaigns. These results are significant both for providing a technical explanation and for aiding in strategic decision-making.

Originality and practical value

The originality of this study lies in the development of an integrated predictive modeling framework that combines machine learning forecasting, entropy-weighted fuzzy multi-criteria evaluation, explainable artificial intelligence techniques, and temporal behavioral analysis within a unified decision-support system. Unlike conventional studies that evaluate predictive models using isolated performance indicators, the proposed approach enables multi-dimensional model comparison by simultaneously considering predictive accuracy, decision interpretability, and time-dependent behavioral patterns, thereby improving the transparency and reliability of model selection for deposit decision prediction.

The proposed framework can be directly applied by financial institutions to enhance the effectiveness of deposit marketing campaigns, optimize customer targeting strategies, and support data-driven decision-making processes. By integrating predictive modeling, interpretability analysis, and time-based behavioral insights, the approach allows banks to identify high-potential customer segments, determine optimal campaign timing, and improve resource allocation efficiency in deposit acquisition programs.

Conclusion

The suggested comparative framework successfully determines the best model for deposit decision prediction, according to an analysis of real banking data using several machine learning models. With an accuracy of 91.3%, F1-score of 0.902, specificity of 90.2%, recall of 89.7%, and AUC–ROC of 0.944, XGBoost outperformed the others when tested on an SMOTE-balanced dataset. By reducing model bias and performance instability, this multi-model evaluation guarantees more dependable selection for actual banking applications than studies that only use one classifier. The capacity of XGBoost to capture intricate non-linear relationships between deposit behavior and customer attributes explains its superior performance.

The time-based evaluation of customer engagement revealed clear temporal patterns in deposit acceptance. Daily, weekly, and monthly analyses showed that acceptance rates peaked on Wednesdays and during the months of March, September, and December, while lower activity was observed between May and July due to seasonal slowdowns. These insights emphasize the importance of strategically timing deposit campaigns, as customer responsiveness is strongly influenced by both weekday dynamics and seasonal factors.

A more thorough model ranking was obtained by integrating fuzzy multi-criteria evaluation, which combined objective weights determined by Shannon entropy with practical weights assigned by experts. With a hybrid fuzzy score of 0.7437, XGBoost was ranked highest, surpassing KNN (0.4161), Random Forest (0.6677), SVM (0.4704), and Logistic Regression (0.4401). This allows for the simultaneous consideration of accuracy, F1-score, specificity, recall, and AUC-ROC in a single decision-making framework, which sets it apart from conventional single-metric evaluation. The fuzzy system's capacity to represent uncertainty and trade-offs between several performance metrics explains the outcome. The novelty of this approach lies in its ability to provide banking institutions with a reliable and interpretable foundation

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

for model selection, reducing the risk of biased decisions and enhancing confidence in analytical outcomes. By linking technical evaluation with business priorities, the framework supports the design of more effective deposit campaigns, improves customer targeting, and ultimately strengthens strategic decision-making in real banking environments.

The most significant predictors were «duration», «day_of_year», and «contact», with «duration» alone accounting for more than 30% of the model's predictions, according to a SHAP analysis of the best-performing XGBoost model. This finding deviates from previous research by quantifying the precise contribution of customer engagement duration and timing to prediction accuracy, which is consistent with marketing theory, which holds that these factors have a significant impact on decision-making. Through the optimization of contact strategies and timing, this insight enables banks to create more targeted campaigns.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Abedin M. Z., Hajek P., Sharif T., Satu Md. S., Khan Md. I. Modelling bank customer behaviour using feature engineering and classification techniques. *Research in International Business and Finance.* 2023. Vol. 65. Art. 101913. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2023.101913
2. Basten C., Mariathasan M. Interest rate pass-through and bank risk-taking under negative-rate policies with tiered remuneration of central bank reserves. *Journal of Financial Stability*. 2023. Vol. 68. Art. 101160. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfs.2023.101160
3. Bogaard H., Doerr S., Jonker N., Kiefer H., Koltukcu O., Lopez C., Ornelas J. R. H., Rambharat R, Röhrs S., Teppa F., Bruggen F. van, Vansteenberghe E. Literature review on financial technology and competition for banking services. *Bank for International Settlements.* 2024. Working Paper No. 43. 41 p. URL: https://www.bis.org/bcbs/publ/wp43.htm
4. Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45, Iss. 1. P. 5–32. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1010933404324
5. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, 2016. P. 785–794. DOI: https://doi.org/10.1145/2939672.2939785
6. Davis J., Goadrich M. The relationship between precision-recall and ROC curves. *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*. (Pittsburgh, 25-29 June 2006). Pittsburgh, 2006. P. 233–240. DOI: https://doi.org/10.1145/1143844.1143874
7. Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27, Iss. 8. P. 861–874. DOI: https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010
8. Grandi P., Guille M. Banks, deposit rigidity and negative rates. *Journal of International Money and Finance*. 2023. Vol. 133. Art. 102810. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jimonfin.2023.102810
9. Haddadi S. J., Farshidvard A., Silva F. dos S., dos Reis J. C., da Silva Reis M. Customer churn prediction in imbalanced datasets with resampling methods: A comparative study. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 246. Art. 123086. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.123086
10. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* : textbook. 2nd ed. Springer New York, 2009. 745 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7
11. Kilimci Z. H. The effectiveness of homogeneous classifier ensembles on customer churn prediction in banking, insurance, and telecommunication sectors. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. 2022. Vol. 8, Iss. 3. P. 77–84. DOI: https://doi.org/10.22399/ijcesen.1163929
12. Lundberg S. M., Lee S.-I. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30. P. 4768–4777. URL: https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2017/hash/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Abstract.html
13. Marioriyad A., Ramazi P. Optimizing accuracy, recall, specificity, and precision using ILP. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, Iss. 7. Art. 1059. DOI: https://doi.org/10.3390/math13071059
14. Moro S., Cortez P., Rita P. A data-driven approach to predict the success of bank telemarketing. *Decision Support Systems*. 2014. Vol. 62. P. 22–31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.03.001
15. Schölkopf B., Smola A. J., Müller K.-R. Kernel methods in machine learning. *Annals of Statistics*. 2008. Vol. 36, № 3. P. 1171–1220. DOI: https://doi.org/10.1214/009053607000000677

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457

© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

16. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*. 1948. Vol. 27, Iss. 3. P. 379–423. DOI: https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
17. Văduva A.-G., Oprea S.-V., Niculae A.-M., Bâra A., Andreescu A.-I. Improving churn detection in the banking sector: A machine learning approach with probability calibration techniques. *Electronics*. 2024. Vol. 13, Iss. 22. Art. 4527. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics13224527
18. Wieland F. G., Teuho J., Klén R. Evaluation metrics and statistical tests for machine learning. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 56706. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x
19. Xie C., Zhang J.-L., Zhu Y., Xiong B., Wang G.-J. How to improve the success of bank telemarketing? Prediction and interpretability analysis based on machine learning. *Computers & Industrial Engineering*. 2023. Vol. 175. Art. 108874. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108874
20. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8, Iss. 3. P. 338–353. DOI: https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x

М. Б. НАМАЗОВ[1], М. Е. РАХІМОВ[2*]

[1]Інститут кіберфізичних систем і кібербезпеки, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавіда, 25, Баку, Азербайджан, AZ1073, тел. +994 (50) 346 57 07, ел. пошта manafeddin.namazov@aztu.edu.az, ORCID 0000-0003-1119-2442
[2*]Каф. «Інженерної математики та штучного інтелекту», Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавіда, 25, Баку, Азербайджан, AZ1073, тел. +994 (70) 530 39 60, ел. пошта musa.rahimov@aztu.edu.az, ORCID 0009-0009-0961-5064

Розробка гібридної системи оцінювання на основі нечіткої логіки та SHAP для прогнозування банківських депозитів у банківському секторі

Мета. Дослідження спрямоване на аналіз поведінки банківських клієнтів під час прийняття рішень щодо участі у депозитних продуктах та вирішення проблеми точного прогнозування депозитних рішень в умовах дисбалансу класів, обмеженої інтерпретованості моделей і варіативності моделей взаємодії клієнтів. **Методика.** Розроблено порівняльну експериментальну систему для оцінювання класичних і ансамблевих методів машинного навчання на основі банківських клієнтських даних. Для забезпечення об'єктивного та збалансованого порівняння моделей застосовано гібридну систему оцінювання на основі багатокритеріального аналізу рішень із використанням нечіткої логіки та ентропійного зважування. Додатково застосовано методи пояснюваного штучного інтелекту для інтерпретації внеску окремих змінних, а також проведено часовий аналіз для дослідження змін поведінкових реакцій клієнтів у часі. **Результати.** Отримані результати показали, що ансамблеві методи навчання демонструють більш стабільну прогнозну здатність порівняно з традиційними моделями. Запропонована гібридна система оцінювання забезпечує послідовне ранжування моделей прогнозування та підвищує надійність процесу їх вибору. Інтерпретація характеристик і часовий поведінковий аналіз показали, що показники взаємодії клієнтів і параметри комунікації мають вирішальне значення у прийнятті депозитних рішень. **Наукова новизна.** Запропоновано інтегровану систему прогнозного моделювання, що поєднує методи машинного навчання, нечітке багатокритеріальне оцінювання з ентропійним зважуванням, пояснюваний штучний інтелект та часовий поведінковий аналіз, забезпечуючи прозорий і надійний механізм порівняння моделей. **Практична значимість.** Запропонований підхід може бути використаний фінансовими установами для підвищення ефективності планування маркетингових депозитних кампаній, оптимізації стратегій таргетування клієнтів та підтримки прийняття управлінських рішень на основі даних у процесах залучення депозитів.

Ключові слова: прогнозування депозитів; поведінка банківських клієнтів; машинне навчання; нечіткий багатокритеріальний аналіз рішень; ентропійне зважування; пояснюваний штучний інтелект; часовий поведінковий аналіз

REFERENCES

1. Abedin, M. Z., Hajek, P., Sharif, T., Satu, Md. S., & Khan, Md. I. (2023). Modelling bank customer behaviour using feature engineering and classification techniques. *Research in International Business and Finance, 65*, 101913. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2023.101913 (in English)
2. Basten, C., & Mariathasan, M. (2023). Interest rate pass-through and bank risk-taking under negative-rate policies with tiered remuneration of central bank reserves. *Journal of Financial Stability, 68*, 101160. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfs.2023.101160 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

3. Bogaard, H., Doerr, S., Jonker, N., Kiefer, H., Koltukcu, O., Lopez, C., Ornelas, J. R. H., Rambharat, R, Röhrs, S., Teppa, F., Bruggen, F. van, & Vansteenberghe, E. (2024). Literature review on financial technology and competition for banking services. *Bank for International Settlements, 43,* 41. Retrieved from https://www.bis.org/bcbs/publ/wp43.htm (in English)
4. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5-32. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1010933404324 (in English)
5. Chen, T., & Guestrin, C. (2016, n.d.). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785-794). New York, NY, USA. DOI: https://doi.org/10.1145/2939672.2939785 (in English)
6. Davis, J., & Goadrich, M. (2006, 25-29 June). The relationship between precision-recall and ROC curves. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning* (pp. 233-240). Pittsburgh, Pennsylvania. DOI: https://doi.org/10.1145/1143844.1143874 (in English)
7. Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters, 27*(8), 861-874. DOI: https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010 (in English)
8. Grandi, P., & Guille, M. (2023). Banks, deposit rigidity and negative rates. *Journal of International Money and Finance, 133*, 102810. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jimonfin.2023.102810 (in English)
9. Haddadi, S. J., Farshidvard, A., Silva, F. dos S., dos Reis, J. C., & da Silva Reis, M. (2024). Customer churn prediction in imbalanced datasets with resampling methods: A comparative study. *Expert Systems with Applications, 246*, 123086. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.123086 (in English)
10. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. Springer New York. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7 (in English)
11. Kilimci, Z. H. (2022). The effectiveness of homogeneous classifier ensembles on customer churn prediction in banking, insurance, and telecommunication sectors. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 8*(3), 77-84. DOI: https://doi.org/10.22399/ijcesen.1163929 (in English)
12. Lundbegr, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In *Advances in Neural Information Processing Systems, 30*, 4768-4777. Retrieved from https://papers.nips.cc/paper_ files/paper/2017/hash/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Abstract.html (in English)
13. Marioriyad, A., & Ramazi, P. (2025). Optimizing accuracy, recall, specificity, and precision using ILP. *Mathematics, 13*(7), 1059. DOI: https://doi.org/10.3390/math13071059 (in English)
14. Moro, S., Cortez, P., & Rita, P. (2014). A data-driven approach to predict the success of bank telemarketing. *Decision Support Systems, 62*, 22-31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.03.001 (in English)
15. Schölkopf, B., Smola, A. J., & Müller, K.-R. (2008). Kernel methods in machine learning. *Annals of Statistics, 36*(3), 1171-1220. DOI: https://doi.org/10.1214/009053607000000677 (in English)
16. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal, 27*(3), 379-423. DOI: https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x (in English)
17. Văduva, A.-G., Oprea, S.-V., Niculae, A.-M., Bâra, A., & Andreescu, A.-I. (2024). Improving churn detection in the banking sector: A machine learning approach with probability calibration techniques. *Electronics, 13*(22), 4527. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics13224527 (in English)
18. Wieland, F. G., Teuho, J., & Klén, R. (2024). Evaluation metrics and statistical tests for machine learning. *Scientific Reports, 14*, 56706. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x (in English)
19. Xie, C., Zhang, J.-L., Zhu, Y., Xiong, B., & Wang, G.-J. (2023). How to improve the success of bank telemarketing? Prediction and interpretability analysis based on machine learning. *Computers & Industrial Engineering, 175*, 108874. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108874 (in English)
20. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control, 8*(3), 338-353. DOI: https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x (in English)

Дата надходження рукопису: 24.11.2025
Дата прийняття до публікації: 26.12.2026
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354457
© M. B. Namazov, M. E. Rahimov, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК 004.92:[530.191:514.7]

В. І. ШИНКАРЕНКО[1*], В. О. МАСЛЮК[2*], А. В. СТАДНІК[3*]

[1*]Каф. «Комп'ютерних інформаційних технологій», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225
[2*]Каф. «Комп'ютерних інформаційних технологій», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта viramasluk843@gmail.com, ORCID 0009-0008-4658-9806
[3*]Каф. «Комп'ютерних інформаційних технологій», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта a.v.stadnik@ust.edu.ua, ORCID 0009-0002-9907-1740

Визначення фрактальної розмірності часткових геометричних фракталів

Мета. Дослідження спрямовано на визначення залежності фрактальної розмірності часткових геометричних фракталів від ступеня спотворення структури фракталу. Такий аналіз є важливим для розуміння поведінки складних об'єктів у випадку часткового порушення властивості самоподібності, що часто трапляється у реальних задачах комп'ютерної графіки, моделювання природних процесів, біомедичних зображень та аналізу матеріалів. **Методика.** У дослідженні використано методику побудови фракталів на основі L-систем з проміжним мультисимвольним представленням із підсівом дефектів шляхом випадкового видалення певного відсотка символів зі сформованої послідовності. Аналіз здійснювався за допомогою методу box-counting: фрактальна структура багаторазово покривалася квадратною сіткою зі змінною довжиною сторін квадратів, після чого визначалась кількість квадратів, необхідних для покриття фігури. Фрактальна розмірність визначалася через логарифмічну залежність між кількістю квадратів і довжиною сторони квадратів (метод нахилу прямої на логарифмічному графіку). Графічні зображення фракталів зберігалися у форматі BMP з високою роздільною здатністю для мінімізації похибок, спричинених растрування. Для підвищення достовірності кожна структура аналізувалася шляхом десятиразового повторного покриття сіткою зі змінними параметрами. **Результати**. Запропонована методика була апробована на відомих геометричних фракталах: сніжинка Коха, квадратний острів Коха, крива Серпінського, крива дракона, крива Леві без спотворень. Для них отримане значення фрактальної розмірності узгоджується з теоретичним. Для цих фракталів була визначена залежність фрактальної розмірності від ступеня пошкодження (відсотка видалених елементів). Зокрема, зі зростанням кількості дефектів, як правило, спостерігається зменшення значення фрактальної розмірності, що свідчить про втрату самоподібності та спрощення геометричної структури. Такі результати дозволяють кількісно описати процес деградації фрактальних структур та встановити критичні межі стійкості самоподібності. **Наукова новизна** роботи полягає у визначенні нових об'єктів дослідження, а саме часткових геометричних фракталів. Отримані нові дані про ступінь самоподібності часткових фракталів з різним ступенем пошкодженості. **Практична значимість** полягає у можливості використання отриманих результатів у комп'ютерній графіці, обробці зображень, створенні 3D-моделей, а також у матеріалознавстві та інших науках, де важливе врахування складності та структури матеріалів. Результати роботи розширюють сучасні підходи до аналізу фрактальних структур і пропонують нові методи їхнього дослідження та застосування.

Ключові слова: фрактальна розмірність; фрактал; L-системи (Lindenmayer system); об'єктно-орієнтоване програмування; програмне забезпечення; інформаційні технології.

Вступ

Вивчення фракталів набирає популярності у різних наукових сферах. Фрактальні моделі знаходять застосування не лише в природних системах, а й у таких галузях, як економіка, медицина, хімія, логістика тощо. У комп'ютерних науках фрактали активно використовуються для створення графіки в іграх та програмах для обробки зображень. Оптимізація цифрової графіки та роботи із зображеннями, включно з 3D-моделями, є важливим напрямом дослідження фракталів [5, 12–13].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355135
© В. І. Шинкаренко, В. О. Маслюк, А. В. Стаднік, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Фрактали – це математичні структури, які характеризуються самоподібністю і мають дробове значення розмірності [2–4]. У складних структурах ідеальна самоподібність може бути відсутньою, що обумовлює необхідність вивчення часткових фракталів. Часткові фрактали – це фрактальні структури, які мають самоподібні властивості, проте не є типовими фракталами в повному розумінні цього терміну [1, 11].

Мета

Метою даної роботи є визначення фрактальних розмірностей [6–8] часткових геометричних фракталів з використанням адаптованих методів аналізу. Дослідження спрямоване на аналіз поведінки фрактальної розмірності залежно від ступеня спотворення структури фракталу. Приклад спотворення сніжинки Коха наведено на рис. 1, де перший фрактал без спотворення, інші з різним ступенем спотворення.

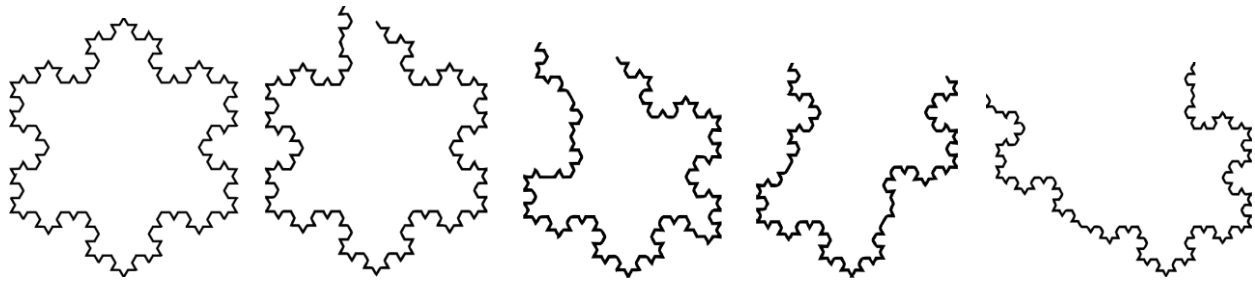


Рис. 1. Дефекти формування фракталів

Fig. 1. Defects of fractal formation

Методика

У роботі за основу взято типові геометричні фрактали, сформовані методом L-систем [10]. Цей метод базується на рекурсивному заміщенні символів у строках згідно з визначеними правилами. Оскільки усі елементи фігури представлені символами, то не складно було ввести в цей рядок деякі зміни, для отримання частково пошкодженого фракталу, що й треба було виконати. Дефектом (змінами) виступала деяка кількість випадково видалених символів з рядка. Цими символами можуть бути такі що визначають відображення лінії та кут повороту наступної лінії. Кількість символів для видалення визначена в залежності від заданого відсотку дефектів.

Для розрахунку розмірності використано метод Мінковського – зображення фракталу покривається деякою кількістю однакових квадратів [14]. Операція повторюється десять разів зі зміною довжини сторони квадрата. Оскільки в розпорядженні є лише піксельне зображення фігури, то для виконання описаної процедури умовно розрізаємо зображення на квадрати потрібного розміру. Ті квадрати, що містять у собі лінію фігури (тобто мають хоча б один чорний піксель), зараховуються як «покриваючі». Візуальне представлення одного з етапів цього процесу показано на рис. 2.

Довжина сторони квадрата для покриття розраховується наступним чином:

– визначається менша сторона зображення (після обрізання зображення по розмірам фігури);

– за стартове значення довжини сторони квадрата для покриття береться двадцять відсотків від меншої довжини зображення;

– кожне наступне значення знаходиться шляхом ділення поточного значення на 1/3, округлюючи до меншого.

Як відомо [9] фрактальна розмірність визначається із залежності:

$$\log M = \log c - s \cdot \log \delta, \qquad (1)$$

де M – кількість покриваючих квадратів: c – деякий коефіцієнт; s – шукана розмірність; δ – довжина сторони покриваючого квадрата.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355135
© В. І. Шинкаренко, В. О. Маслюк, А. В. Стаднік, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Виконаємо наступні заміни:

$$z = \log M; \quad (2)$$

$$b = \log c; \quad (3)$$

$$x = \log \delta; \quad (4)$$

$$a = -s; \quad (5)$$

Виходячи з (1) отримаємо рівняння:

$$z = b + ax. \quad (6)$$

Методом найменших квадратів визначаємо коефіцієнти у (6) та за оберненими підстановками знаходимо шукану розмірність *s*.

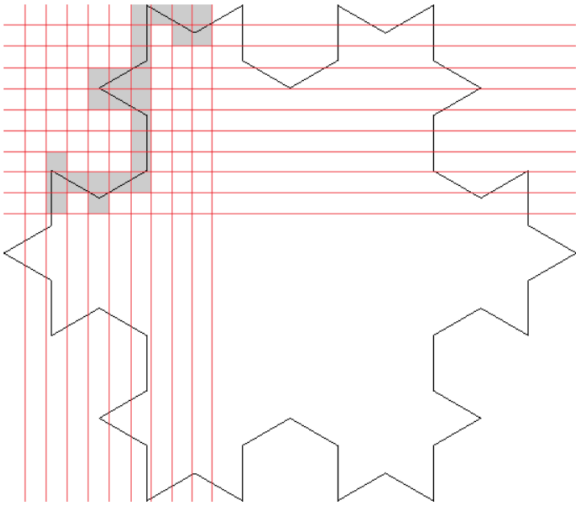


Рис. 2. Візуалізація покриття геометричного фракталу квадратами заданого розміру

Fig. 2. Visualization of covering a geometric fractal with squares of specified size

Запропонована методика була апробована на відомих геометричних фракталах: сніжинка Коха, квадратний острів Коха, крива Серпінського, крива дракона, крива Леві без спотворень. Були визначені довжина лінії та кількість ітерацій, при яких досягнуто найбільший збіг з теоретичними значеннями. Встановлені параметри були використані при подальших дослідженнях залежності фрактальної розмірності від ступеня спотворення. Були згенеровані геометричні фрактали з певним відсотком внесених дефектів, а саме: 1 %, 3 %, 5 %, 8 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 %, 40 %. Одиничний дослід не показав чітких результатів, тому розрахунок розмірності для кожного відсотку пошкоджень виконується сто разів з однаковими умовами, на графік виносяться мінімальне, максимальне та середнє значення.

Для реалізації алгоритмів побудови та аналізу фракталів було використано об'єктно-орієнтовану парадигму програмування. Ключові компоненти, такі як генератор L-систем, модуль спотворення структури, візуалізатор фракталів і модулі для обчислення фрактальних розмірностей, були реалізовані у вигляді окремих класів. Такий підхід забезпечує модульність, повторне використання коду, зручність масштабування та подальшої модифікації програми для дослідження інших типів фракталів чи методів аналізу. ООП також сприяло ефективній організації процесу розробки, полегшило налагодження програмного забезпечення та інтеграцію з бібліотеками для обробки зображень.

Таблиця 1

Вхідні дані для виконання досліджень

Table 1

Input data for conducting research

Фрактал	Ітерація	Довжина лінії (в пікселях)	Розмірність без дефектів
Сніжинка Коха	3	60	1,2604
Квадратний острів Коха	2	40	1,3613
Крива Серпінського	3	90	1,4257
Крива дракона	10	40	1,5988
Крива Леві	10	50	1,4251

Результати

В ході експерименту було отримано графік залежності фрактальної розмірності від кількості дефектів (рис. 3–7). Зеленим позначено максимальну розмірність, червоним – середню, синім – мінімальну.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355135
© В. І. Шинкаренко, В. О. Маслюк, А. В. Стаднік, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

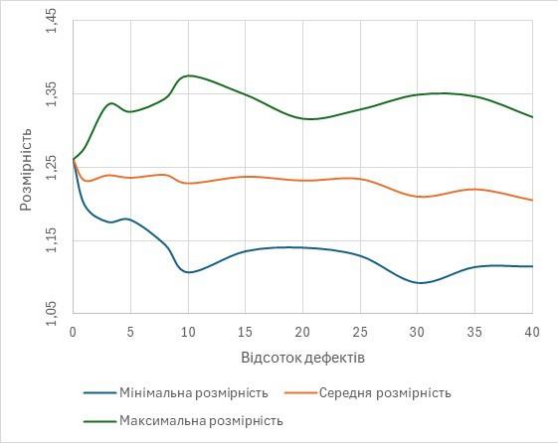


Рис. 3. Залежність фрактальної розмірності від кількості дефектів сніжинки Коха

Fig. 3. Dependence of fractal dimension on Koch snowflake defects.

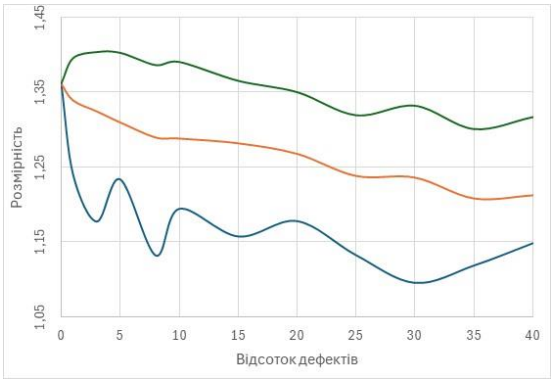


Рис. 4. Залежність фрактальної розмірності від кількості дефектів квадратного острова Коха

Fig. 4. Dependence of fractal dimension on Koch square island

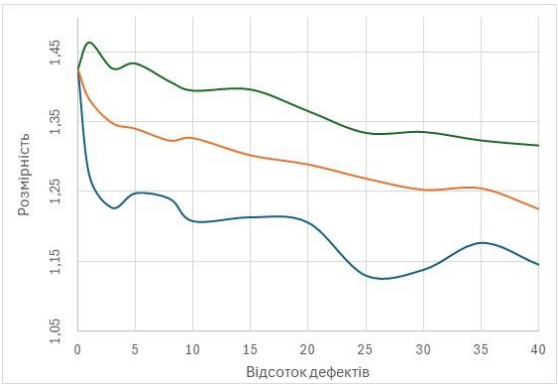


Рис. 5. Залежність фрактальної розмірності від кількості дефектів кривої Серпінського

Fig. 5. Dependence of fractal dimension on Sierpinski curve

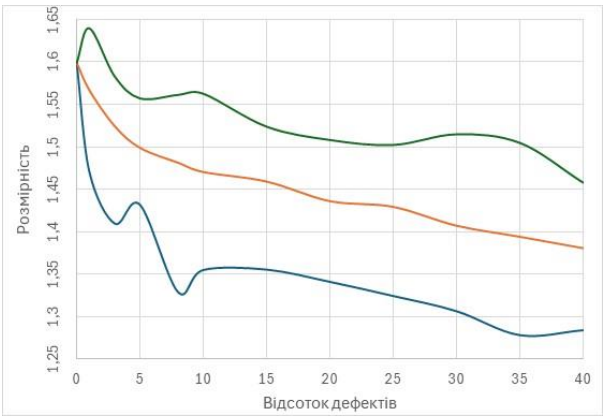


Рис. 6. Залежність фрактальної розмірності від кількості дефектів кривої дракона

Fig. 6. Dependence of fractal dimension on Dragon curve

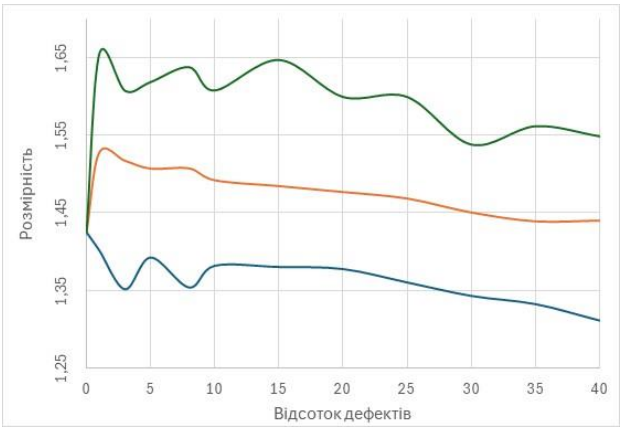


Рис. 7. Залежність фрактальної розмірності від кількості дефектів кривої Леві

Fig. 7. Dependence of fractal dimension on Levy curve

Розрахунки розмірності показали зміну поведінки фрактальної розмірності залежно від ступеня спотворення структури. Для перевірки точності методики був проведений аналіз таких фракталів як сніжинка Коха, квадратний острів Коха, крива Серпінського, крива дракона, крива Леві. Наприклад, для сніжинки Коха, отримане значення фрактальної розмірності приблизно 1,26, для кривої дракона – 1,59, для кривої Леві – 1,42. Отримані результати демонструють малі розбіжності з відомим значенням, що підтверджує правильність використаного методу.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355135
© В. І. Шинкаренко, В. О. Маслюк, А. В. Стаднік, 2026

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає у дослідженні фрактальної розмірності часткових геометричних фракталів з урахуванням ступеня їхніх спотворень. Розроблений метод розрахунку може бути адаптований для аналізу фрактальних структур у різних наукових галузях. Практична значимість полягає в можливості оптимізації обробки зображень, розробки графіки та створення ефективних 3D-моделей у комп'ютерних програмах.

Висновки

Розроблений метод аналізу та дослідження часткових фракталів і їхніх розмірностей має значний практичний потенціал у різних галузях. Основні напрями практичного застосування включають:

– створення нових моделей часткових фракталів шляхом формування дефектів і дослідження їхнього впливу на складність і форму структур;

– аналіз впливу різних типів і кількості дефектів на структуру фракталів може сприяти покращенню характеристик матеріалів, де важлива точність і надійність структури;

– визначення змін у фрактальній розмірності при різних рівнях пошкодженості фракталів може мати широке практичне застосування в технологіях і природничих науках;

– результати досліджень розширюють сучасні підходи до аналізу та вимірювання фрактальних структур;

– розроблене програмне забезпечення для генерації та аналізу фракталів є інноваційним інструментом, що відкриває нові можливості для дослідження фрактальної геометрії.

Дослідження не лише пропонує новий підхід до аналізу фракталів, але й забезпечує практичні інструменти для їхнього застосування в різних наукових і технологічних сферах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адашевська І. Ю., Краєвська О. О. Конструктивні фрактали як результуюче стискуюче відображення подібності. *CORE*. 2019. 8 с.URL: https://core.ac.uk/download/pdf/286927257.pdf
2. Квєтний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софина О. Ю., Шушура О. М. *Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень* : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2013. Ч. 1. 191 с.
3. Квєтний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софина О. Ю., Шушура О. М. *Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень* навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2013. Ч. 2. 235 с.
4. Рудик О. *Основи фрактальної геометрії* : навч.-метод. матеріал. 2020. URL: https://www.kievoi.ippo.kubg.edu.ua/kievoi/dynsys/fractals.html
5. Шинкаренко В. І., Чигир Р. Р. Конструктивно-продукційне моделювання тривимірних фрактальних поверхонь. *Системні технології*. 2025. Т. 1, № 156. С. 78–88. DOI: https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-156-2025-09
6. Avşar E. Contribution of Fractal Dimension Theory into the Uniaxial Compressive Strength Prediction of a Volcanic Welded Bimrock. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020. Vol. 79, Iss. 7. P. 3605–3619. DOI: https://doi.org/10.1007/s10064-020-01778-y
7. Datseris G., Kottlarz I., Braun A. P., Parlitz U. Estimating Fractal Dimensions: A Comparative Review and Open Source Implementations. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2023. Vol. 33, Iss. 10. Art. 102101. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0160394
8. Husain A., Reddy J., Bisht D., Sajid M. Fractal Dimension of Coastline of Australia. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, Iss. 1. Art. 6304. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-85405-0
9. Kleinbock D. *FalconerCh3*. 2017. 1 p. URL: https://people.brandeis.edu/~kleinboc/211a/FalconerCh3.pdf
10. Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*. 1968. Vol. 18, Iss. 3. P. 280–299. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-5193(68)90079-9
11. Mandelbrot B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York : W. H. Freeman and Company, 1982. 460 p. URL: https://archive.org/details/fractalgeometryo0000mand_i0s3/page/n7/mode/2up

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355135
© В. І. Шинкаренко, В. О. Маслюк, А. В. Стаднік, 2026

12. Shynkarenko V. I. Constructive-Synthesizing Representation of Geometric Fractals. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol. 55, Iss. 2. P. 189–199. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-019-00123-w
13. Shynkarenko V., Letuchyi O., Chyhir R. Constructive-synthesizing modeling of fractal crystal lattices. *2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)* (Lviv, 19–21 October 2023). Lviv, 2023. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/csit61576.2023.10324251
14. Wu M., Wang W., Shi D., Song Z., Li M., Luo Y. Improved Box-Counting Methods to Directly Estimate the Fractal Dimension of a Rough Surface. *Measurement*. 2021. Vol. 177. P. 109303. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109303

V. I. SHYNKARENKO[1*], V. O. MASLIUK[2*], A. V. STADNIK[3*]

[1*]Dep. «Computer information technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225
[2*]Dep. «Computer information technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail viramasluk843@gmail.com, ORCID 0009-0008-4658-9806
[3*]Dep. «Computer information technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail a.v.stadnik@ust.edu.ua, ORCID 0009-0002-9907-1740

Determination of Fractal Dimension of Partial Geometric Fractals

Purpose. Research aims on determining the dependence of the fractal dimension of partial geometric fractals on the degree of distortion of the fractal structure. Such analysis is important for understanding behavior of complex objects in cases of partial violation of self-similarity, which frequently occurs in real-world tasks of computer graphics, modeling of natural processes, biomedical imaging, and materials analysis. **Methodology**. Research employed fractal construction technique based on L-systems with intermediate multi-symbol representation and defect seeding by randomly removing a certain percentage of symbols from generated sequence. Analysis was performed using box-counting method: fractal structure was repeatedly overlaid with square grids of variable side lengths, after which number of squares required to cover figure was determined. Fractal dimension was calculated from logarithmic relationship between number of squares and side length of squares (slope method on logarithmic plot). Graphical representations of fractals were saved in high-resolution BMP format to minimize rasterization errors. To improve reliability, each structure was analyzed through tenfold repeated grid coverage with varying parameters. **Findings**. Proposed methodology was tested on well-known geometric fractals: Koch snowflake, Koch square island, Sierpinski curve, dragon curve, and Lévy curve without distortions. Obtained fractal dimension values corresponded to theoretical predictions. For these fractals, relationship between fractal dimension and degree of damage (percentage of removed elements) was determined. In particular, increasing number of defects generally led to decrease in fractal dimension, indicating loss of self-similarity and simplification of geometric structure. These results allow quantitative description of fractal structure degradation and identification of critical limits of self-similarity stability. **Originality**. Research introduces new objects of study, namely partial geometric fractals, and provides new data on self-similarity levels of partial fractals with varying degrees of damage. **Practical value.** Results can be applied in computer graphics, image processing, 3D modeling, as well as in materials science and other fields where complexity and structure of materials are important. Study expands current approaches to fractal structure analysis and proposes new methods for their investigation and application.

Keywords: fractal dimension; fractal; L-systems (Lindenmayer systems); object-oriented programming; software; information technologies

REFERENCES

1. Adashevska, I. Yu. (2019). Konstruktyvni fraktaly yak rezultuiuche styskujuche vidobrazhennia podibnosti. *CORE*. Retrieved from https://core.ac.uk/download/pdf/286927257.pdf (in Ukrainian)
2. Kvietnyi, R. N., Bohach, I. V., Boiko, O. R., Sofyna, O. Yu., & Shushura, O. M. (2013). *Kompiuterne modeliuvannia system ta protsesiv. Metody obchyslen*. (Vol. 1). Vinnytsia: VNTU. (in Ukrainian)
3. Kvietnyi, R. N., Bohach, I. V., Boiko, O. R., Sofyna, O. Yu., & Shushura, O. M. (2013). *Kompiuterne modeliuvannia system ta protsesiv. Metody obchyslen*. (Vol. 2). Vinnytsia: VNTU. (in Ukrainian)
4. Rudyk, O. (2020). *Osnovy fraktalnoi heometrii*. Retrieved from http://www.kievoi.ippo.kubg.edu.ua/kievoi/dynsys/fractals.html (in Ukrainian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355135
© В. І. Шинкаренко, В. О. Маслюк, А. В. Стаднік, 2026

5. Shynkarenko, V. I., & Chyhyr, R. R. (2025). Constructive-synthesizing modelling of three-dimensional fractal surfaces. *System Technologies, 1*(156), 78-88. DOI: https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-156-2025-09 (in Ukrainian)
6. Avşar, E. (2020). Contribution of fractal dimension theory into the uniaxial compressive strength prediction of a volcanic welded bimrock. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79*(7), 3605-3619. DOI: https://doi.org/10.1007/s10064-020-01778-y (in English)
7. Datseris, G., Kottlarz, I., Braun, A. P., & Parlitz, U. (2023). Estimating fractal dimensions: A comparative review and open source implementations. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 33*(10). 102101. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0160394 (in English)
8. Husain, A., Reddy, J., Bisht, D., & Sajid, M. (2021). Fractal dimension of coastline of Australia. *Scientific Reports, 11*(1), 6304. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-85405-0 (in English)
9. Kleinbock, D. (2017). *FalconerCh3*. Retrieved from https://people.brandeis.edu/~kleinboc/211a/FalconerCh3.pdf (in English)
10. Lindenmayer, A. (1968). Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*, *18*(3), 280-299. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-5193(68)90079-9 (in English)
11. Mandelbrot, B. B. (1982). *The fractal geometry of nature*. New York, USA: W. H. Freeman and Company. Retrieved from https://archive.org/details/fractalgeometryo0000mand_i0s3/page/n7/mode/2up (in English)
12. Shynkarenko, V. I. (2019). Constructive-synthesizing representation of geometric fractals. *Cybernetics and Systems Analysis, 55*(2), 189-199. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-019-00123-w (in English)
13. Shynkarenko, V., Letuchyi, O., & Chyhir, R. (2023, October). Constructive-synthesizing modeling of fractal crystal lattices. In *2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)* (pp. 1–4). Lviv, Ukraine. DOI: https://doi.org/10.1109/csit61576.2023.10324251 (in English)
14. Wu, M., Wang, W., Shi, D., Song, Z., Li, M., & Luo, Y. (2021). Improved box-counting methods to directly estimate the fractal dimension of a rough surface. *Measurement, 177*, 109303. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109303 (in English)

Дата надходження рукопису: 24.11.2025
Дата прийняття до публікації: 26.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/355135
© В. І. Шинкаренко, В. О. Маслюк, А. В. Стаднік, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.423.016.5:629.4.015

А. Я. КУЗИШИН[1*,2]

[1*]Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395
[2]Львівський НДІ судових експертиз, вул. Липинського, 54, Львів, Україна, 79024, тел. +38 (032) 231 76 13, ел. пошта andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395

Дослідження вертикальної динаміки електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» в умовах швидкісного руху

Мета. Встановити показники динамічних якостей вертикальної динаміки електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» під впливом випадкових нерівностей рейкової колії на прямій ділянці при швидкості руху до 250 км/год. **Методика.** У дослідженні застосовано комплексну просторову математичну модель електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» при взаємодії з рейковою колією, яка включає термодинамічну модель роботи пневматичної системи ресорного підвішування. Модель включає систему з 54 диференціальних рівнянь. Нерівності рейкової колії моделюються як випадковий процес і формуються методом задання білого шуму з подальшою фільтрацією фільтром Баттерворта, що забезпечує задані спектральні характеристики за довжинами хвиль та амплітудами. В якості показників динамічних якостей рухомого складу досліджуються коефіцієнти вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, а також вертикальні прискорення кузова. Коефіцієнти вертикальної динаміки визначались через величини сил, які виникають в комплекті ресорного підвішування. **Результати.** Отримано залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, максимальних значень вертикального прискорення кузова від швидкості руху. Залежності мають нелінійний характер зміни на основі яких встановлено максимально допустимі швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» при заданих умовах утримання рейкової колії. Показники динамічних якостей швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» отримано в режимі тари (порожній) та брутто (завантажений) вагона. **Наукова новизна.** На основі удосконаленої комплексної математичної моделі динамічної поведінки швидкісного рухомого складу з рейковою колією обґрунтовано теоретичні дані показників динамічних якостей в режимах, які характерні для експлуатаційних умов із врахуванням конструктивних особливостей рухомого складу, умов його взаємодії з рейковою колією та швидкості руху до 250 км/год. **Практична значимість.** Отримані показники динамічних якостей електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан», а також встановлені максимально допустимі швидкості руху можуть бути використані для обґрунтування умов його безпечної експлуатації в режимах швидкісного руху. Результати дослідження доцільно застосовувати під час проєктування, модернізації та вдосконалення систем ресорного підвішування швидкісного рухомого складу, а також при розробленні нормативної та експлуатаційної документації.

Ключові слова: швидкісний рухомий склад; показники динамічних якостей; математична модель; рейкова колія; конструктивні в’язі; коливання

Вступ

Запровадження швидкісного руху на залізничному транспорті України датовано ще 11 липня 2002 року. Проте тільки у 2012 р. Укрзалізницею були закуплені швидкісні електропоїзда подвійного живлення HRCS2 компанії Hyundai Rotem (країна – Південна Корея) та EJ 675 компанії Škoda Vagonka (країна – Чехія) (рис. 1–2).

Паралельно з цим в Україні на Крюківському вагонобудівному заводі (далі – КВБЗ) розпочався випуск вітчизняного моторвагонного рухомого складу, а саме електро- та дизель-поїздів.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)



Рис. 1. Електропоїзд HRCS2

Fig. 1. Electric train HRCS2



Рис. 2. Електропоїзд подвійного живлення EJ 675

Fig. 2. Dual-power electric train EJ 675

У 2011–2012 роках КВБЗ випущено в експлуатацію міжрегіональний швидкісний двосистемний електропоїзд ЕКр–1 «Тарпан» (рис. 3).



Рис. 3. Двосистемний електропоїзд ЕКр–1 «Тарпан»

Fig. 3. Dual-system electric train EKr–1 «Tarpan»

Проте на сьогодні швидкісний рух в Україні так і не отримав належного розвитку. Незважаючи на наявність сучасного рухомого складу, він переважно експлуатується на значно нижчих швидкостях, ніж це дозволяють технічні можливості. У зв’язку з цим особливо актуальним стає проведення теоретичних досліджень динамічної поведінки рухомого складу при його взаємодії з рейковою колією з швидкостями до 250 км/год.

Основною умовою їх безпечної експлуатації є дотримання допустимого рівня показників динамічних якостей [2, 9]. Зазначені показники головним чином залежать від конструктивних особливостей ресорного підвішування [11, 13] та умов взаємодії колісної пари з рейковою колією [8, 10].

Таким чином, дослідження динамічної поведінки сучасного українського швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» в діапазоні швидкостей руху 120÷250 км/год з врахуванням конструктивних особливостей механічної частини рухомого складу та умов його взаємодії з рейковою колією є актуальною науковою задачею. Визначення показників динамічних якостей дозволить встановити допустимі швидкості руху та може використовуватись для обґрунтування умов безпечної експлуатації в режимах швидкісного руху.

Мета

Метою роботи є встановлення показників динамічних якостей вертикальної динаміки сучасного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» під впливом випадкових нерівностей рейкової колії на прямій ділянці при швидкості руху до 250 км/год.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати наступні дослідження:

1. Провести аналітичний опис збурень у математичній моделі.

2. Отримати залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першого, другого ступенів ресорного підвішування, максимальних значень вертикального прискорення кузова вагона від швидкості руху та амплітуди вертикальної нерівності рейкової колії.

3. Надати рекомендації щодо максимально допустимих швидкостей руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» на прямій ділянці колії.

Методика

В якості збурення математичної моделі розглядаються відхилення рейкових ниток від прямолінійного контуру у вертикальній та горизонтальній площинах (рис. 4).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

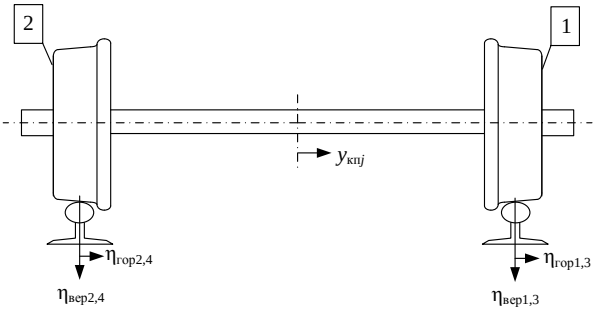


Рис. 4. Положення колісної пари в рейковій колії, яка має вертикальні та горизонтальні нерівності: *1* – праве колесо; *2* – ліве колесо

Fig. 4. Position of the wheelset in a railway track with vertical and horizontal irregularities: *1* – right wheel; *2* – left wheel

На даний час існує декілька методів задання нерівностей рейкової колії, які дозволяють відтворити реальний спектр нерівностей як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. До таких методів належать: метод задання білого шуму з додатковим використанням фільтра Баттерворта, спектральний метод (метод фільтрації або суперпозиції гармонік), метод авторегресійної моделі та ін. [12, 16–18]. Спектральний метод та метод авторегресійної моделі мають низку недоліків, зокрема, штучний періодичний вигляд профілю нерівностей, зумовлений синусоїдальними складовими, неврахування складних нелінійних процесів і змін параметрів уздовж колії, потребу у великій кількості гармонік, що ускладнює обчислення, а також має високу чутливість до вибору порядку моделі та ризик формування нереалістичних кореляцій у профілі.

Тому для відтворення реального спектра нерівностей використаємо метод задання білого шуму з додатковим застосуванням фільтра Баттерворта.

Білий шум – це випадкові коливання, спектр яких містить безліч синусоїдальних компонент із дуже малими амплітудами [1]. Властивостями білого шуму є:

– нульове математичне сподівання [15]:

$$E\left[z(t)\right]=0 \qquad (1)$$

– дельта-кореляція [14]:

$$R_z(\tau)=E[z(t)z(t+\tau)]=N_0\delta(\tau) \qquad (2)$$

де $R_z(\tau)$ – автокореляційна функція; $\delta(\tau)$ – дельта-функція Дірака (має нескінченне значення в точці $\tau=0$, і нуль в усіх інших, з одиничною площею під графіком); N_0 – постійна (щільність потужності).

– постійна спектральна щільність:

$$S_z(f)=const=N_0/2 \qquad (3)$$

де $S_z(f)$ – спектральна щільність потужності.

Для отримання реального спектру нерівностей рейкової колії згідно з ДСТУ EN 13848–1:2022 (EN 13848–1:2009, IDT) [3] необхідно застосувати смуговий фільтр Баттерворта 4-ого порядку із заданням довжини хвилі вертикальної нерівності від 3 м до 25 м. Крім цього, рекомендується застосовувати відповідні межі передавальної функції на основі допустимих значень затухання сигналу на різних довжинах хвиль. Для моделювання горизонтальної нерівності відповідно до [7] довжину хвилі нерівності рекомендується приймати від 10 м до 15 м.

У цифровому вигляді (дискретний час) передавальна функція смугового фільтра Баттерворта 4-ого порядку визначається за формулою:

$$H\left(z_{ком}\right)=\frac{b_0+b_1z_{ком}^{-1}+b_2z_{ком}^{-2}+b_3z_{ком}^{-3}+b_4z_{ком}^{-4}}{a_0+a_1z_{ком}^{-1}+a_2z_{ком}^{-2}+a_3z_{ком}^{-3}+a_4z_{ком}^{-4}} \qquad (4)$$

де $b_0...b_4$ – коефіцієнти, які визначають пропускання сигналу; $a_0...a_4$ – коефіцієнти, які формують затухання і крутизну фільтра; $z_{ком}$ – змінна в комплексній площині, яка описує частоту і фазу дискретного сигналу.

Таким чином, для оцінки динамічних властивостей вагона електропоїзда та показників його динамічних якостей збурення рейкової колії у вертикальній та горизонтальній площинах використовується спектр нерівностей колії, що наведений на рис. 5–6.

Показниками динамічних якостей вагона сучасного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» у вертикальному напрямку є коефіцієнти вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, а також вертикальні прискорення кузова.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

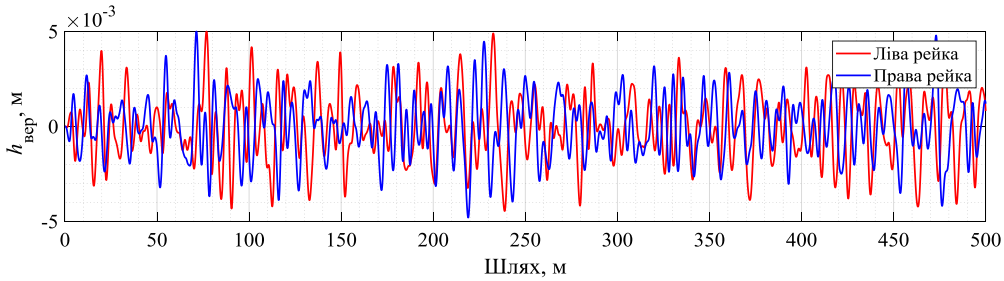


Рис. 5. Спектр вертикальних нерівностей рейкової колії в діапазоні довжин хвиль 5–25 м, згенерований на основі білого шуму з використанням фільтра Баттерворта

Fig. 5. The spectrum of vertical irregularities of the railway track in the wavelength range of 5–25 m, generated on the basis of white noise using a Butterworth filter

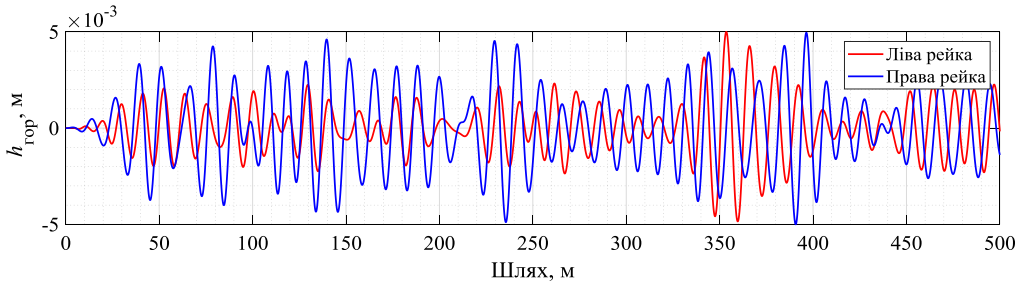


Рис. 6. Спектр горизонтальних нерівностей рейкової колії в діапазоні довжин хвиль 10–15 м, згенерований на основі білого шуму з використанням фільтра Баттерворта

Fig. 6. The spectrum of horizontal irregularities of the railway track in the wavelength range of 10–15 m, generated on the basis of white noise using a Butterworth filter

Коефіцієнти вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування можна визначити через величини сил або прогинів, які виникають в комплекті ресорного підвішування [5]:

$$k_{в.д.} = \frac{F_{в.д.}}{F_{в.ст.}} \qquad (5)$$

де $F_{в.д.}$ – вертикальна динамічна добавка сили, що виникає в комплекті ресорного підвішування; $F_{в.ст.}$ – вертикальна статична сила в комплекті ресорного підвішування.

Вертикальна динамічна добавка сили, що виникає в комплекті ресорного підвішування другого ступеня при проведенні розрахунків знаходиться за формулою:

$$F_{в.д.} = \left(p_j(t) - p_0\right) \cdot A_j(t) \qquad (6)$$

де p_j – внутрішній тиск в пневматичній ресорі, отриманий у ході проведення математичного моделювання [6]; p_0 – початковий тиск робочого тіла пневматичної ресори; A_j – ефективна площа пневматичної ресори у процесі її деформування.

Вертикальна динамічна добавка сили, що виникає в комплекті ресорного підвішування першого ступеня знаходиться за формулами:

– для першого візка:

$$P_{пzi} = k_{zi} \cdot \Delta z_i' \qquad (7)$$

– для другого візка:

$$P_{пzi} = k_{zi} \cdot \Delta z_i'' \qquad (8)$$

де k_{zi} – вертикальна еквівалентна жорсткість комплекту пружин першого ступеня ресорного підвішування; $\Delta z_i'$ і $\Delta z_i''$ – вертикальні деформації пружин першого та другого візка відповідно.

Прискорення кузова у вертикальній площині знайдені на основі комплексної просторової математичної моделі:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

$$a_{\text{зк}} = \frac{-\sum_{j=1}^{4} P_j - \sum_{j=1}^{4} P_{\text{в.вин}j} - \sum_{j=1}^{4} P_{\text{в}j} + m_{\text{к}} g}{m_{\text{к}}} \qquad (9)$$

де P_j – вертикальні реакції пневматичних ресор другої ступені ресорного підвішування; $P_{\text{в.вин}j}$ – вертикальна складова реакції гідравлічних гасників коливань виносу у другій ступені ресорного підвішування; $P_{\text{в}j}$ – вертикальні реакції вертикальних гідравлічних гасників коливання другої ступені ресорного підвішування; $m_{\text{к}}$ – маса кузова; g – прискорення вільного падіння.

Особливістю проведених досліджень є комплексне врахування конструктивних особливостей механічної частини електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» та реальних експлуатаційних умов взаємодії колісної пари з рейковою колією.

Результати

Дослідження впливу випадкового спектру нерівностей рейкової колії на коефіцієнти вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, прискорення кузова проводилось при довжині вертикальної нерівності 5÷25 м та амплітуді 5÷15 мм.

Як результат, на основі математичного моделювання взаємодії електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» з рейковою колією отримано залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування при тиску в пневматичній системі ресорного підвішування 5 атм. (рис. 7–8), що відповідає руху в режимі тари.

Аналіз отриманих результатів (рис. 7) показує, що при амплітуді вертикальної нерівності рейкової колії 5 мм значення коефіцієнта вертикальної динаміки першої ступені змінюється від 0,162 до 0,354 у діапазоні швидкостей 120–250 км/год. При амплітуді 7 мм коефіцієнт варіює від 0,226 до 0,491, а при 9 мм – від 0,29 до 0,627. Для амплітуд нерівностей 11 мм і більше значення коефіцієнтів вертикальної динаміки першої ступені ресорного підвішування у зазначеному діапазоні швидкостей перевищують допустимі межі. Так, при швидкості 120 км/год значення коефіцієнта становить 0,354 для амплітуди 11 мм, 0,417 – для 13 мм та 0,481 – для 15 мм.

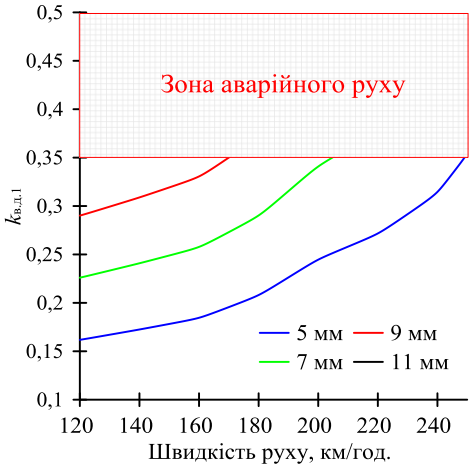


Рис. 7. Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першої ступені ресорного підвішування від швидкості руху

Fig. 7. Dependences of the vertical dynamic coefficients of the first stage of the suspension on the vehicle speed

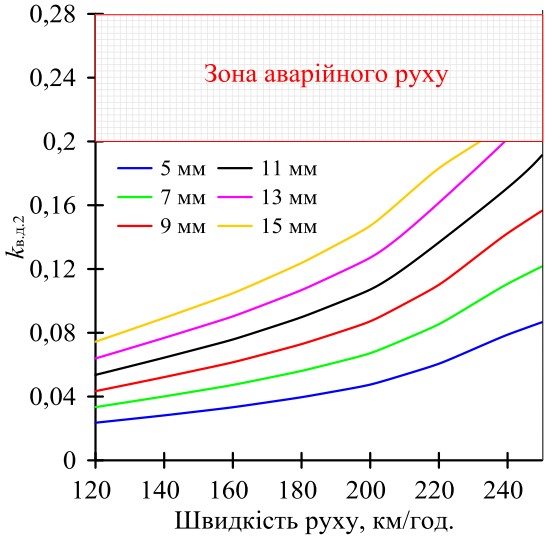


Рис. 8. Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки другої ступені ресорного підвішування від швидкості руху

Fig. 8. Dependences of the vertical dynamic coefficients of the second stage of the suspension on the vehicle speed

Аналітичний аналіз залежностей коефіцієнтів вертикальної динаміки другої ступені ресорного підвішування від швидкості руху (рис. 8) показав, що значення коефіцієнтів зростає з амплітудою нерівностей рейкової колії. У діапазоні швидкостей 120–250 км/год вони змінюються наступним чином: 5 мм – 0,024–0,087; 7 мм – 0,033–0,122; 9 мм – 0,043–0,156; 11 мм – 0,054–0,191; 13 мм – 0,064–0,226; 15 мм – 0,074–0,261.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Враховуючи, що основним завданням електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» є перевезення пасажирів, проведемо дослідження коефіцієнтів вертикальної динаміки в режимі брутто (тиск в пневматичній системі підвішування складає 710 Па.).

Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування від швидкості руху та амплітуди вертикальної нерівності рейкової колії наведено на рис. 9–10.

Аналіз отриманих залежностей (рис. 9) показує, що при амплітуді вертикальної нерівності 5 мм та зміні швидкості руху від 120 км/год до 250 км/год коефіцієнт вертикальної динаміки першої ступені зростає та змінюється від 0,118 до 0,251; при амплітуді 7 мм – від 0,165 до 0,349; при амплітуді 9 мм – від 0,212 до 0,448; при амплітуді 11 мм – від 0,259 до 0,546; при амплітуді 13 мм – від 0,305 до 0,645 та при амплітуді 15 мм – від 0,352 до 0,743. Наведені залежності мають нелінійний характер зміни та будуть використані при встановленні максимальної допустимої швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» при заданих умовах утримання рейкової колії.

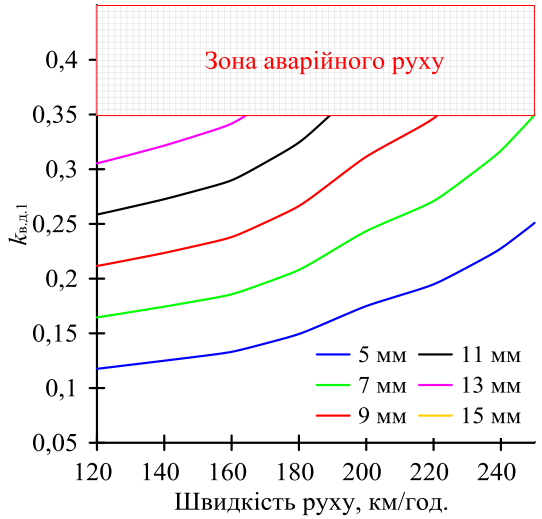


Рис. 9. Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першої ступені ресорного підвішування від швидкості руху

Fig. 9. Dependences of the vertical dynamic coefficients of the first stage of the suspension on the vehicle speed

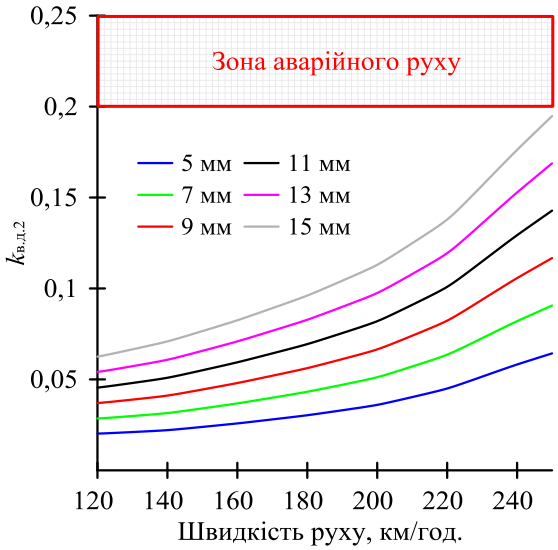


Рис. 10. Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки другої ступені ресорного підвішування від швидкості руху

Fig. 10. Dependences of the vertical dynamic coefficients of the second stage of the suspension on the vehicle speed

Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки другої ступені підвішування від швидкості руху (рис. 10) показують, що допустиме значення величиною 0,2 при заданих амплітудах вертикальної нерівності рейкової колії в діапазоні 5÷15 мм не було перевищено. Це свідчить про ефективні характеристики пневматичної системи ресорного підвішування та показує важливість використання такої системи у рухомому складі при експлуатації в умовах швидкісного руху.

Окрім дослідження коефіцієнтів вертикальної динаміки, актуальним є оцінювання значень вертикальних прискорень кузова, оскільки вони визначають плавність ходу та комфортабельність перевезення пасажирів. Залежності максимальних значень вертикального прискорення кузова в режимі брутто від швидкості руху наведено на рис. 11.

Експериментально встановлено, що при амплітуді вертикальної нерівності рейкової колії величиною 5 мм у діапазоні швидкостей руху 120÷250 км/год максимальне значення прискорень кузова змінюється від 0,084 до 0,253; при амплітуді 7 мм – від 0,118 до 0,359; при амплітуді 9 мм – від 0,154 до 0,467; при 11 мм – від 0,189 до 0,574; при 13 мм – від 0,227 до 0,682; та при 15 мм від 0,265 до 0,79.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

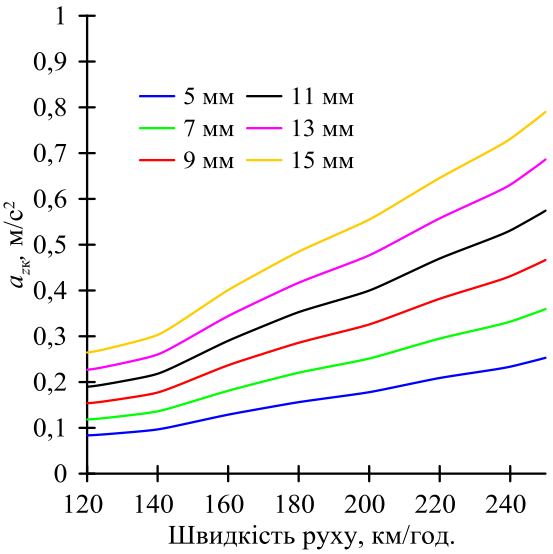


Рис. 11. Залежності максимальних значень вертикального прискорення кузова електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» від швидкості руху

Fig. 11. Dependences of the maximum vertical acceleration of the EKr–1 «Tarpan» train car body on vehicle speed

Також визначено, що при амплітуді вертикальної нерівності рейкової колії в діапазоні 5÷15 мм різниця у відсотковому еквіваленті в режимі брутто по відношенню до режиму тари знаходиться в межах 18,5÷27,3 %.

На основі отриманих значень показників динамічних якостей та їх граничних значень відповідно до вимог [4] встановлено допустимі швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» на прямій ділянці колії залежно від геометричних параметрів рейкової колії (рис. 12–13).

Встановлено, що в режимі тари при горизонтальній нерівності довжиною 10–15 м та амплітуді 9 мм, максимально допустима швидкість за коефіцієнтами вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, а також за максимальними значеннями вертикальних прискорень кузова вагона складає: при вертикальній нерівності довжиною 5–25 м та амплітуді 5 мм – 250 км/год, при амплітуді 7 мм – 205 км/год, при амплітуді 9 мм – 170 км/год. При амплітудах 11–15 мм не допускається рух з швидкостями 120–250 км/год.

В режимі брутто максимально допустима швидкість складає: при вертикальній нерівності довжиною 5–25 м та амплітуді 5 мм – 250 км/год, при амплітуді 7 мм – 250 км/год, при амплітуді 9 мм – 220 км/год, при 11 мм – 190 км/год, при 13 мм – 165 км/год. При амплітуді 15 мм в діапазоні швидкостей 120–250 км/год експлуатація заборонена.

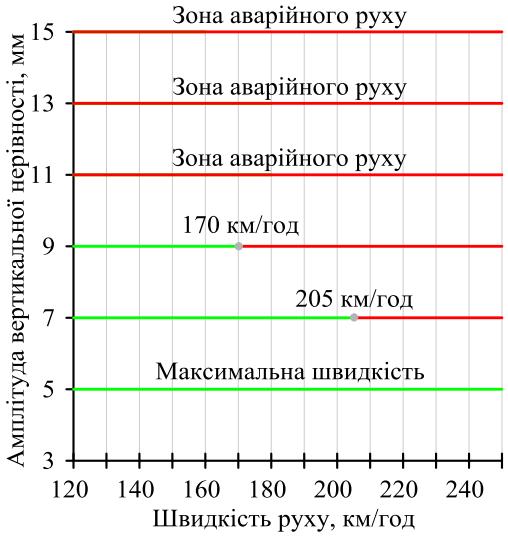


Рис. 12. Допустимі швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» у режимі тари на прямій ділянці

Fig. 12. Permissible operating speeds of the EKr–1 «Tarpan» electric train in empty (tare) condition on a straight track section

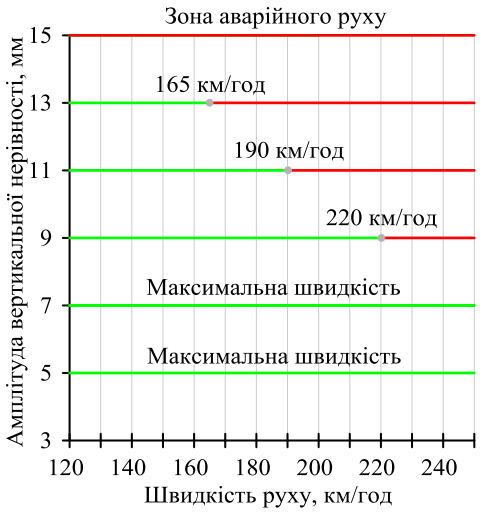


Рис. 13. Допустимі швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» у режимі брутто на прямій ділянці

Fig. 13. Permissible operating speeds of the EKr–1 «Tarpan» electric train in gross (loaded) condition on a straight track section

Отримані результати дозволяють стверджувати, що під час досліджень максимально допустимих швидкостей руху швидкісного рухомого

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

складу особливе місце посідає питання утримання рейкової колії. Технічний стан колії, її геометричні параметри та величина нерівностей безпосередньо впливають на характер динамічної взаємодії рухомого складу з рейковою колією, показники динамічних якостей, безпеку руху та комфорт пасажирів. Належне утримання рейкової колії є необхідною умовою для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації швидкісних поїздів, а також для реалізації можливостей підвищення швидкостей руху відповідно до технічних можливостей рухомого складу.

Наукова новизна та практична значимість

На основі удосконаленої комплексної математичної моделі динамічної поведінки швидкісного рухомого складу з рейковою колією обґрунтовано теоретичні дані показників динамічних якостей в режимах, які характерні для експлуатаційних умов із врахуванням конструктивних особливостей рухомого складу, умов його взаємодії з рейковою колією та швидкості руху до 250 км/год. Отримані показники динамічних якостей електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан», а також встановлені максимально допустимі швидкості руху можуть бути використані для обґрунтування умов безпечної експлуатації в режимах швидкісного руху. Результати дослідження доцільно застосовувати під час проектування, модернізації та вдосконалення систем ресорного підвішування швидкісного рухомого складу, а також при розробці нормативної та експлуатаційної документації.

Висновки

1. Отримано спектр вертикальних нерівностей рейкової колії у діапазоні довжин хвиль 5–25 м та горизонтальних нерівностей у діапазоні довжин хвиль 10–15 м. Означені спектри нерівностей згенеровані на основі білого шуму з використанням фільтра Баттерворта в програмному комплексі Matlab та використовується у якості збурення в математичної моделі електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан».

2. Встановлено, що при впливі випадкового спектра вертикальних нерівностей рейкової колії з амплітудою понад 11 мм в порожньому режимі коефіцієнт вертикальної динаміки першого ступеня ресорного підвішування перевищує допустимі значення на всьому діапазоні швидкостей 120–250 км/год. Для другого ступеня підвішування перевищення відбувається лише локально і проявляється на високих швидкостях при амплітуді нерівностей від 13 мм. У завантаженому режимі коефіцієнт вертикальної динаміки першого ступеня електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» змінюється від 0,118 до 0,743 за амплітуд 5–15 мм і швидкостей 120–250 км/год, що визначає необхідність обмеження максимальної швидкості. Коефіцієнт вертикальної динаміки другого ступеня залишається в межах допустимого (0,02–0,195), що підтверджує ефективність пневматичної системи ресорного підвішування та її важливу роль у забезпеченні безпеки руху при швидкісній експлуатації рухомого складу.

3. Встановлено, що максимально допустима швидкість руху електропоїзда залежить від амплітуди та довжини вертикальних і горизонтальних нерівностей рейкової колії. В порожньому та завантаженому режимах допустима швидкість зменшується зі збільшенням амплітуди нерівностей, а при великих значеннях рух у діапазоні 120–250 км/год заборонений.

Отримані результати підкреслюють необхідність зміни допустимої швидкості для забезпечення безпечної та надійної експлуатації рухомого складу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабак В. П., Куць Ю. В., Мислович М. В., Фриз М., Щербак Л. М. *Об'єктно-орієнтована ідентифікація стохастичних шумових сигналів* : монографія. Київ : Наукова думка, 2024. 240 с. DOI: https://doi.org/10.15407/978-966-00-1883-9
2. Дьомін Р. Ю., Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю., Сергієнко О. В. *Стійкість рухомого складу від сходження з рейок* : монографія. Сєвєродонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2022. 232 с. URL: https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/454

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

3. *ДСТУ EN 13848‑1:2022. Залізничний транспорт. Колія. Якість геометрії колії. Частина 1. Геометричні параметри колії* (EN 13848‑1:2019, IDT). [Чинний від 2024-12-31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.
4. *ДСТУ EN 14363:2019. Залізничний транспорт. Випробування та моделювання для прийняття ходових характеристик залізничних транспортних засобів. Бігова поведінка та стаціонарні випробування*. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
5. Кузишин А. Я., Ковальчук В. В., Соболевська Ю. Г. Просторова математична модель динамічної поведінки сучасного рухомого складу в умовах швидкісного руху. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 4(108). С. 55–66. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2024/318409
6. Кузишин А. Я., Кострица С. А., Соболевська Ю. Г., Батіг А. В. Світовий досвід створення математичних моделей пневматичної ресори: переваги та недоліки. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 4(94). С. 25–42. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/245974
7. Мямлин С. В. *Моделирование динамики рельсовых экипажей* : монография. Днепропетровск : «*Новая идеология*», 2002. 240 с.
8. Панченко С. В., Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Нерубацький В. П. *Конструкція та динаміка електричного рухомого складу* : підручник. Харків : *УкрДУЗТ*, 2018. Ч. 1. 280 с.
9. Ткаченко В., Сапронова С., Брайковська Н., Твердомед В. *Динамічна взаємодія рухомого складу і колії на лініях швидкісного руху суміщеного з вантажним* : монографія. Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 240 с. DOI: https://doi.org/10.36074/dvrsklshrsv-monograph.2021
10. Ткаченко В. П., Сапронова С. Ю., Фомин О. В., Кульбовський І. І., Зуб Є. П. *Опір руху і керованість рейкових екіпажів* : монографія. Київ : Вид‑во ДУІТ, 2017. 188 с.
11. Bruni S., Vinolas J., Berg M., Polach O., Stichel S. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamics*. 2011. Vol. 49, Iss. 7. P. 1021–1072. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2011.586430
12. Choi S. Identifying Parametric Models Used to Estimate Track Irregularities of a High‑Speed Railway. *Machines*. 2023. Vol. 11, Iss. 1. P. 6. DOI: https://doi.org/10.3390/machines11010006
13. Kuzyshyn A., Sobolevska J., Kostritsa S., Batig A., Boiarko V. Mathematical modeling of the second stage of spring suspension of high‑speed rolling stock. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2684, Iss. 1. Art. 020007. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0120402
14. Oppenheim A. V., Schafer R. W. *Discrete‑Time Signal Processing*. Upper Saddle River, NJ : Pearson, 2010. 1108 p.
15. Papoulis A., Pillai S. U. *Probability, random variables, and stochastic processes*. New York : Tata McGraw-Hill, 2002. 852 p.
16. Xin L., Xu L., Zhang J., Pei M., Mao J., Wang D. Research on characterization methods for track irregularities. *Railw. Eng. Sci*. 2026. Vol. 34, Iss. 1. P. 25–39. DOI: https://doi.org/10.1007/s40534-024-00367-z
17. Zeng Y., Núñez A., Li Z. A Simulation Study on Characterizing Transfer Functions of Railway Tracks Using Train‑Borne Laser Doppler Vibrometer. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*. *EVACES 2023*. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 432. P. 183–192. Cham: *Springer*, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5_19
18. Zeng Y., Núñez A., Li Z. Railway sleeper vibration measurement by train‑borne laser Doppler vibrometer and its speed‑dependent characteristics. *Computer‑Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2024. Vol. 39, Iss. 16. P. 2408–2426. DOI: https://doi.org/10.1111/mice.13150

A. YA. KUZYSHYN[1*,2]

[1*]Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel.+38 (032) 267 99 74, e-mail andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395
[2]Lviv Research Institute of Forensic Science, Lypynskyi St., 54, Lviv, Ukraine, 79024, tel.+38 (032) 231 76 13, e-mail andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID0000-0002-3012-5395

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Investigation of the Vertical Dynamics of the EK_R–1 «Tarpan» Electric Train Under High-Speed Operating Conditions

Purpose. To determine the performance indicators of the vertical dynamic behavior of the EKr–1 «Tarpan» electric train under the influence of random railway track irregularities on a straight track section at operating speeds of up to 250 km/h. **Methodology**. The study employs a comprehensive three-dimensional mathematical model of the EKr–1 «Tarpan» electric train in interaction with the railway track, which incorporates a thermodynamic model of the pneumatic suspension system. The model consists of a system of 54 differential equations. Railway track irregularities are modeled as a random process and generated by applying white noise followed by filtering with a Butterworth filter, which ensures the specified spectral characteristics in terms of wavelength and amplitude. As indicators of the dynamic performance of the rolling stock, the coefficients of vertical dynamics of the primary and secondary suspension stages, as well as the vertical accelerations of the car body, are investigated. The vertical dynamic coefficients are determined based on the forces arising in the suspension system. **Findings**. The relationships between the coefficients of vertical dynamics of the primary and secondary suspension stages and the maximum values of the car body vertical acceleration as functions of operating speed have been obtained. These relationships exhibit a nonlinear behavior, on the basis of which the maximum permissible operating speeds of the EKr–1 «Tarpan» electric train under the specified railway track maintenance conditions have been determined. The dynamic performance indicators of the high-speed EKr–1 «Tarpan» electric train were obtained for both tare (empty) and gross (loaded) vehicle conditions. **Originality**. Based on an improved comprehensive mathematical model describing the dynamic behavior of high-speed rolling stock–track interaction, theoretical values of dynamic performance indicators have been substantiated for operating regimes representative of service conditions, taking into account the rolling stock design features, wheel–rail interaction conditions, and operating speeds of up to 250 km/h. **Practical value**. The obtained dynamic performance indicators of the EKr–1 «Tarpan» electric train, as well as the established maximum permissible operating speeds, can be used to substantiate the conditions for its safe operation in high-speed service regimes. The results of the study are advisable for application in the design, modernization, and improvement of suspension systems of high-speed rolling stock, as well as in the development of regulatory and operational documentation.

Key words: high-speed rolling stock; dynamic performance indicators; mathematical model; railway track; structural constraints; vibrations

REFERENCES

1. Babak, V. P., Kuts, Yu. V., Myslovych, M. V., Fryz, M., & Shcherbak, L. M. (2024). *Object-oriented identification of stochastic noise signals* : monografiya. Kyiv: Naukova dumka. DOI: https://doi.org/10.15407/978-966-00-1883-9 (in Ukrainian)
2. Domin, R. Yu., Domin, Yu. V., Cherniak, G. Yu., & Serhiienko, O. V. (2022). *Stability of the rolling stock against derailment*: monografiya. Sievierodonetsk : SNU im. V. Dalia. Retrieved from https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/454 (in Ukrainian)
3. *Zaliznychnyi transport. Koliia. Yakist heometrii kolii. Chastyna 1. Heometrychni parametry kolii (EN 13848‑1:2019, IDT), DSTU EN 13848‑1:2022*. (2024). (in Ukrainian)
4. *Zaliznychnyi transport. Vyprobuvannia ta modeliuvannia dlia pryiniattia khodovykh kharakterystyk zaliznychnykh transportnykh zasobiv. Bihova povedinka ta statsionarni vyprobuvannia, DSTU EN 14363:2019*. (2020). (in Ukrainian)
5. Kuzyshyn, A. Y., Kovalchuk, V. V., & Sobolevska, Y. H. (2024). A Spatial Mathematical Model of the Dynamic Behavior of Modern Rolling Stock in High-Speed Traffic. *Science and Transport Progress, (4(108),* 55-66. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2024/318409 (in Ukrainian)
6. Kuzyshyn, A. Y., Kostritsia, S. A., Sobolevska, Y. H., & Batih, A. V. . (2021). World Experience in Creating Mathematical Models of Air Springs: Advantages and Disadvantages. *Science and Transport Progress, (4(94),* 25-42. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/245974 (in Ukrainian)
7. Miamlyn, S. V. (2002). *Modelyrovanye dynamyky relsovыkh эkypazhei* : monohrafyia. Dnepropetrovsk: «Novaia ydeolohyia». (in Russian)
8. Panchenko, S. V., Babaiev, M. M., Blyndiuk, V. S., & Nerubatskyi, V. P. (2018). *Konstruktsiia ta dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu*. (Vol. 1). Kharkiv: UkrDUZT. (in Ukrainian)
9. Tkachenko, V., Sapronova, S., Braikovska, N., & Tverdomed, V. (2021). *Dynamic interaction of rolling stock and track on lines of speed motion combined with freight* : monografiya. Vinnytsia: European Scientific Platform. DOI: https://doi.org/10.36074/dvrsklshrsv-monograph.2021 (in Ukrainian)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

10. Tkachenko, V. P., Sapronova, S. Yu., Fomyn, O. V., Kulbovskyi, I. I., & Zub, Ye. P. (2017). *Opir rukhu i kerovanist reikovykh ekipazhiv* : monohrafiia. Kyiv: Vyd‑vo DUIT. (in Ukrainian)
11. Bruni, S., Vinolas, J., Berg, M., Polach, O., & Stichel, S. (2011). Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamics, 49*(7), 1021-1072. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2011.586430 (in English)
12. Choi, S. (2023). Identifying parametric models used to estimate track irregularities of a high-speed railway. *Machines, 11*(1), 6. DOI: https://doi.org/10.3390/machines11010006 (in English)
13. Kuzyshyn, A., Sobolevska, J., Kostritsa, S., Batig, A., & Boiarko, V. (2023). Mathematical modeling of the second stage of spring suspension of high-speed rolling stock. *AIP Conference Proceedings, 2684*(1), 020007. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0120402 (in English)
14. Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. (2010). *Discrete‑Time Signal Processing.* Upper Saddle River, NJ: Pearson. (in English)
15. Papoulis, A., & Pillai, S. U. (2002). *Probability, random variables, and stochastic processes*. New York: Tata McGraw-Hill. (in English)
16. Xin, L., Xu, L., Zhang, J., Pei, M., Mao, J., & Wang, D. (2026). Research on characterization methods for track irregularities. *Railway Engineering Science, 34*(1), 25-39. DOI: https://doi.org/10.1007/s40534-024-00367-z (in English)
17. Zeng, Y., Núñez, A., & Li, Z. (2023). A Simulation Study on Characterizing Transfer Functions of Railway Tracks Using Train‑Borne Laser Doppler Vibrometer. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. EVACES 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, 432*, 183-192. Cham: *Springer*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5_19 (in English)
18. Zeng, Y., Núñez, A., & Li, Z. (2024). Railway sleeper vibration measurement by train-borne laser Doppler vibrometer and its speed-dependent characteristics. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 39*(16), 2408-2426. DOI: https://doi.org/10.1111/mice.13150 (in English)

Дата надходження рукопису: 29.11.2025
Дата прийняття до публікації: 24.12.2025
Дата публікації: 28.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/354765
© А. Я. Кузишин, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

UDK [624.011.1:691.88-034.14]-027.45

D. O. BANNIKOV[1*], I. M. BAKAN[2]

[1*]Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679
[2]LLC «Modern Building Company Group», Heroes of Ukraine St., 36, apt. 18, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25031, tel. +38 (067) 436 91 21, e-mail sbc.group.ua@gmail.com, ORCID 0009-0008-4279-9793

Experimental evaluation of Strength and Deformability of Steel Nails for Wooden Structures

Purpose. The main purpose of the paper is to discuss the experimental studies to determine in laboratory conditions the characteristics of nail steel of one of the most common companies on the modern construction market of Ukraine – ExpertFix (Denmark). **Methodology.** To achieve this goal the tests were carried out for tensile testing of nails of a classic round cross-section of 5 diameters in the range from 4 to 7 mm, manufactured according to the German standard. **Findings.** According to the results of the study, diagrams of the work of steel nails under load were constructed, which turned out to be very close to the classical diagram of the work of high-strength steel. The destruction of the samples occurred according to a visco-plastic scheme with the formation of a characteristic «neck» at the rupture site. The recorded strength level is from 450 to 700 MPa at a relative deformation of up to 13%. **Originality.** The obtained characteristics of nails correspond to high-strength steels of classes C390–C500 according to the standard of Ukraine, but do not correspond to steels of grades St1–St3, for which current theoretical approaches to the design of nodal connections have been developed. Therefore, the use of such nail products in practice requires adjustment and clarification of existing approaches and methods of their use in wooden structures, which in turn requires the intensification of scientific research in this direction. **Practical value.** The practical usage of the strength characteristics of steel nails obtained during experimental studies allows for the correct and reasonable design of nodal connections of wooden structures based on the current Ukrainian standard. It also provides a basis for developing more advanced calculation approaches for assessing their performance.

Keywords: wooden structures; nodal connections; nail; steel; mechanical characteristics of steel

Introduction

Wood structures are becoming increasingly popular in the world today. They are gradually «conquering» more and more new industries, especially in the field related to everyday human activity. Wood is used for both residential and public construction. At the same time, the properties of wood allow it to be used for both low-rise and high-rise construction, including for rather complex engineering cases of earthquake-resistant construction. The latter trend is especially popular in modern Mediterranean countries, where the lower part of the load-bearing frame of buildings is often assumed to be more rigid and designed from reinforced concrete, and the rest of the structure is a spatial system of wooden elements [11].

This popularity of timber is due to a number of its positive qualities. These include, first and foremost, very high environmental friendliness of the material, which is ensured by growing construction timber in specialised areas closed from external influences, such as mountain plantations. In addition, such controlled growth conditions will improve the physical and mechanical qualities of such wood, as it has significantly fewer defects compared to wood growing in conventional forests. The second important positive feature of wood is its high architectural and expressive properties, which contribute to the creation of very im-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

pressive construction projects. The exterior of such objects is very memorable, leaving only pleasant impressions. The interior made of wood is so attractive to most residents that, according to them, they cannot refuse wood and switch to finishing with other building materials. An additional unique property of wood that attracts an increasing number of people around the world is its good thermal insulation qualities. In practice, residents of wooden buildings describe this phenomenon as if wood «radiates warmth» and note it as a very positive thing.

Wood is also a fairly versatile material in terms of climatic conditions for its use. Modern wood structures are traditionally built in areas with a rather harsh and cold climate, especially in Scandinavia [19]. Likewise wood is quite popular for construction in areas with humid and hot climates, especially in Asia. Such diverse natural and climatic conditions are fully manifested in the territory of modern China, so the use of wood is particularly interesting and relevant for this country [20].

We should also mention the wide range of modern wood products. Not only do they have all the advantages of conventional wood, but they also have improved mechanical characteristics and construction performance. These products primarily include glued wood beams [13]. It is used to build structures that can cover significant spans of about 30 m and above. In order to increase fire resistance, load-bearing elements made of glued laminated timber can be covered with special finishing boards made of wood wool, which, according to the studies, eliminates the risk of fire [7]. In general, such a composite combination of materials will contribute to a significant increase in the competitiveness of modern wood in the construction market.

Currently, a number of the latest structural solutions for timber frames have been developed in the world [17]. The main problematic issue in the design and subsequent operation of such wooden structures is the arrangement of nodal joints [16]. The reliable operation of the entire structure largely depends on their high-quality and reliable behaviour. Therefore, in design practice, increased attention is paid to nodal connections.

This does not bypass the sphere of scientific research. The performance of nodal joints in wooden structures is analysed from both theoretical and practical perspectives. Moreover, experimental studies are dominant in this regard, as they provide invaluable material that can be further processed, summarised and presented in the form of theoretical approaches and practical methods in the regulatory framework [18]. On the other hand, methods of strengthening existing nodal connections continue to be improved and developed [15].

In Ukraine, the main regulatory document that also regulates the design of nodal connections of wooden structures is the standard [1]. According to it, the main types of joints are contact connections and connections with working ties. The latter include nailed connections.

Nailed connections are now very common in the world. In building structures, such connections often play a key role in determining the load-bearing capacity of the entire structure. Although various metal alloys and polymer mixtures are used as nail materials, steel remains the main and classic type of material that is mass-produced around the world. Therefore, an essential component of the load-bearing capacity assessment in the design practice of nailed joints is to take into account the mechanical characteristics of the steel used for nail production.

In Ukraine, there is currently no official national standard that would regulate the geometric dimensions and shape of steel nails, as well as the steel grades used to make them. The closest analogue, which is not currently an official standard of Ukraine, is the standard [3]. In design practice, the most common type of nail in accordance with this standard is the «round nail», which has a cross-section of the shank in the form of a circle (Fig. 1). The main geometric dimensions in accordance with the standard [3] are presented in Table 1.

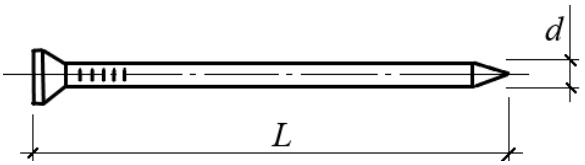


Fig. 1. Round nail – general shape and dimensions:
d – nail diameter; *L* – nail length

In the European practice, which is now actively used in the construction industry of Ukraine, the main regulatory document is the standard [12]. According to it, the nail also has the shape of a «round nail» (Fig. 1), and its main geometric di-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

mensions are given in Table 1. As can be seen, compared to the Ukrainian standard, the number of standard sizes is much larger, and there are also certain differences in the geometry of nails.

Table 1

Geometrical dimensions of round nails (mm)

DSTU 4028:2008		DIN 1151	
d	*L*	*d*	*L*
–	–	0.9	13
–	–	1.0	15
–	–	1.2	20
–	–	1.4	25
–	–	1.6	30
1.8	32, 40, 50, 60	1.8	35
2.0	40, 50	2.0	40
–	–	2.2	45, 50
2.5	50, 60	2.5	55, 60
–	–	2.8	65
3.0	70, 80	–	–
–	–	3.1	65, 70, 80
–	–	3.4	80, 90
3.5	90	–	–
–	–	3.8	100
4.0	100, 120	–	–
–	–	4.2	100, 110, 120
–	–	4.6	130
5.0	120, 150	5.0	140
–	–	5.5	140,160
6.0	150, 200	6.0	180
–	–	7.0	210
–	–	7.6	230, 260
8.0	250	–	–
–	–	8.8	260

Nails with a diameter of 4–7 mm are used for load-bearing elements of modern building structures made of wood and wood-based materials. Smaller diameters do not provide the required load-bearing capacity, so they are used only for minor structural elements or for fixing finishing structural elements. Nails of large diameters of 8 and 8.8 mm have serious difficulties with their placement in elements, as it is necessary to ensure the minimum distance between the nail axes, which, according to the current standard of Ukraine [1], can reach 10 nail diameters. This requires large cross-sections of load-bearing structural elements, which is not always justified. On the other hand, the process of installing large diameter nails requires mandatory pre-drilling of holes, which makes it more complicated and expensive.

A separate aspect is the steel grade of the nail. According to standards [3, 12], this information is not available. Yet, it is key in terms of assessing the nature of the nail performance in wood. It is known that a nail must be sufficiently flexible to prevent wood splitting. However, on the other hand, too high deformation properties can lead to technological difficulties with the installation of nails in structural elements, as the process itself involves mostly impacts that can bend the nail shank before it is completely immersed in the wood. It is also worth noting the possible danger of increased deformability of the nailed joint itself if the nail steel is highly ductile. Therefore, the issue of choosing the right steel grade for nails remains quite important.

It is also worth noting that the correct choice of steel for building structures leads to a significant improvement in its structural characteristics, primarily static ones [14]. Depending on the steel grade, it is also possible to influence the dynamic characteristics of the structure, which allows for their control [8]. This is especially evident in case of seismic impacts on structural elements [10]. Often, steel in general becomes the «weak point» of a structure, which leads to emergencies and complete cessation of operation [9].

In domestic practice, specialised professional literature recommends using carbon steels of ordinary quality of grades St1–St3 for nails. According to the current Ukrainian standard [4], such steels have a rather narrow range of changes in the main mechanical characteristics – strength and stiffness. A selection of these characteristics for rolled steel thicknesses up to 10 mm is shown in Table 2.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

According to the current standard in Ukraine [1], one of the main design characteristics of a nail is the «characteristic value of the bending moment of plastic deformation». For smooth round nails, it is calculated by expression (1):

$$M_{y,Rk} = 0.3 \cdot f_u \cdot d^{2.6}, \quad (1)$$

where f_u – tensile strength of steel.

Thus, the main practical problem faced by specialists in the design of nailed joints of wooden structures is the assessment of the mechanical characteristics of nail steel. It is impossible to solve this problem theoretically, as each batch of nails is manufactured at a specific enterprise and in a specific country. Currently, the Ukrainian construction market is home to a wide variety of suppliers of metal hardware products, which are often not accompanied by special certificates or contain false information about the steel characteristics. Therefore, the only way to obtain reliable mechanical characteristics of nail steel is to conduct laboratory testing.

Table 2

Mechanical characteristics of carbon steel

Steel	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percent elongation, %
St1	195 – 205	305 – 410	34 – 35
St2	215 – 225	325 – 430	32 – 33
St3	235 – 255	360 – 480	26 – 27

Purpose

The main purpose of the research is to conduct laboratory tests to determine the main mechanical characteristics of nail steel. This makes it possible to correctly determine the theoretical bearing capacity of nailed joints of wooden structures in the future.

To achieve this purpose, the following tasks were formulated and solved during the research:

1. To select the most popular nail sizes in the modern construction market of Ukraine.
2. To measure the geometric dimensions of nails before testing.
3. To conduct a tensile test on the nails of the selected sizes.
4. To evaluate the obtained mechanical characteristics of nail steel after testing.
5. To analyse the compliance of the mechanical characteristics of steel with known brands.

Methodology

Let us consider the solution of all the above tasks in sequence.

Since there is currently no specialised standard in Ukraine for testing nails in general and steel nails in particular, the organisation and conduct of these experimental studies were based on the current standard [5]. According to this standard, the determination of the mechanical characteristics of nails can be performed on samples without preliminary machining, i.e. directly on the nails.

Nail standard sizes. Based on the data in Table 1, nails of the most famous manufacturer ExpertFix (Denmark) were selected for experimental studies. This company has been present in the construction market of Ukraine for a long period of time and therefore enjoys well-deserved consumer confidence due to its price-quality ratio.

Based on the data of experts in the design and manufacture of wood structures, 5 nail sizes with the diameters declared by the manufacturer were selected for testing: 4.2 mm; 5.0 mm; 5.5 mm; 6.0 mm; 7.0 mm.

Initial geometrical dimensions of the nails. Test samples were selected from existing batches and their geometrical dimensions were carefully measured. For each size, three samples were measured. Measurements were made in two cross-sections according to the recommendations of the standard [5]. The number of samples was taken on the basis of a series of previous studies that established a high correlation and stability of both geometric dimensions and mechanical characteristics for steel round nails. The data obtained are presented in Table 3.

During the general inspection and measurements of the nail samples, the following geometric shape defects were identified:

– for samples with a diameter of 4.2 mm, a reduction in diameter compared to the nominal one. For the tests, the actual diameter was input into the measuring unit;

– for samples with a diameter of 5.0 mm, the axis was not straight. Samples with a straight axis were selected for testing;

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

– for samples with a diameter of 6.0 mm, the flattening of the point. Samples with the correct shape of the point were selected for testing;

– for samples with a diameter of 7.0 mm – a reduction in diameter compared to the nominal one. For the tests, the actual diameter was input in the measuring unit.

To ensure that the proportionality criterion was met, the test base was determined for the samples in accordance with the standard [5]:

$$L = 11.3 \cdot \sqrt{A}, \qquad (2)$$

where A – cross-sectional area of the sample.

The finally adopted measurement base is shown in Table 3.

Fig. 2 shows the appearance and overall dimensions of nails of different sizes selected for testing.

Tensile tests. For the laboratory tests, we used a universal tensile testing machine UG20/2 with a specialised computer system for recording and preliminary processing of test results. A general view of the measuring unit is shown in Fig. 3. The installation was pre-calibrated and has a certificate of compliance with Class 1 requirements according to the standard [6]. The unit also met the recommendations of Annex A of the standard [5].

The measuring unit can operate in two ranges – up to 2 tonnes and up to 20 tonnes. The first range was used for nails with a diameter of 4–6 mm, and the second range was used for nails with a diameter of 7 mm. In order to ensure rigid nailing during the tests, special attachments with small notches were used (Fig. 4), which also allowed for the necessary clearances in the fastening grips. The attachments were aligned in the grips to ensure purely tensile deformations and avoid bending deformations in accordance with the recommendations of the standard [5].

Table 3

Geometrical dimensions of round nails

Sample	Diameter, mm		Cross-sectional area, mm^2	Length, mm		Measurement base, mm
	nominal	real		nominal	real	
42 – 1	4.2	4.0	12.57	120.0	121.0	40.0
42 – 2					120.8	
42 – 3					120.4	
50 – 1	5.0	5.0	19.64	150.0	146.0	50.0
50 – 2					146.5	
50 – 3					148.6	
55 – 1	5.5	5.5	23.75	150.0	150.6	55.0
55 – 2					150.3	
55 – 3					150.4	
60 – 1	6.0	6.0	28.27	200.0	197.3	60.0
60 – 2					198.2	
60 – 3					198.4	
70 – 1	7.0	6.9	37.39	250.0	248.3	70.0
70 – 2					248.0	
70 – 3					248.8	

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

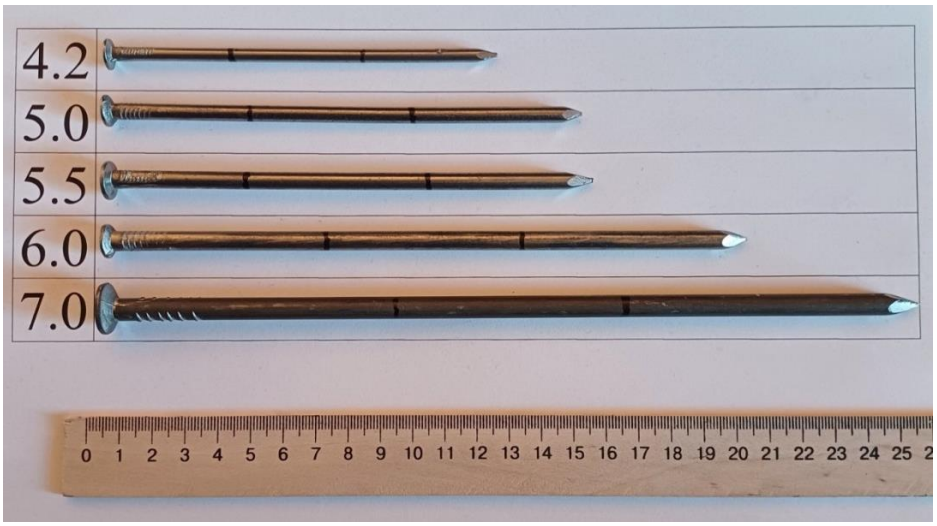


Fig. 2. General view of the test nails



Fig. 3. Measuring unit for testing steel nails



Fig. 4. Nail attachments

The test process consisted of a gradual tensile load on the samples fixed in the grips. The loading rate during the tests remained constant at 150 N/s, which, according to some estimates, can be classified as a mild loading mode. This made it possible to obtain a more correct diagram of the nail material under load, as well as to minimise micro-displacement of the nails during the tests. This speed corresponds to method A1 of testing samples according to the recommendations of the standard [5].

Findings

Diagrams of steel performance. The obtained diagrams for different sizes of nails have a form that is not typical for the classical carbon steel diagram. In general, typical diagrams are shown in Figs. 5 and 6 in the «force-strain» and «force-time» axes, respectively.

Structurally, the diagrams consist of 5 separate sections separated by characteristic points:

S_1 – beginning of elastic behaviour;

S_u – end of elastic behaviour (conventional yield strength);

S_v – tensile strength;

S_e – damage boundary;

S_0 – end of work.

Section *1* corresponds to the process of «self-accommodation», when the existing gaps are selected and the sample takes its rigid position during testing.

Section *2* corresponds to the process of elastic deformation of steel in its classical sense.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

Section *3* corresponds to the process of steel hardening in its classical sense.

Section *4* corresponds to the fracture process, when a neck is formed on the sample and it breaks at the point S_e.

Section *5* has no meaningful value and is generated automatically by the measuring unit.

Fig. 7 shows the resulting pattern of fracture of the sample during testing. For all the tested nail diameters, the fracture pattern was recorded to be the same, close to a visco-plastic fracture with the formation of a characteristic «neck» at the fracture site.

Mechanical characteristics of steels. Table 4 presents quantitative summarised test results obtained by processing the experimental diagrams.

Table 5 shows the calculated values of the coefficient of variation. As can be seen, for samples of all diameters, the coefficient of variation does not exceed 7% for strength and 19% for deformability, which is a fairly good indicator. This indicates the high quality and homogeneity of the steels used to make the nails.

Table 5

Coefficient of variation of the test results

Nominal diameter of the nail, mm	Coefficient of variation, %		
	yield strength conventional	tensile strength	elongation
4.2	1.39	1.16	16.83
5.0	6.63	2.96	18.05
5.5	0.28	0.74	5.09
6.0	3.34	2.13	11.69
7.0	1.18	1.69	3.17

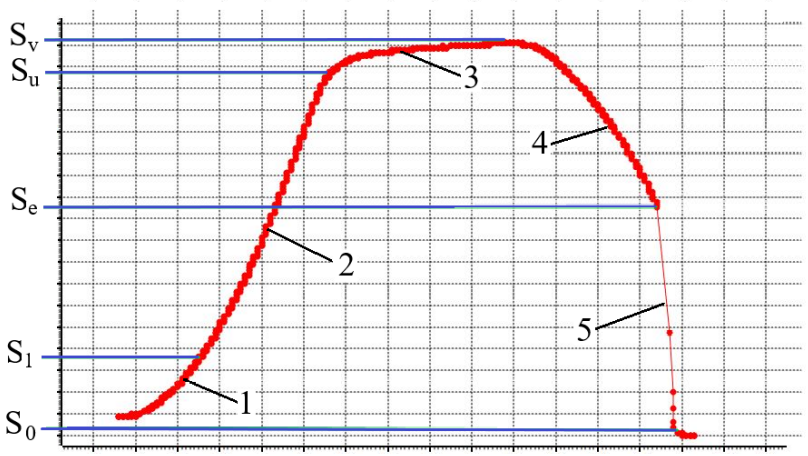


Fig. 5. Typical diagram of nail steel behaviour in the force-strain axis

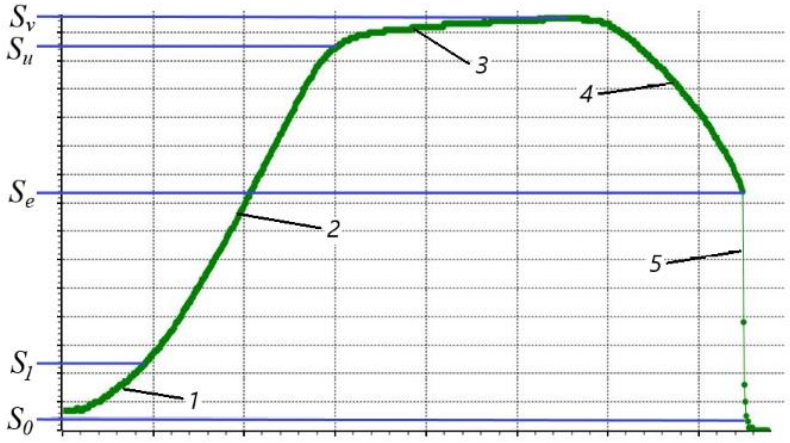


Fig. 6. Typical diagram of nail steel behaviour in the force-time axis

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

a *b*

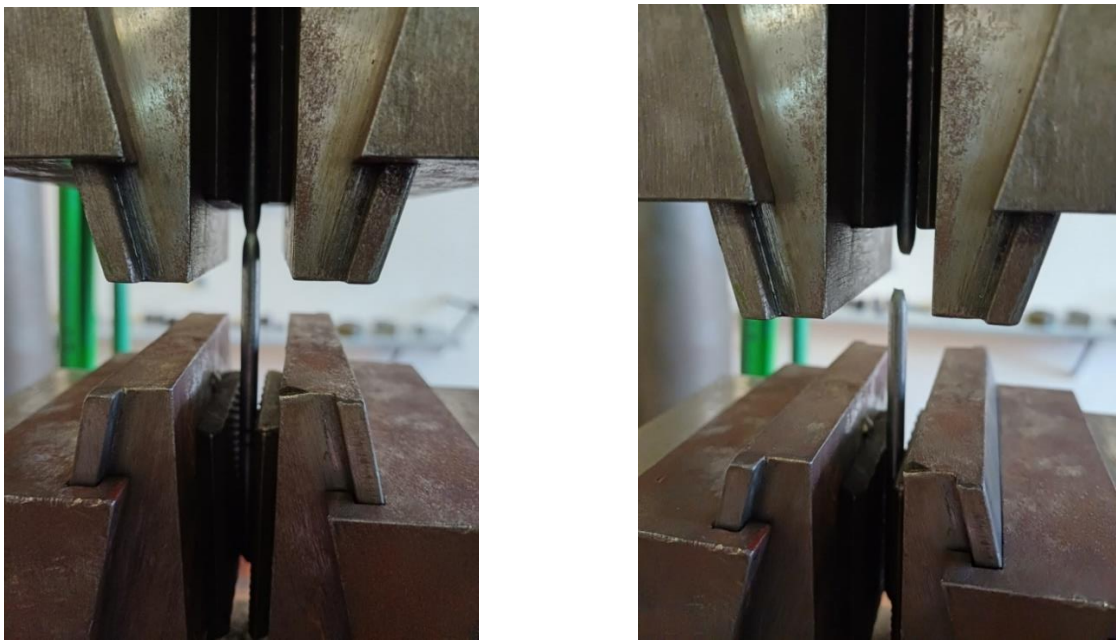


Fig. 7. Destruction of a steel nail:
a – formation of the «neck»; *b* – destruction of the «neck»

Table 4

Mechanical characteristics of steel nails

Nail (nominal diameter – sample No.)	Conventional yield strength Su, MPa	Conventional yield strength (average), MPa	Tensile strength Sv, MPa	Tensile strength (average), MPa	Elongation, mm (%)	Elongation (average), mm (%)
4.2 – 1	636	629	700	692	2.9 (7.3)	3.0 (7.5)
4.2 – 1	631		692		3.5 (8.8)	
4.2 – 1	619		684		2.5 (6.3)	
5.0 – 1	463	457	524	524	3.3 (6.6)	4.2 (8.4)
5.0 – 1	424		509		4.7 (9.4)	
5.0 – 1	483		540		4.5 (9.0)	
5.5 – 1	564	564	610	615	3.3 (6.0)	3.4 (6.2)
5.5 – 1	563		619		3.6 (6.5)	
5.5 – 1	566		615		3.3 (6.0)	
6.0 – 1	430	447	488	499	6.6 (11.0)	7.6 (12.7)
6.0 – 1	458		506		8.3 (13.8)	
6.0 – 1	453		502		7.9 (13.2)	
7.0 – 1	601	594	660	648	6.3 (9.0)	6.3 (9.0)
7.0 – 1	587		644		6.5 (9.3)	
7.0 – 1	595		639		6.1 (8.7)	

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

Based on the obtained mechanical strength characteristics of steel, the «characteristic values of the bending moment of plastic deformation» can be calculated for the design of nodal joints using expression (1). They are given in Table 6 for the yield strength and tensile strength separately.

Table 6

Characteristic values of the bending moment of plastic deformation

Nominal nail diameter, mm	Characteristic values of bending moment, N·mm	
	by yield strength	by tensile strength
4.2	7 874	8 663
5.0	9 002	10 322
5.5	14 235	15 522
6.0	14 146	15 791
7.0	28 065	30 616

In accordance with the current standard in Ukraine [1], «characteristic values of the bending moment of plastic deformation» should be used in the future to determine the characteristic bearing capacity of nailed joint fasteners.

Originality and practical value

Based on the laboratory experimental studies of nail steels for nodal joints of wooden structure elements, we obtained the diagrams of steel performance (Figs. 5 and 6). Samples of nails of five diameters in the range of 4–7 mm were tested. For all cases, the diagram has the same type of appearance typical of high-strength steels and is close to the classical form of diagrams for such steels. The diagrams themselves were generated automatically using the applied load control system built into the laboratory setup.

The resulting diagram clearly shows the presence of 5 sections (Figs. 5 and 6). Section 1 is associated with the peculiarities of the gripper operation in the test setup, when gaps are selected and samples are «accommodated» for wire samples. In this section, we observed quite significant deformations, which were not only partially related to the deformation of the steel itself. Therefore, such deformations were not taken into account in the further processing of the experimental results.

Section 2 of the diagrams is characterised by purely elastic steel behaviour. At the same time, this section smoothly transits into section 3, which is characterised by the phenomenon of steel hardening after plastic deformation. The highest point on the diagram corresponds to the tensile strength of the steel and was specifically recorded by the measuring system during the tests. In section 4 of the diagram, the formation of a «neck» was observed during the tests, in which the samples subsequently fractured (Fig. 7). Section 5 does not have a separate physical content and was «completed» by the measuring unit in automatic mode.

The quantitative mechanical characteristics of nail steels obtained during the experimental studies (Table 4) include two strength indicators – yield strength and tensile strength, as well as one deformability indicator – longitudinal percent elongation. It was found that the test results for different nail samples from the same batch are quite stable. The quantitative results differ by up to 7%, which corresponds to a low value of the coefficient of variation (Table 5). No gross errors were detected during the experimental studies, which indicates the high quality of the material from which the steel nails are made.

The steel strength values allow us to characterise the steels as high-strength steels, which coincides with the nature of the obtained performance diagrams. At the same time, the ratio of the yield strength to the tensile strength for the samples presented in Table 7 and for all samples exceeds 0.8, which is also typical for high-strength steels. To more accurately determine the grade of steel in practice, it is necessary to additionally perform a chemical analysis of the steel, however, for the design of nodal nail connections of wooden structures, such information is not required and therefore was not established in the course of these studies.

In accordance with the Ukrainian standard [2], based on the obtained results, it is possible to tentatively determine the strength class of steel (Table 8). As can be seen, in all cases, the steel characteristics do not correspond to St1–St3 steels (Table 2), which are used to manufacture nails in domestic practice. Therefore, this further supports the need for special laboratory tests to determine the characteristics of nail steels.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

Table 7

Ratio of strength characteristics of steels

Nominal nail diameter, mm	Ratio	Approximate strength class of steel
4.2	0.91	C500
5.0	0.87	C390
5.5	0.92	C500
6.0	0.90	C390
7.0	0.92	C500

Conclusions

1. In recent years, nailed connections have been increasingly used to create building structures made of wood. In this case, nails made of high-quality steels are applied, which provide improved reliability and durability of such connections. To determine the load-bearing capacity of the connections, it is necessary to take into account the mechanical characteristics of the steel. Given the lack of uniform standards in the world practice for nail steels, it is necessary to conduct special laboratory tests to determine the type of steel and its main characteristics. In this study, we focused on the analysis of nails manufactured by ExpertFix (Denmark). This company enjoys the well-deserved trust of consumers around the world due to its price-quality ratio.

2. Experimental laboratory tests on tensile strength of nail samples with a diameter of 4–7 mm allowed us to obtain a diagram of steel performance under load. It is qualitatively close to the classical diagram of high-strength steel. Fracture of the samples was recorded according to the visco-plastic scheme with the formation of a characteristic «neck» at the fracture point.

3. The main mechanical properties for all nail diameters under consideration are in the following ranges:

– conventional yield strength – 450–630 MPa;
– tensile strength – 500–700 MPa;
– absolute elongation – 3–8 mm;
– percent elongation – 6–13%.

The average coefficient of variation of the experimental results obtained is 5%, which indicates the high quality of the manufacturer's steels.

4. The obtained steel characteristics correspond to high-strength steels of classes C390–C500 in accordance with Ukrainian standards. Since the current Ukrainian methodology for the design of nailed joints is focused on steels of ordinary strength, it requires certain adjustments and clarifications to reproduce the correct behaviour of nails made of high-strength steels.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. *ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення*. [Чинний від 2018-02-01]. Київ : Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2018. 111 с.
2. *ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1.* [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2022. 220 с.
3. *ДСТУ 4028:2008. Цвяхи будівельні. Конструкція та розміри.* [Чинний від 2009-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. 3 с.
4. *ДСТУ 8539:2015. Прокат для будівельних сталевих конструкцій*. [Чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 20 с.
5. *ДСТУ EN ISO 6892-1:2022. Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури.* [Чинний від 2023-12-31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 70 с.
6. *ДСТУ EN ISO 7500-1:2017. Матеріали металеві. Калібрування та повірка машин для статичних одновісних випробувань. Частина 1. Випробувальні машини на розтягування та стиснення. Калібрування та повірка силовимірювальних систем*. [Чинний від 2017-10-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 28 с.
7. Цапко Ю. В., Бондаренко О. П., Цапко О. Ю., Горбачова О. Ю., Мазурчук С. М., Жеребчук Д. С. Дослідження вогнестійких властивостей плит з деревної шерсті. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. Ч. 1, Вип. 51. С. 206–217. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).206-217
8. Bannikov D., Tiutkin O., Hezentsvei Y., Muntian A. Controlling the dynamic characteristics of steel bunker containers for bulk materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1348, Iss. 1. Art. 012002. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012002
9. Bannikov D. O. Analysis of the causes of accidents of steel capacitive structures for bulk materials. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. Vol. 3, № 5. P. 243–249.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

10. Bannikov D. O., Radkevich A. V., Nikiforova N. A. Features of the design of steel frame structures in India for seismic areas. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 348–354. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.348
11. Bruno R., Bevilacqua P., Cuconati T., Arcuri N. Energy evaluations of an innovative multi-storey wooden near Zero Energy Building designed for Mediterranean areas. *Applied Energy*. 2019. Vol. 238. P. 929–941. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.035
12. DIN 1151. Round plate head and countersunk wire nails. Berlin, 2003. 7 p.
13. Ganjali H., Tong F., Tannert Th. Biaxial Resistance of Pre-Engineered Beam Hangers in Glulam. *Buildings*. 2025. Vol. 15, Iss. 3. P. 440. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15030440
14. Hezentsvei Y., Bannikov D. Effectiveness evaluation of steel strength improvement for pyramidal-prismatic bunkers. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. No. 2. P. 30–38. DOI: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001146
15. Kossakowski P. G. New advances in strengthening of structural timber. *Materials*. 2024. Vol. 17, Iss. 11. Art. 2545. DOI: https://doi.org/10.3390/ma17112545
16. Li Z., Kitamori A., Zhang X., Wu Ya., Zhang L., Xue J. Analytical investigation on the rotational behavior of dovetail mortise–tenon joints between beams and columns in traditional Chinese timber frames. *Journal of Wood Science*. 2024. Vol. 70, Iss. 1. Art. 50. DOI: https://doi.org/10.1186/s10086-024-02162-0
17. Premrov M., Leskovar V. Ž. Innovative structural systems for timber buildings: a comprehensive review of contemporary solutions. *Buildings*. 2023. Vol. 13, Iss. 7. P. 1820. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13071820
18. Salamah H., Lee S. H., Kang Th. H.-K. Investigation of design methods in calculating the load-carrying capacity of mortise-tenon joint of timber structure. *Earthquakes and Structures*. 2023. Vol. 25, Iss. 5. P. 307–323. DOI: https://doi.org/10.12989/eas.2023.25.5.307
19. Strand R. D., Log T. A cold climate wooden home and conflagration danger index: justification and practicability for Norwegian conditions. *Fire*. 2023. Vol. 6, Iss. 10. P. 377. DOI: https://doi.org/10.3390/fire6100377
20. Xu Q., Zou H., Wang Z., He Yu., Qi L., Wang J. Modal testing and analysis of high-rise laminated timber building. *BioResources*. 2024. Vol. 19, Iss. 4. P. 9616–9630. DOI: https://doi.org/10.15376/biores.19.4.9616-9630

Д. О. БАННІКОВ[1*], І. М. БАКАН[2]

[1*]Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679
[2]ТОВ «Сучасна будівельна компанія-груп», вул. Героїв України, 36, кв. 18, Кропивницький, Україна, 25031, тел. +38 (067) 436 91 21, ел. пошта sbc.group.ua@gmail.com, ORCID 0009-0008-4279-9793

Експериментальна оцінка міцності та деформативності сталевих цвяхів для дерев’яних конструкцій

Мета. Метою даної публікації є обговоренні проведених експериментальних досліджень з визначення в лабораторних умовах характеристик сталі цвяхів однієї з найбільш поширених на сучасному будівельному ринку України компаній – ExpertFix (Данія). **Методика.** Для досягнення мети були проведені випробування на розтяг для цвяхів класичного круглого поперечного перерізу 5 діаметрів в діапазоні від 4 до 7 мм, виготовлених за стандартом Німеччини. **Результати.** За результатами дослідження були побудовані діаграми роботи сталі цвяхів під навантаженням, які виявились дуже наближеними до класичної діаграми роботи високоміцної сталі. Руйнування зразків відбувалось за в’язко-пластичною схемою з утворенням характерної «шийки» в місці розриву. Зафіксований рівень міцності становить від 450 до 700 МПа при відносній деформації до 13 %. **Наукова новизна.** Отримані показники відповідають високоміцним сталям класів С390–С500 за стандартом України, проте не відповідають сталям марок Ст1–Ст3, для яких розроблено чинні теоретичні підходи щодо проєктування вузлових з’єднань. Тому застосування в практиці подібних цвяхових виробів потребує коригування та уточнення існуючих підходів та методик їх використання в дерев’яних конструкціях, що в свою чергу потребує активізації наукових досліджень в цьому напрямку. **Практична значимість.** Практичне використання характеристик міцності сталевих цвяхів, отриманих під час експериментальних досліджень, дозволяє коректно та обґрунтовано проектувати вузлові з'єд-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

нання дерев'яних конструкцій на основі чинного українського стандарту. Це також створює основу для розробки більш досконалих розрахункових підходів для оцінки їхньої працездатності.

Ключові слова: дерев'яні конструкції; вузлові з'єднання; цвях; сталь; механічні характеристики сталі

REFERENCES

1. *Derevjani konstruktsii. Osnovni pologenija, 111 DBN V.2.6-161:2017*. (2018). (in Ukrainian)
2. *Stalevi konstruktsii. Normi proektuvannja, 220 DBN V.2.6-198:2014*. (2022). (in Ukrainian)
3. *Tsviakhy budivelni. Konstruktsiia ta rozmiry, 3 DCTU 4028:2008*. (2008). (in Ukrainian)
4. *Prokat dlia budivelnykh stalevykh konstruktsii, 20 DSTU 8539:2015*. (2016). (in Ukrainian)
5. *Metalevi materialy. Vyprobuvannia na roztiahuvannia. Chastyna 1. Metod vyprobuvannia za kimnatnoi temperatury, 70. DSTU EN ISO 6892-1:2022*. (2023). (in Ukrainian)
6. *Materiali metalevi. Kalibruvannja ta povirka mashin dlja statichnih odnovisnih viprobuvan. Chastina 1. Viprobuvalni mashini na roztjaguvannja I stusnennja. Kalibruvannja ta povirka silobimirjubalnih system, 28 DSTU EN ISO 7500-1:2017*. (2017). (in Ukrainian)
7. Tsapko, Yu., Bondarenko, O., Tsapko, O., Gorbachova, A., Mazurchuk, S., & Zherebchuk, D. (2023). Functional assignment of technological accessories for woodworking. *Ways to Improve Construction Efficiency, 1*(51), 206-217. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).206-217 (in Ukrainian)
8. Bannikov, D., Tiutkin, O., Hezentsvei, Y., & Muntian, A. (2024). Controlling the dynamic characteristics of steel bunker containers for bulk materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1348*(1), 012002. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012002 (in English)
9. Bannikov, D. O. (2011). Analysis of the causes of accidents of steel capacitive structures for bulk materials. *Metallurgical and Mining Industry, 3*(5), 243-249 (in English)
10. Bannikov, D. O., Radkevich, A. V., & Nikiforova, N. A. (2019). Features of the design of steel frame structures in India for seismic areas. *Materials Science Forum, 968*, 348-354. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.348 (in English)
11. Bruno, R., Bevilacqua, P., Cuconati, T. & Arcuri, N. (2019). Energy evaluations of an innovative multistorey wooden near Zero Energy Building designed for Mediterranean areas. *Applied Energy, 238*, 929-941. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.035 (in English)
12. *Round plate head and countersunk wire nails, 7 DIN 1151*. (2003). (in Ukrainian)
13. Ganjali, H., Tong, F. & Tannert, Th. (2025). Biaxial Resistance of Pre-Engineered Beam Hangers in Glulam. *Buildings, 15*(3), 440. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15030440 (in English)
14. Hezentsvei, Y., & Bannikov, D. (2020). Effectiveness evaluation of steel strength improvement for pyramidal-prismatic bunkers. *EUREKA: Physics and Engineering, (2)*, 30-38.
DOI: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001146 (in English)
15. Kossakowski, P. G. (2024). New advances in strengthening of structural timber. *Materials, 17*(11), 2545. DOI: https://doi.org/10.3390/ma17112545 (in English)
16. Li, Z., Kitamori, A., Zhang, X., Wu, Ya., Zhang, L., & Xue, J. (2024). Analytical investigation on the rotational behavior of dovetail mortise–tenon joints between beams and columns in traditional Chinese timber frames. *Journal of Wood Science, 70*(1), 50. DOI: https://doi.org/10.1186/s10086-024-02162-0 (in English)
17. Premrov, M., & Leskovar, V. Ž. (2023). Innovative structural systems for timber buildings: a comprehensive review of contemporary solutions. *Buildings, 13*(7), 1820. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13071820 (in English)
18. Salamah, H., Lee, S. H., & Kang, Th. H.-K. (2023). Investigation of design methods in calculating the load- carrying capacity of mortise-tenon joint of timber structure. *Earthquakes and Structures, 25*(5), 307-323. DOI: https://doi.org/10.12989/eas.2023.25.5.307 (in English)
19. Strand, R. D., & Log, T. (2023). A cold climate wooden home and conflagration danger index: justification and practi- cability for Norwegian conditions. *Fire, 6*(10), 377. DOI: https://doi.org/10.3390/fire6100377 (in English)
20. Xu, Q., Zou, H., Wang, Z., He, Yu., Qi, L., & Wang, J. (2024). Modal testing and analysis of high-rise laminated timber building. *BioResources, 19*(4), 9616-9630. DOI: https://doi.org/10.15376/biores.19.4.9616-9630 (in English)

Надійшла до редколегії: 24.11.2025
Дата рецензування: 23.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353813
© D. O. Bannikov, I. M. Bakan, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

UDC 624:[744.4:004.92]

H. P. IVANOVA[1*], V. V. YANKO[2*], N. V. KHOZIAIKINA[3*]

[1*]Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 45 29 945, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916
[2*]Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 73 24 674, e-mail yanko.v.v@nmu.one, ORCID 0000-0003-1025-3047
[3*]Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 15 75 495, e-mail khoziaikina.n.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-4747-3919

Epistemological Ambiguity of Graphic Information in Construction and Drawing and its Impact on the Process of Designing and Implementing Construction Projects

Purpose. The purpose of this study is a systematic analysis of the nature of graphical ambiguity, the identification of its sources and manifestations, and the outlining of possible ways to minimize it. **Methodology.** The research employs an interdisciplinary approach that combines methods of epistemological analysis, visual semiotics, architectural graphics, and engineering communication. Within the study, a number of applied graphical models were developed representing typical sources of ambiguity. The method of comparative interpretation of graphic scenarios was applied to demonstrate the impact of ambiguous reading of drawings on the process of designing and implementing construction objects and structures. **Findings.** It was established that the epistemological ambiguity of graphical information arises from the interaction of several factors: the conventional nature of graphic symbols, the abstract character of drawings as models, differences in the professional competence of interpreters, and incomplete standardization and updating of documentation. It was also found that the use of BIM models and multimodal means of representation (2D + 3D + text) significantly reduces risks, although it does not completely eliminate ambiguity. **Originality.** The novelty of the study lies in a comprehensive investigation of epistemological ambiguity in the field of construction drawings from the perspectives of cognitive semiotics and architectural epistemology. The limitations of traditional standardization are identified, and the need to expand approaches to graphical communication in the context of contemporary digital architecture is substantiated. **Practical value.** The results can be applied in the professional training of architects, design engineers, and construction practitioners. The proposed recommendations on the use of multimodal information presentation tools (including BIM) can be integrated into internal regulations of architectural and construction companies in order to reduce errors and improve the quality of project implementation.

Keywords: graphical information; construction drawing; architectural drawing; epistemology; ambiguity; visual communication; design of construction projects; standardization; design; BIM

Introduction

Graphic drawing is the primary means of knowledge communication in architectural and construction design. However, it is not a neutral or unambiguous carrier of information: due to conventional symbols, projections, standards, as well as cultural, cognitive, and contextual factors, epistemological ambiguity arises – namely, uncertainty in how graphical information is interpreted. This paper analyzes the nature of this ambiguity, its sources and manifestations, and its potential consequences for the design and realization of construction projects. Based on contemporary research (in particular in design theory and architectural epistemology), ways of minimizing the risks associated with ambiguous interpretation are discussed, including standardization, multimodal representations (text, specifications, 3D/BIM), and the development of professional competencies. The paper concludes with findings and proposals for further research.

Construction and architectural drawings are not merely technical tools but also a means of conveying knowledge about a future structure: its form, structural system, spatial relationships between elements, engineering joints, functional connections, materials, and technologies. At the same time, a drawing is a model – a projection, a conditional representation – that cannot fully convey the

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353408
© H. P. Ivanova, V. V. Yanko, N. V. Khoziaikina, 2026

entire complexity of an object, including its behavior over time, material properties, installation nuances, workmanship quality, and operational context.

From the perspective of epistemology, a graphic solution functions as a sign system with its own syntax (lines, hatching, scale, symbols), semantics (what a given symbol denotes), and pragmatics (how it is interpreted by a person). However, this system does not guarantee unambiguous understanding. Interpretation may depend on experience, context, cultural or professional standards, and on the subject who reads the drawing.

Therefore, in the process of design and construction, a scientific and practical problem arises: the epistemological ambiguity of graphical information, which can lead to errors, inconsistencies, misunderstandings, and ultimately to technical, organizational, or even safety-related risks.

Purpose

The purpose of this study is to conduct a systematic analysis of the epistemological nature of graphical ambiguity in the field of construction drawing as a specific form of visual knowledge functioning within architectural and engineering design.

Methodology

The study employs an interdisciplinary approach combining methods of epistemological analysis, visual semiotics, architectural graphics, and engineering communication. A qualitative analysis of sources examining the role of drawings as a form of knowledge and a sign system was conducted. Within the framework of the research, a series of applied graphical models were developed (a connection joint, a duct system in BIM, and a pipeline–beam conflict) representing typical sources of ambiguity. A method of comparative interpretation of graphical scenarios was applied to demonstrate the impact of ambiguous reading of drawings on the design and implementation of construction projects.

Findings

A graphic drawing is not merely a technical document but a complex form of representing knowledge about a future object. As a conditional model, it is unable to fully encompass all properties of a structure, including material behavior, technological nuances, and interaction with the environment. This limitation and conventionality give rise to potential ambiguity in perception. Within the construction process, a drawing acts as a mediator between the idea and its realization, between the design concept and the objectified form that materializes in space.

According to study [8], a drawing is not only a representation but also a form of thinking – an instrument of intellectual activity that enables reflection, clarification, and conceptualization of a future building. Study [9] adds that graphical elements are polysemic in nature and therefore always carry the risk of ambiguous interpretation. The graphical information embedded in a drawing is subject to interpretation depending on professional experience, level of training, context, and even the language used by specialists.

Study [10] emphasizes a profound gap between the abstraction embodied in a drawing and its actual materialization in a building. This gap inevitably generates a zone of uncertainty in which information is transformed under the influence of numerous variables. A drawing does not fix the object but presents it as a conditional system of coordinates, signs, proportions, and symbols that require shared interpretation and understanding.

Among the sources of ambiguity in graphical information, several key categories can be distinguished. First, there is the polysemy of graphical elements, where the same line or symbol may have different meanings depending on context, drawing scale, standards, and traditions within a particular architectural environment. For example, (Fig. 1) illustrates a beam-to-column connection joint in which different types of hatching (according to various DBN or ISO standards) may denote timber or lightweight concrete, depending on the regional standard. Second, there are the limitations of conventional symbols – for instance, hatching or symbols do not always fully describe complex engineering joints or technological operations.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353408
© H. P. Ivanova, V. V. Yanko, N. V. Khoziaikina, 2026

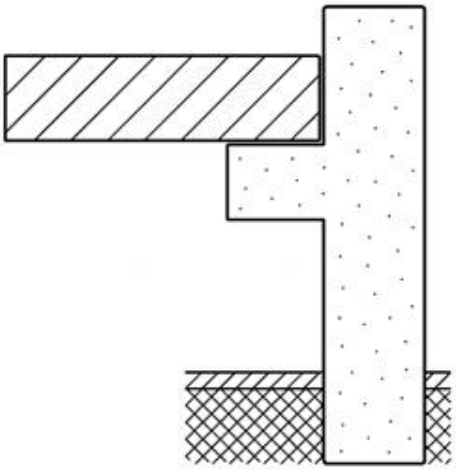


Fig. 1. Beam-column connection node

Fig. 2 presents different representations of the same ventilation duct: in a floor plan, in a section, and in a 3D BIM model, demonstrating how part of the information is lost when transitioning to 2D.

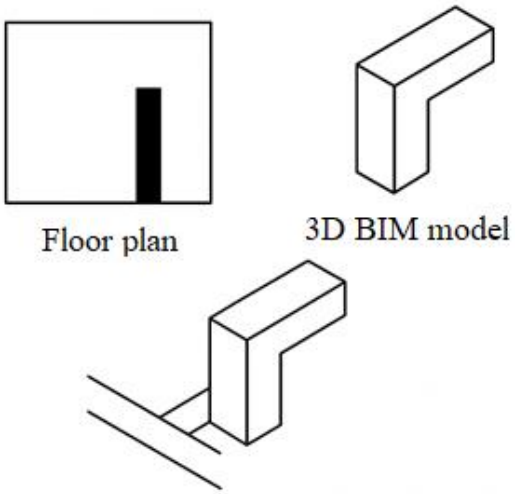


Fig. 2. Different methods of representing a ventilation duct: 2D plan, 3D BIM model

Third, there is a gap between the drawing and actual construction: the design is modified, supplemented, and refined, while the drawings sometimes do not reflect the latest updates. An example is a situation in which an installation crew routed a pipeline according to a previous version of the drawing, without considering clarifications introduced in the latest revision. This resulted in a conflict with a reinforced concrete beam that had not been accounted for in the earlier version (Fig. 3).

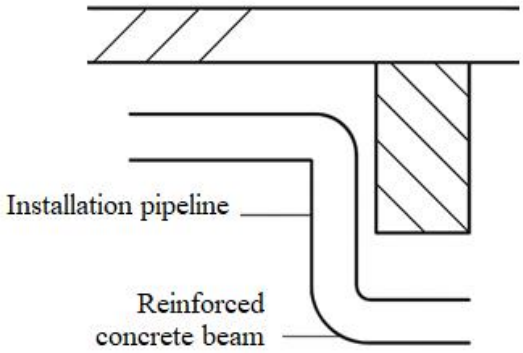


Fig. 3. Intersection of an installation pipeline with a reinforced concrete beam

In addition, the human factor cannot be ignored: differences in experience, knowledge, education, and even linguistic environment (for example, within international teams) lead to ambiguities in the perception of drawings. In some cases, elements of a drawing are interpreted differently by an engineer and a construction worker, creating risks of errors or incorrect execution. Technical changes or operational revisions are also not always immediately reflected in drawings, which contribute to the loss or distortion of information.

Such sources of ambiguity have serious consequences [3–7]. They may lead to technical errors – for example, the installation of structures in incorrect positions, improper use of materials, or noncompliance of the executed work with design requirements. At the organizational level, communication failures may arise between the client, the designer, and the contractor. This can result in additional costs, delays, and legal disputes regarding compliance of the facility with the documentation.

However, not all ambiguity is negative. In the design process, uncertainty can be productive, stimulating creative exploration, alternative solutions, and reflective engineering. The problem arises when such uncertainties are not regulated, controlled, or adequately explained in the final documentation.

The minimization of epistemological ambiguity is possible through several key approaches. First and foremost is standardization: the use of generally accepted drawing standards (DBN, ISO), unification of symbols, and common requirements for scales, projections, fonts, and related elements. Next are multimodal representation tools: textual

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353408
© H. P. Ivanova, V. V. Yanko, N. V. Khoziaikina, 2026

explanations, tables, specifications, BIM models, and 3D visualizations. These helps compensate for the limitations of purely graphical representation by enhancing contextual understanding.

Equally important is the training of professionals: education, training programs, and continuing professional development focused on reading and interpreting drawings, familiarity with new standards, digital platforms, and modeling tools. Particularly relevant is the development of skills for critical reading of graphical information, the ability to identify potential zones of ambiguity, and the timely coordination of these issues with other participants in the process. As noted in [1], the importance of competent drafting and the ability to correctly interpret graphical data underscores the significance of "graphical literacy" which is directly related to the issue of ambiguity.

New technologies play a dual role: on the one hand, they reduce uncertainty (for example, through BIM, interactive models, and clash detection); on the other hand, they create new challenges (different software environments, file formats, incompatibilities, and the need for IT competencies). A systemic approach to their implementation is required, involving coordinated collaboration among all participants, a shared digital platform, and transparent procedures for project changes.

Despite the outlined strategies [2], the complete elimination of epistemological ambiguity is hardly possible. It is part of a deeper cognitive process related to how we think, imagine, represent, and construct space. Therefore, the goal is not to eliminate ambiguity, but to critically reflect on it, manage it, and integrate it into engineering culture.

Graphic drawing is a complex sign system whose interpretation depends on many variables. Epistemological ambiguity is an inherent feature of drawings that requires not elimination, but understanding and management. Raising standards, developing graphical literacy, and integrating digital tools are the main strategies for minimizing risks. Further research should focus on empirical case studies and regulatory frameworks. Equally important is the study of the role of ambiguity as a resource for innovation in design and its impact on the quality of the architectural environment.

Originality and practical value

The scientific novelty of the study lies in a comprehensive interdisciplinary approach to examining the phenomenon of epistemological ambiguity in construction drawing, integrating the theoretical foundations of cognitive semiotics, architectural epistemology, and visual communication.

A systematic investigation of the factors that give rise to ambiguity in the interpretation of graphical information during the design and realization of construction projects has been carried out. A typological classification of sources of graphical ambiguity is proposed, including lexical (polysemy of signs), syntactic (differences in standards, scales, and projection systems), pragmatic (the human factor), and procedural (the gap between drawing versions and actual project changes).

An innovative aspect of the research is the development and implementation of graphical illustrations that visually represent the most common scenarios of ambiguity at the stages of reading, transmitting, and executing drawings. These illustrations not only strengthen the theoretical framework of the study but also have applied value in education and architectural modeling practice.

In addition, the paper substantiates the limitations of traditional approaches to drawing standardization (DBN, ISO) in the context of the increasing complexity of digital projects. The necessity of transforming the concept of graphical communication – from linear data transmission to multimodal interaction incorporating 3D, BIM, textual, and analytical components – is argued. This approach opens prospects for rethinking the role of drawing within the system of architectural knowledge as a flexible yet critically controlled instrument of design thinking.

Conclusions

Graphic drawing in the fields of architecture and construction functions not only as a technical tool for recording design decisions, but also as a sign system operating within a complex process of communication and knowledge transfer. Its interpretation depends on numerous variables, including the level of professional training of project participants, compliance with standards, the con-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353408
© H. P. Ivanova, V. V. Yanko, N. V. Khoziaikina, 2026

text of use, and the technological environment in which it is created and applied.

The conducted analysis demonstrates that epistemological ambiguity is not an accidental malfunction of the system of graphical communication, but an inherent characteristic of it. This ambiguity cannot be completely eliminated due to the abstract nature of drawings, their limitations as models of reality, and their dependence on subjective interpretation. At the same time, it can be systematically managed through institutional, educational, and technological mechanisms.

Key strategies for minimizing risks caused by ambiguity in graphical information include:

– increasing the level of standardization of graphical representation based on international and national norms (DBN, ISO, BIM protocols);

– developing graphical literacy among professionals, particularly the formation of critical thinking when reading drawings and the ability to identify and reconcile interpretative discrepancies;

– integrating digital tools – such as Building Information Modeling (BIM), 3D visualization, and interactive drawings – as means of reducing abstraction and enhancing the contextual richness of graphical information.

Particular attention should be paid to the study of empirical cases – real examples of technical errors, design conflicts, or legal disputes caused by ambiguity in graphical documentation. Such empirical material should form the basis for the further development of methodological recommendations, educational standards, and, where necessary, changes in the regulatory framework.

Overall, the proposed approach is aimed at rethinking architectural drawing as a living, dynamic, and context-dependent form of knowledge that requires not only precision in execution but also a deep understanding of its epistemological nature by all participants in the construction process.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Голіяд І. С., Тропіна М. А. Важливість володіння навичками креслення в процесі відновлення інфраструктури та розвитку економіки після війни. *Grail of Science*. 2023. № 30. С. 274–279. DOI: https://doi.org/10.36074/grail-of-science.04.08.2023.044
2. Крамаренко М. О., Колеснікова Н. Ю. *Методика наукових досліджень в архітектурі* : метод. вказ. до вик. курсової роб. Одеса : ОДАБА, 2019. 36 с. URL: https://odaba.edu.ua/upload/files/Metodika_naukovih_doslidzhen_v_arhitekturi.pdf
3. Darses F., Wolff M. Design as an epistemic activity. *Proceedings of the design research society conference*. 2006. URL: https://www.designresearchsociety.org
4. Hawkins R. D., Sano M., Goodman N. D., Fan J. E. Visual resemblance and communicative context constrain the emergence of graphical conventions. *arXiv.org*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.13861
5. Ivanova H. P., Solodyankin O. V., Yanko V. V., Barsukova S. O. Assessing the influence of local corrosion in the joints of components on the life of multielement rod structures. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 22. P. 93–99. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268406
6. Ivanova H. P., Radkevych A. V., Olishevska S. O., Ma T. Assessment of the Impact of Operating Conditionson the Reliability of Bar-Type Steel Structures. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2025. № 27. С. 62–69. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333654
7. Linzey M. Architectural Drawings do not Represent. *Interstices: Journal of Architecture and Related Arts*. 2010. № 11. P. 31–39. DOI: https://doi.org/10.24135/ijara.v0i0.378
8. Paans O., Pasel R. Drawing as Notational Thinking in Architectural Design. *DRS International Conference 2018*: *Design as a Catalyst for Change*. (Limerick, 25-28 June 2018). DOI: https://doi.org/10.21606/drs.2018.247
9. Romano F. Ambiguous representations: Drawing and its potential misinterpretations. *Diségno: Drawing as Language*. 2025. № 16. P. 127–142. DOI: https://doi.org/10.26375/disegno.16.2025.14
10. Sweeting B. Conversing with drawings and buildings: from abstract to actual in architecture. *Kybernetes*. 2011. Vol. 40, Iss. 7-8. P. 1159–1165. DOI: https://doi.org/10.1108/03684921111160386

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353408
© H. P. Ivanova, V. V. Yanko, N. V. Khoziaikina, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Г. П. ІВАНОВА[1*], В. В. ЯНКО[2*], Н. В. ХОЗЯЙКІНА[3*]

[1*]Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 45 29 945, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916
[2*]Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 73 24 674, ел. пошта yanko.v.v@nmu.one, ORCID 0000-0003-1025-3047
[3*]Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 15 75 495, ел. пошта khoziaikina.n.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-4747-3919

Епістемологічна неоднозначність графічної інформації у будівельному та кресленні та її вплив на процес проєктування та реалізації будівельних об’єктів

Мета. Метою цього дослідження є системний аналіз природи графічної неоднозначності, виявлення її джерел та проявів, а також окреслення можливих шляхів її мінімізації. **Методика.** У дослідженні застосовано міждисциплінарний підхід, що поєднує методи пістемологічного аналізу, візуальної семіотики, архітектурної графіки та інженерної комунікації. В рамках дослідження розроблено низку прикладних графічних моделей, що репрезентують типові джерела неоднозначності. Метод порівняльної інтерпретації графічних сценаріїв застосовано для демонстрації впливу неоднозначного прочитання креслень на процес проектування та реалізації будівельних об'єктів і споруд. **Результати.** Встановлено, що епістемологічна неоднозначність графічної інформації виникає внаслідок взаємодії декількох факторів: умовної природи графічних символів, абстрактного характеру креслень як моделей, відмінностей у професійній компетентності інтерпретаторів, неповної стандартизації та актуалізації документації. Також було виявлено, що використання BIM-моделей та мультимодальних засобів представлення (2D+3D+текст) суттєво знижує ризики, хоча й не усуває повністю неоднозначності. **Наукова новизна.** Новизна дослідження полягає у комплексному дослідженні епістемологічної невизначеності у сфері будівельних креслень з позицій когнітивної семіотики та архітектурної епістемології. Виявлено обмеження традиційної стандартизації та обґрунтовано необхідність розширення підходів до графічної комунікації в контексті сучасної цифрової архітектури. **Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути застосовані у професійній підготовці архітекторів, інженерів-проектувальників та будівельників-практиків. Запропоновані рекомендації щодо використання мультимодальних засобів представлення інформації (зокрема BIM) можуть бути інтегровані у внутрішні регламенти архітектурно-будівельних компаній з метою зменшення кількості помилок та підвищення якості реалізації проектів.

Ключові слова: графічна інформація; будівельне креслення; архітектурне креслення; епістемологія; неоднозначність; візуальна комунікація; проектування будівельних об'єктів; стандартизація; дизайн; BIM

REFERENCES

1. Holiiad, I. S., & Tropina, M. A. (2023). Vazhlyvist volodinnia navychkamy kreslennia v protsesi vidnovlennia infrastruktury ta rozvytku ekonomiky pislia viiny. *Grail of Science*, *30*, 274-279. DOI: https://doi.org/10.36074/grail-of-science.04.08.2023.044 (in Ukrainian)
2. Kramarenko, M. O., & Kolesnikova, N. Yu. (2019). *Metodyka naukovykh doslidzhen v arkhitekturi*. Odesa, Ukraine: ODABA. Retrieved from https://odaba.edu.ua/upload/files/Metodika_naukovih_doslidzhen_v_arhitekturi.pdf (in Ukrainian)
3. Darses, F., & Wolff, M. (2006). Design as an epistemic activity. *Proceedings of the design research society conference*. Retrieved from https://www.designresearchsociety.org (in English)
4. Hawkins, R. D., Sano, M., Goodman, N. D., & Fan, J. E. (2021). Visual resemblance and communicative context constrain the emergence of graphical conventions. *arXiv.org*. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.13861 (in English)
5. Ivanova, H. P., Solodyankin, O. V., Yanko, V. V., & Barsukova, S. O. (2022). Assessing the influence of local corrosion in the joints of components on the life of multielement rod structures. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, *22*, 93-99. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268406 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353408
© H. P. Ivanova, V. V. Yanko, N. V. Khoziaikina, 2026

6. Ivanova, H. P., Radkevych, A. V., Olishevska, S. O., & Ma, T. (2025). Assessment of the Impact of Operating Conditions on the Reliability of Bar-Type Steel Structures. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice, 27*, 62-69. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333654 (in English)
7. Linzey, M. (2010). Architectural Drawings do not Represent. *Interstices: Journal of Architecture and Related Arts, 11*, 31-39. DOI: https://doi.org/10.24135/ijara.v0i0.378 (in English)
8. Paans, O., & Pasel, R. (2018, June). Drawing as Notational Thinking in Architectural Design. *DRS International Conference 2018*: *Design as a Catalyst for Change*. Limerick, Ireland. DOI: https://doi.org/10.21606/drs.2018.247 (in English)
9. Romano, F. (2025). Ambiguous representations: Drawing and its potential misinterpretations. *Diségno: Drawing as Language, 16*, 127-142. DOI: https://doi.org/10.26375/disegno.16.2025.14 (in English)
10. Sweeting, B. (2011). Conversing with drawings and buildings: from abstract to actual in architecture. *Kybernetes, 40*(7-8), 1159-1165. DOI: https://doi.org/10.1108/03684921111160386 (in English)

Received by the editorial board: November 24, 2025
Review date: December 9, 2025
Publication date: March 26, 2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353408
© H. P. Ivanova, V. V. Yanko, N. V. Khoziaikina, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК 624.154:624.138-048.24

В. І. КРИСАН[1], В. В. КРИСАН[2], О. І. ДУБІНЧИК[3*], М. В. МАЗУРЕНКО[4]

[1]ТОВ «Геопротект», вул. Новокримська, 5, кв. 308, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (067) 565 89 69, ел. пошта krysan.v.i@ukr.net, ORCID 0000-0001-7497-4615
[2]ТОВ «Геобуд», вул. Новокримська, 5, кв. 308, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (067) 631 31 22, ел. пошта geobuddnepr@gmail.com, ORCID 0000-0002-9683-7838
[3*]Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 582 14 88, ел. пошта o.i.dubinchyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357
[4]Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (093) 802 47 09, ел. пошта nikitamv94@gmail.com, ORCID 0009-0006-9775-7502

Аналіз результатів лабораторних випробувань пружних властивостей ґрунтоцементу

Мета. Автори ставлять за мету проведення лабораторних випробувань пружних властивостей ґрунтоцементу і аналіз отриманих результатів для обґрунтування фізико-механічних властивостей ґрунтоцементних паль, що застосовуються для підсилення слабкого земляного полотна та ґрунтової основи. **Методика.** Програма лабораторних випробувань полягала в отриманні характеристик ґрунтоцементу та проведенні аналізу отриманих результатів у випадку застосування в якості основи залізничної колії. Під час виконання будівельних робіт були відібрані зразки ґрунтоцементу. Після відбору зразки розрізались спеціальним обладнанням, а місця зрізів шліфувались для забезпечення повного контакту з плитами пресу. Після цього в прилад ущільнення було закладено зразки ґрунтоцементу під навантаженням 0,03 МПа та залишено під ним на 72 години. Навантаження зразків виконувалось ступенями з витримкою до стабілізації не менше 5 хвилин. Випробування опрацьовувалися, аналізувалися та розглядалися в рамках аналізу пружних властивостей. **Результати**. При досягненні тиску 1,12 МПа зразок витримувався 30 хвилин, осадка становила 0,093 мм. Після цього ступенями велось розвантаження до тиску 0,03 МПа зі стабілізацією кожної ступені. Аналіз побудованого графіку свідчить, що залишкова деформація складає 0,03 мм, а сумарна при тиску 1,12 МПа – 0,093 мм. Аналіз побудованого графіку свідчить про наявність петлі гістерезису, що демонструє роботу ґрунтоцементу в пружному режимі. При цьому модуль деформації E на різних ступенях завантаження знаходиться в діапазоні 560…750 МПа. Ґрунтоцемент демонструє стабільні пружні властивості, що робить його ефективним матеріалом для використання в цивільному, промисловому та залізничному будівництві. **Наукова новизна.** В статті на основі результатів лабораторних випробувань ґрунтоцементу остаточно доведено його високі пружні властивості під час дії циклічних навантажень, що моделюють дію рейко-шпальної решітки на баласт та земляне полотно залізниці. **Практична значимість** полягає в отриманні значень модуля пружності ґрунтоцементу, які в подальшому можна застосовувати для практичних розрахунків прогнозування осідань ґрунтових основ.

Ключові слова: ґрунтоцемент; ґрунтоцементні палі; земляне полотно; ґрунтова основа; рейко-шпальна решітка; пружні деформації; циклічні навантаження

Вступ

Залізничний транспорт є основною транспортною мережею для України, тому йому необхідно приділяти максимум уваги, забезпечуючи втілення найбільш передових та економічних зарубіжних і вітчизняних розробок [7, 8]. Практика будівництва неодноразово підтвердила доцільність, економічність та надійність використання ґрунтоцементних паль для підсилення основ фундаментів або в якості самостійних фундаментних конструкцій [5, 6, 11]. Впровадження такого рішення особливо актуальне в умовах складних ґрунтових умов, коли основи представлені просадними, слабкими, насипними ґрунтами та існує необхідність збільшення несучої здатності фундаментів, а також у випадку будівництва в обмеженому просторі.

Однією з ключових задач під час створення ґрунтоцементних паль є визначення характеристик матеріалу [2, 10]. Хоча випробування ґрунтоцементу проводяться сертифікованими лабораторіями, відсутність нормативної бази ускладнює цей процес. Однією з мало вивчених характеристик ґрунтоцементу є його пружність.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351392
© В. І. Крисан, В. В. Крисан, О. І. Дубінчик, М. В. Мазуренко, 2026

В більшості випадків в лабораторних умовах визначається модуль деформації (*E*, МПа), що передбачено нормативною документацією [1]. Розробка нормативної бази для визначення характеристик ґрунтоцементу сприятиме більш ефективному використанню виконаних з нього паль у різних галузях будівництва, зокрема під час спорудження земляного полотна та підсилення ґрунтової основи.

Наразі використовуються лабораторні методи визначення фізико-механічних властивостей, адаптовані як для ґрунтів, так і для бетону, котрі не завжди відображають реальні властивості ґрунтоцементу [2]. Визначення пружності цього геокомпозиту, що поєднує ґрунт основи й цемент, є важливим для прогнозування роботи основ і фундаментів під змінними навантаженнями та аналізу деформацій ґрунтоцементних паль під циклічними навантаженнями, наприклад, поїзними [4, 14].

Використання ґрунтоцементних паль у будівництві та реконструкції залізниць є перспективним напрямком. Це пов’язано з тим, що основа шпально-рейкової конструкції зазнає циклічних навантажень від руху поїздів, а ґрунтоцементні палі можуть забезпечити необхідну стійкість і довговічність земляного полотна і безперебійну роботу рейко-шпальної решітки [7, 9, 13]. Використання ґрунтоцементних паль може знизити вартість будівництва та ремонтних робіт на залізниці.

Використання ґрунтоцементних паль у будівництві демонструє високу надійність та економічну ефективність. Однак, випробувань, присвячених визначенню їхніх фізико-механічних характеристик, недостатньо. Основні роботи в цій галузі виконуються на кафедрі буріння та геології Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» та ТОВ «Геопротект» разом із фахівцями Українського державного університету науки і технологій [2, 3, 9, 10, 15]. Проте навіть ці випробування не повною мірою розкривають залежність пружності ґрунтоцементу від його складу та навантажень.

Існують випробування, які аналізують вплив додавання золи винесення на фізико-механічні характеристики ґрунтоцементу [2]. Зокрема, експериментально визначено оптимальний склад ґрунтоцементу з різним вмістом золи, що дозволяє покращити його властивості. Крім того, моделювання процесу виготовлення та випробування ґрунтоцементних паль з урахуванням ґрунтових умов показало, що додавання пластифікаторів та зміна глибини занурення паль впливають на їхню міцність.

Щодо застосування ґрунтоцементних паль у залізничному транспорті інформація дійсно обмежена. Разом з тим, технологія струминної цементації ґрунтів, яка використовується для створення ґрунтоцементних паль, вважається перспективною для підземного будівництва, включаючи тунелі та інші інфраструктурні об’єкти [5, 6]. Таким чином, необхідні подальші випробування для глибшого розуміння залежності пружності ґрунтоцементу від його складу та навантажень, а також для оцінки можливостей використання ґрунтоцементних паль у будівництві, реконструкції та ремонті об’єктів залізничного транспорту.

Найбільш поширеним способом будівництва залізниць є спорудження котловану, дно якого ущільнюється, після цього укладається шар щебеню, тобто баласт, і ведеться укладка рейко-шпальної решітки. Це доволі затратний спосіб будівництва і його експлуатація потребує значних затрат. Досягти рівномірності щільності по всій довжині та ширині конструкції дуже складно. Тому під час експлуатації втрачається стабільність колії в поздовжньому та поперечному напрямках. Затрати на утримання залізничної колії доволі значні, а на відтинках шляху, де основою баласту є слабкі ґрунти, часто виникає необхідність заміни баласту по причині проникнення в нього ґрунту, що погіршує фізико-механічні характеристики основи.

Більш перспективними є монолітні плитно-рейкові конструкції, бо вони забезпечують стабільність як в горизонтальному, так і вертикальному напрямках [8]. Їхня перевага перед традиційною технологією баластування може бути досягнута під час заміни ґрунтової подушки та баластного щебеневого шару ґрунтоцементними палями.

В межах України зустрічаються прояви багатьох складних інженерно-геологічних умов (лесові просадні ґрунти, зсуви, карсти, суфозія, території підроблювань, пов’язаних із шахтами). За даними АТ «Укрзалізниця» загальна протяжність земляного полотна на залізницях

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351392
© В. І. Крисан, В. В. Крисан, О. І. Дубінчик, М. В. Мазуренко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

України становить більше 21 872 км, і з них схильних до деформації більше 870 км, а це бар'єрні ділянки, де діють обмеження швидкості, що негативно впливає на провізну та пропускну спроможність залізниць. Основною причиною таких явищ є те, що при збільшенні швидкостей та навантажень ґрунт земляного полотна проникає в баластний шар, що зменшує несучу здатність основи. Тому впровадження використання ґрунтоцементних паль буде вирішенням багатьох проблем.

Мета

Метою наукової статті є проведення лабораторних випробувань пружних властивостей ґрунтоцементу і аналіз отриманих результатів для обґрунтування фізико-механічних властивостей ґрунтоцементних паль, що застосовуються для підсилення слабкого земляного полотна та ґрунтової основи.

Методика

Відомо, що під час руху залізничного транспорту при збільшенні швидкості навантаження на ось значно зростає, як і навантаження на ґрунтову основу земляного полотна. Його деформації відбуваються тому, що напружений стан змінюється під впливом низки факторів. Суттєву роль в цьому відіграє дисбаланс мас, нерівномірність прокату, повзуни, наявність стиків, вітрові навантаження на вагони. Також, в залежності від кліматичних умов, значно змінюється вологість ґрунтів основи та самого земляного полотна, що змінює величину прогину залізничної колії.

Ґрунти основи і земляного полотна працюють в специфічному режимі, який полягає в тому, що цикли навантаження та розвантаження чергуються. Крім того, і величини навантаження змінні, оскільки на це впливає значна кількість як природних, так і техногенних факторів. Відповідно, випробування повинно ґрунтуватися на циклічності навантажень.

Для проведення лабораторного випробування відібрані зразки ґрунтоцементу на об'єкті, що, згідно інженерно-геологічних вишукувань, має геологічну будову, наведену на рис. 1.

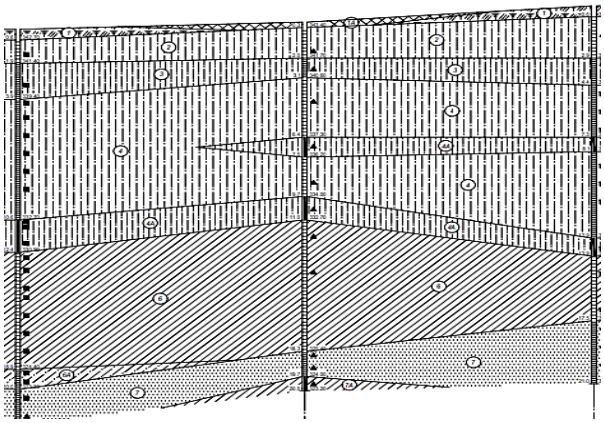


Рис. 1. Інженерно-геологічний переріз ділянки робіт

Fig. 1. Engineering and geological cross-section of the work site

Під час виконання будівельних робіт були відібрані зразки ґрунтоцементу. Маса витікала з гирла свердловини при перебурюванні інтервалу ґрунту ІГЕ–2 – ІГЕ–3. Відмінністю випробування є те, що маса ґрунтоцементу пакувалась в круглі поліетиленові ємності та в такому вигляді зберігалась впродовж двох років. Зберігання проходило в складі, де було відсутнє опалення та не було регулювання вологості. До настання морозів від часу формування зразків пройшло більше 60 днів. Після цього зразки розрізались спеціальним обладнанням, а місця зрізів шліфувались для забезпечення повного контакту з плитами пресу. Для випробувань підготовлені зразки діаметром 100 мм, висотою 80 мм та щільністю 1,41 г/см^3.

Основою ґрунтоцементу був суглинок важкий пилуватий, напівтвердий, лесовий, просадний та суглинок легкий пилуватий, твердий, лесовий, просадний, характеристики яких, як і інших ґрунтів, наведено в табл. 1.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351392
© В. І. Крисан, В. В. Крисан, О. І. Дубінчик, М. В. Мазуренко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Table 1

Physical and mechanical characteristics of soils

Назва ІГЕ	Назва ґрунту	Щільність ρ, г/см^3	Модуль деформації E, МПа	Кут внутрішнього тертя φ, град	Зчеплення C, кПа
ІГЕ–1А	Рослинний шар: суглинок легкий пилуватий, слабо гумусований (відносний вміст органічної речовини I_r = 0,025), з корінням рослин	–	–	–	–
ІГЕ–1	Рослинний шар: суглинок легкий пилуватий, слабо гумусований (відносний вміст органічної речовини I_r = 0,025), з корінням рослин	–	–	–	–
ІГЕ–2	Суглинок важкий пилуватий, напівтвердий, лесовий, просадний, з карбонатними стяжіннями, жовто-палевий	1,36	3…7	13	10
ІГЕ–3	Суглинок легкий пилуватий, твердий, лесовий, просадний, з карбонатними стяжіннями, бурий, жовто-бурий;	1,34	6…12	14	14
ІГЕ–4	Суглинок легкий пилуватий, твердий та напівтвердий, з карбонатними стяжіннями, палево-жовтий, жовтий	1,40	6…9	13	14
ІГЕ–4А, ІГЕ–4Б	Суглинок легкий пилуватий, тугопластичний, бурувато-жовтий, палево-жовтий	1,43	5…6	11	10
ІГЕ–6	Суглинок важкий пилуватий, напівтвердий, з рідкими прошарками піску, включеннями зерен карбонатів, окислів марганцю, буро-жовтий, жовто-палевий, бурувато-сірий	1,47	10	17	18
ІГЕ–6А	Супісок пилуватий, твердий, жовтий, бурувато-сірий	1,59	8	14	11
ІГЕ–7	Пісок дрібний та пилуватий, середньої щільності та щільний, від маловологого до водонасиченого (нижче рівня ґрунтових вод)	1,66	20	5	7
ІГЕ–7А	Суглинок важкий пилуватий, тугопластичний, сірий, буро-жовтий	1,84	23	11	6

Програма лабораторних випробувань полягала в отриманні характеристик ґрунтоцементу та проведенні аналізу отриманих результатів у випадку застосування в якості основи залізничної колії. Як уже відмічалось [7, 9], робота основи залізничного полотна специфічна, тому було обрано циклічні навантаження на зразки. За середнє навантаження, що створюється баластом та рейково-шпальною решіткою, прийнято 0,03 МПа.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351392
© В. І. Крисан, В. В. Крисан, О. І. Дубінчик, М. В. Мазуренко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Результати

Після того, як в прилад ущільнення було закладено зразки ґрунтоцементу під навантаженням 0,03 МПа та залишено під ним на 72 години, вони ставились під прес та знову навантажувались значенням тиску 0,03 МПа. Показники індикаторів приймались за 0,00 мм стиснення (скидання переміщення). В конструкції пресу передбачено, що навантаження передається штампом, і його переміщення фіксують чотири індикатори годинникового типу, котрі мають точність 0,01 мм. Далі навантаження виконувалось ступенями з витримкою до стабілізації не менше 5 хвилин (рис. 2, чорна гілка графіку).

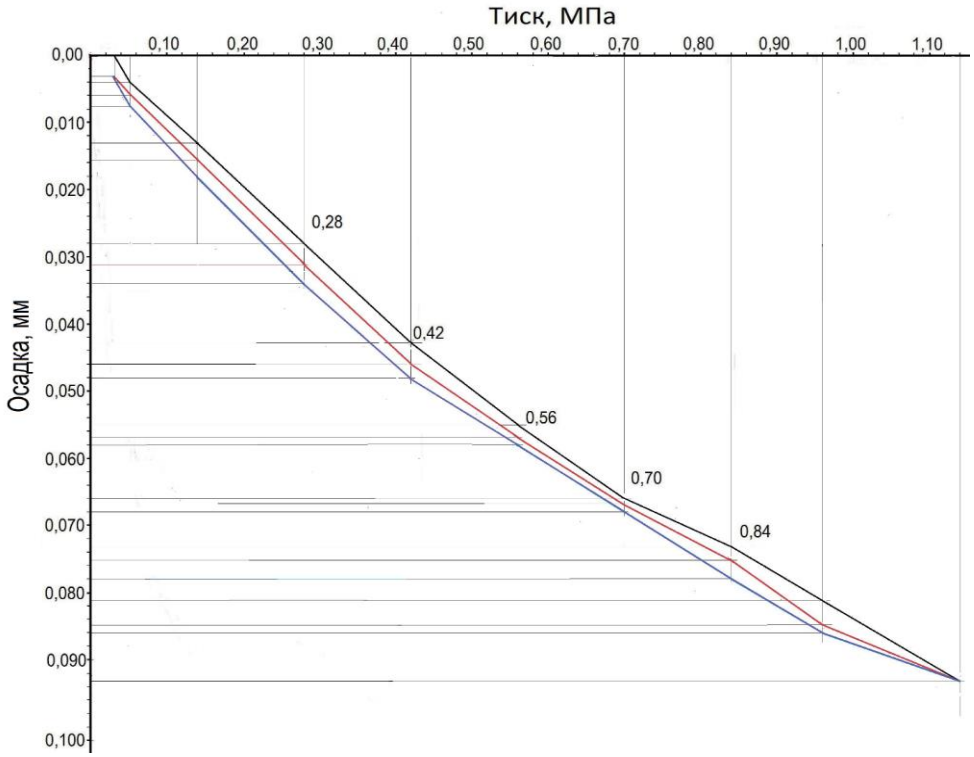


Рис. 2. Графіки циклу «навантаження – розвантаження»

Fig. 2. Graphs of the «loading – unloading» cycle

При досягненні тиску 1,12 МПа зразок витримувався 30 хвилин, осадка становила 0,093 мм. Після цього ступенями проводилося розвантаження до тиску 0,03 МПа зі стабілізацією кожної ступені. Аналіз графіку (рис. 2, синя гілка) свідчить, що, залишкова деформація складає 0,03 мм, а сумарна при тиску 1,12 МПа – 0,093 мм. Повторне навантаження (рис. 2, червона гілка) також було виконане ступенями, і перед початком виконання його зразок під тиском 0,03 МПа витримувався 24 години.

Аналіз графіку свідчить про наявність петлі гістерезису, як це вже було відмічено авторами в роботі [10], що демонструє роботу ґрунтоцементу в пружному режимі. При цьому модуль деформації E на різних ступенях завантаження знаходиться в діапазоні 560…750 МПа, що досить добре збігається з даними, що отримані іншими авторами для ґрунтоцементу із суглинку (вміст цементу 15…20 %), а саме значень E = 400…650 МПа [2, 12].

Наукова новизна та практична значимість

В статті на основі результатів лабораторних випробувань ґрунтоцементу остаточно доведено його високі пружні властивості під час дії циклічних навантажень, що моделюють дію рейко-шпальної решітки на баласт та земляне полотно залізниці. Практична значимість дос-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351392
© В. І. Крисан, В. В. Крисан, О. І. Дубінчик, М. В. Мазуренко, 2026

лідження полягає в отриманні значень модуля пружності ґрунтоцементу, які в подальшому можна застосовувати для практичних розрахунків прогнозування осідань ґрунтових основ.

Висновки

В науковій статті проведені випробування ґрунтоцементу та проаналізовано їхні результати, що є важливим кроком у визначенні характеристик цього геокомпозиту як перспективного будівельного матеріалу. Ґрунтоцемент демонструє стабільні пружні властивості, що робить його ефективним матеріалом для використання в цивільному, промисловому та залізничному будівництві. Результати цих та попередніх досліджень підтверджують необхідність подальшого вивчення ґрунтоцементу, які допоможуть обґрунтувати та донести до проєктувальників раціональність використання ґрунтоцементу в різних будівельних проєктах.

В подальшому в рамках накресленої задачі необхідно провести більш повний економічний аналіз використання ґрунтоцементу порівняно з традиційними матеріалами під час його застосування при будівництві залізниць з урахуванням виконання ремонтних та регламентних робіт. Проведення подальших досліджень та вивчення всіх аспектів застосування ґрунтоцементу допоможе розширити його використання в будівельній галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення.* [Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 42 с.
2. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. *Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом* : монографія. Харків : Друкарня Мадрид, 2016. 93 с.
3. Раздуй Р. В., Винников Ю. Л. Результати комплексних досліджень армованих ґрунтоцементними елементами основ, виготовлених за бурозмішувальною технологією. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2023. № 23. С. 66–78. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281152
4. Anoyatis G., Stijn F., Orakci O., Tsikas A. Soil-pile interaction in vertical vibration in inhomogeneous soils. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2023. Vol. 52, Iss. 14. P. 4582–4601. DOI: https://doi.org/10.1002/eqe.3968
5. Gazzarrini P. A Brief History of Jet Grouting in the Last 50 Years. *GeoStrata Magazine*. 2021. Vol. 25, Iss. 3. P. 70–77. DOI: https://doi.org/10.1061/geosek.0000025
6. Kazemian S., Huat B. B., Arun P., Barghchi M. A review of stabilization of soft soils by injection of chemical grouting. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2010. Vol. 4, Iss. 12. P. 5862–5868. URL: https://www.researchgate.net/publication/245587265_A_review_of_stabilization_of_soft_soils_by_injection_of_chemical_grouting
7. Kurhan D., Kurhan M. Modeling the Dynamic Response of Railway Track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708, Iss. 1. Art. 012013. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012013
8. Kurhan M., Kurhan D. Problems of providing international railway transport. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. Art. 01007. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201823001007
9. Krysan V., Krysan V., Petrenko V., Tiutkin O., Andrieiev V. Improving the safety of railway subgrade when it is strengthened using soil-cement elements. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. Art. 03006. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201929403006
10. Krysan V., Krysan V., Tiutkin O., Timchenko R., Krishko D. The results of experimental studies of the soil cement deformation capacity under the «loading-unloading» cycle conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1491. Art. 012005. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1491/1/012005
11. Petrenko V., Bannikov D., Kharchenko V., Tkach T. Regularities of the deformed state of the geotechnical system “soil base–micropile”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. Art. 012028. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012028
12. Tiutkin O., Autelitano F., Giuliani F., Neduzha L. Stress-strain behavior of railway embankments stabilized with grouted micropiles. *Alexandria Engineering Journal*. 2024. Vol. 102. P. 75–81. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.088

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351392
© В. І. Крисан, В. В. Крисан, О. І. Дубінчик, М. В. Мазуренко, 2026

13. Tiutkin O. L., Neduzha L., Kalivoda J. Finite-element Analysis of Strengthening the Subgrade on the Basis of Boring and Mixing Technology. *Transport Problems*. 2021. Vol. 16, Iss. 2. P. 189–197. URL: http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2021/zeszyt2/2021t16z2_16.pdf
14. Tiutkin O., Radkevych A., Dubinchyk O., Kharchenko V. Parametric analysis of a strain state of a soil base strengthened with vertical elements. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. Vol. 18, Iss. 2. P. 104–112. DOI: https://doi.org/10.33271/mining18.02.104
15. Vynnykov Y., Razdui R. The results of modeling the strain state of soil base reinforced by soil-cement elements under strip foundations of the building. *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2021. Vol. 2, Iss. 57. P. 74–81. DOI: https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2588

V. I. KRYSAN[1], V. V. KRYSAN[2], O. I. DUBINCHYK[3*], M. V. MAZURENKO[4]

[1]Geoprotect LLC, app. 308, Novokrimska St., 5, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 565 89 69, e-mail krysan.v.i@ukr.net, ORCID 0000-0001-7497-4615
[2]Geobud LLC, app. 308, Novokrimska St., 5, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 631 31 22, e-mail geobuddnepr@gmail.com, ORCID 0000-0002-9683-7838
[3*]Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 582 14 88, e-mail o.i.dubinchyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357
[4]Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 802 47 09, e-mail nikitamv94@gmail.com, ORCID 0009-0006-9775-7502

Analysis of Laboratory Test Results of Elastic Properties of Soil Cement

Purpose. The authors set the goal of determining the principles of the concept of reverse conversion to substantiate the use of underground metro structures as shelters for critical infrastructure facilities. **Methodology.** The laboratory test program consisted of obtaining the characteristics of soil cement and analyzing the results obtained in the case of use as a railway track base. During construction work, soil cement samples were taken. After selection, the samples were cut with special equipment, and the cut points were ground to ensure full contact with the press plates. After the soil cement samples were placed in the compaction device under a load of 0.03 MPa and left under this load for 72 hours. The loading of the samples was carried out in stages with a holding time of at least 5 minutes until stabilization. The tests were processed, analyzed and considered within the framework of the analysis of elastic properties. **Findings.** When the pressure reached 1.12 MPa, the sample was kept for 30 minutes, the settlement was 0.093 mm. After that, unloading was carried out in stages to a pressure of 0.03 MPa with stabilization of each stage. Analysis of the constructed graph shows that the residual deformation is 0.03 mm, and the total at a pressure of 1.12 MPa is 0.093 mm. Analysis of the graph shows the creation of a hysteresis loop, which characterizes the operation of soil cement in the elastic mode. At the same time, the deformation modulus *E* at different loading stages is in the range of 560…750 MPa. Soil cement demonstrates stable elastic properties, which makes it an effective material for use in civil, industrial and railway construction. **Originality.** The article, based on the results of laboratory tests of soil cement, finally proves its high elastic properties under the action of cyclic loads, which simulate the action of the rail-sleeper grid on the ballast and the railway subgrade. **Practical value** lies in obtaining the values of the modulus of elasticity of soil cement, which can be further used for practical calculations of predicting the settlements of soil bases.

Keywords: soil cement; soil cement piles; subgrade; soil base; rail-sleeper grid; elastic deformations; cyclic loads

REFERENCES

1. *Osnovy i fundamenty budivel ta sporud. Osnovni polozhennia, 42 DBN V.2.1-10:2018.* (2018). (in Ukrainian)
2. Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Burovi gruntotsementni pali, yaki vyhotovliaiutsia za burozmishuvalnym metodom*: monografiya. Kharkiv : Drukarnia Madryd. (in Ukrainian)
3. Razdui, R. V., & Vynnykov, Yu. L. (2023). Results of complex research of soil basesreinforced by soil-cement elementsmanufactured using drilling mixing method. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice, 23*, 66-78. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281152 (in Ukrainian)
4. Anoyatis, G., Stijn, F., Orakci, O., & Tsikas, A. (2023). Soil-pile interaction in vertical vibration in inhomogeneous soils. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *52*(14), 4582-4601. DOI: https://doi.org/10.1002/eqe.3968 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351392
© В. І. Крисан, В. В. Крисан, О. І. Дубінчик, М. В. Мазуренко, 2026

5. Gazzarrini, P. (2021). A Brief History of Jet Grouting in the Last 50 Years. *GeoStrata Magazine*, *25*(3), 70-77. DOI: https://doi.org/10.1061/geosek.0000025 (in English)
6. Kazemian, S., Huat, B. B., Arun, P., & Barghchi, M. (2010). A review of stabilization of soft soils by injection of chemical grouting. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, *4*(12), 5862-5868. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/245587265_A_review_of_stabilization_of_soft_soils_by_injection_of_chemical_grouting (in English)
7. Kurhan, D., & Kurhan, M. (2019). Modeling the Dynamic Response of Railway Track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *708*(1), 012013. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012013 (in English)
8. Kurhan, M., & Kurhan, D. (2018). Problems of providing international railway transport. *MATEC Web of Conferences*, *230*, 01007. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201823001007 (in English)
9. Krysan, V., Krysan, V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andrieiev, V. (2019). Improving the safety of railway subgrade when it is strengthened using soil-cement elements, *MATEC Web of Conferences*, *294*, 03006. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201929403006 (in English)
10. Krysan, V., Krysan, V., Tiutkin, O., Timchenko, R., & Krishko, D. (2025). The results of experimental studies of the soil cement deformation capacity under the «loading-unloading» cycle conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1491*, 012005. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1491/1/012005 (in English)
11. Petrenko, V., Bannikov, D., Kharchenko, V., & Tkach, T. (2022). Regularities of the deformed state of the geotechnical system "soil base – micropile". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *970*, 012028. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012028 (in English)
12. Tiutkin, O., Autelitano, F., Giuliani, F., & Neduzha, L. (2024). Stress-strain behavior of railway embankments stabilized with grouted micropiles. *Alexandria Engineering Journal*, *102*, 75-81. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.088 (in English)
13. Tiutkin, O. L., Neduzha, L., & Kalivoda, J. (2021). Finite-element Analysis of Strengthening the Subgrade on the Basis of Boring and Mixing Technology. *Transport Problems*, *16*(2), 189-197. Retrieved from http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2021/zeszyt2/2021t16z2_16.pdf (in English)
14. Tiutkin, O., Radkevych, A., Dubinchyk, O., & Kharchenko, V. (2024). Parametric analysis of a strain state of a soil base strengthened with vertical elements. *Mining of Mineral Deposits*, *18*(2), 104-112. DOI: https://doi.org/10.33271/mining18.02.104 (in English)
15. Vynnykov, Y., & Razdui, R. (2021). The results of modeling the strain state of soil base reinforced by soil-cement elements under strip foundations of the building. *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, *2*(57), 74-81. DOI: https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2588 (in English)

Надійшла до редколегії: 10.11.2025
Дата рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351392
© В. І. Крисан, В. В. Крисан, О. І. Дубінчик, М. В. Мазуренко, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК 624.873:624.046.2

К. М. ПЕРЕПЕЛИЦЯ[1*], Д. С. СПІВАК[2]

[1*]Факультет військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорт, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 738 54 25, ел. пошта kirill_perepelitsa@ukr.net, ORCID 0009-0006-4454-7237
[2]Центр досліджень Державної спеціальної служби транспорту, Україна, тел. +38 (099) 200 07 64, ел. пошта d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

Методика оцінювання несучої здатності інвентарних конструкцій наплавних мостів

Мета. Метою даної роботи є розробка підходів для об'єктивного дослідження інвентарної конструкції наплавного залізничного мосту НЖМ–56. Вибір розрахункової схеми наплавного мосту для подальших обґрунтованих досліджень вантажопідйомності та рекомендацій з улаштування мостів з майна НЖМ–56 для пропуску залізничного, автомобільного та гусеничних навантажень. **Методика.** Варіативне моделювання наплавних (понтонних) мостів НЖМ–56 з різними схемами (довжиною та кількістю понтонних опор) для їх дослідження методом ліній впливу. Аналіз отриманих результатів, обґрунтування розрахункової схеми мостового переходу, яка пропонується до подальших досліджень. Застосування програмного забезпечення, що реалізує метод скінчених елементів для проведення досліджень. **Результати.** Опрацювання підходів для перерахунку вантажопідйомності інвентарних конструкцій наплавних (понтонних) систем мостів методом скінчених елементів. Визначено варіант довжини та схему збирання наплавного мосту НЖМ–56, що чинить найбільший вплив на величину зусиль, які виникають під дією тимчасового навантаження, для подальших досліджень та надання обґрунтованих рекомендацій з пропуску тимчасового навантаження. Запропоновано найбільш невигідні варіанти та місця розміщення тимчасових рухомих навантажень для дослідження напружено-деформованого стану конструкції. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає в отриманні нових результатів на основі уточненої методики для перерахунку вантажопідйомності наплавних (понтонних) систем мостів на прикладі наплавного мосту НЖМ–56. Дослідження зосереджено на вивченні особливостей перехідної частини понтонного мосту, що розглядається як окрема підсистема та в сукупності з елементами руслової частини. **Практична значимість.** Визначення підходів та методик з перерахунку вантажопідйомності інвентарних конструкцій наплавних (понтонних) систем, які потребують перерахунку за викликами сьогодення. Дослідження направленні на забезпечення безпечного пропуску тимчасового залізничного, гусеничного та колісних навантажень по наплавному (понтонному) мосту НЖМ–56. Визначення особливостей дослідження наплавної системи мосту із застосуванням програмного забезпечення, що реалізує метод скінченних елементів.

Ключові слова: наплавні (понтонні) мости; критична довжина; схема збирання; подолання водних перешкод; функціонування транспортної інфраструктури; метод ліній впливу; варіативне моделювання наплавних систем; метод скінчених елементів

Вступ

Сучасні виклики, пов'язані з повномасштабною агресією зс рф проти України та застосуванням ворогом високоточного озброєння, безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та інших сучасних засобів ведення бойових дій, створює нагальну потребу в забезпеченні надійного технічного прикриття об'єктів національної транспортної інфраструктури для її стійкого функціонування в будь-яких сценаріях виникнення загрози її функціонуванню. Це критично важливе завдання в забезпеченні обороноздатності країни. У разі руйнування об'єкту транспортної мережі способи та терміни його відновлення визначаються великою кількістю чинників, що залежать від його місця находження та вагомості в ланці логістичного забезпечення. Короткотермінове відновлення руху через бар'єрне місце можливе шляхом наведення переправи на ближньому обході з використанням наплавних (понтонних) військових мостів, паромної переправи, з використанням механізованих мостових комплексів.

Для забезпечення пропуску великовагових транспортних засобів через водні перешкоди

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

збройні сили НАТО поділяють військові мости на три категорії:

– штурмові мости, так звані мости близької підтримки з прогонами довжиною близько 20 м, що перевозяться і встановлюються на гусеничному шасі;

– загальні опорні мости (GSB – general support bridges) з прогонами близько 40 м, що перевозяться на декількох колісних транспортних засобах;

– мости ліній зв'язку (LOC – line-of communication bridges), які найчастіше є складними або понтонними конструкціями, використовуються для переправи через широкі водойми.

Ця класифікація була створена у відповідь на різні сценарії використання, а також у зв'язку із конструктивними відмінностями між перерахованими трьома категоріями мостів.

Мости LOC і GSB часто використовуються в рамках заходів із ліквідації наслідків кризових ситуацій для підтримки місцевого населення, забезпечення життєдіяльності мережі доріг. Також їх використовують в якості тимчасових мостів, які замінюють постійні мости, пошкоджені повенями [10].

У країнах членах НАТО військова класифікація навантаження мостів, поромів, плотів і транспортних засобів визначена, стандартизована та описана в [11].Зміст числового значення, яке відображає вантажопідйомність мосту та відповідність транспортного засобу MLC (Military Load Classification), включає в себе значення маси транспортного засобу з урахуванням його геометрії (довжини і ширини) та використовується для оцінки здатності військового транспортного засобу використовувати штучну споруду як засіб для подолання перешкоди безпечно та без її пошкодження.

Для використання мостів у військових цілях на дорогах оборонного значення інженерам рекомендовано додатково, під час проєктування або оцінки технічного стану, класифікувати мости згідно зі STANAG 2010 та 2021, QSTAG 180, що забезпечить їх використання з максимальною безпечною військовою пропускною здатністю. Класифікація мостів на альтернативних дорогах повинна відповідати класифікації тимчасових рухомих навантажень на мости відповідно до [3] та [5]. Окрім цього, слід враховувати вантажопідйомність мосту та можливість проїзду великовагових транспортних засобів або військової техніки [6].

За досвідом практичного застосування, майно наплавного залізничного мосту НЖМ–56 активно використовується для технічного прикриття важливих транспортних споруд. Крім того, воно забезпечує оперативне відновлення руху автомобільного транспорту через водні перешкоди на територіях України, що постраждали внаслідок бойових дій [1]. З огляду на сучасні військові виклики та вимоги щодо пропуску сучасного навантаження, зокрема військового, виникає потреба в опрацюванні методики дослідження мосту НЖМ–56 з подальшою його класифікацією відповідно до класу військової навантаження MLC.

Мета

Метою даної статті є розробка методики оцінки вантажопідйомності наплавних мостів для забезпечення безпечного пропуску сучасних залізничних, автомобільних та гусеничних транспортних засобів в умовах бойових дій та раціонального використання інвентарних конструкцій. В статті розглянуто підходи до вибору розрахункової схеми наплавного мосту та визначення критичних ділянок для тимчасових рухомих навантажень, які підлягають розрахунку відповідно до сучасних стандартів країн НАТО. При дослідженні розрахункової моделі понтонного мосту аналізується вплив довжини мосту на величину внутрішніх зусиль під дією тимчасового навантаження, а також визначаються критичні ділянки для колісних, гусеничних і залізничних моделей рухомих навантажень.

Методика

В більшості випадків забезпечення швидкого відновлення руху через бар'єрну ділянку забезпечується за рахунок тимчасового відновлення інвентарними конструкціями наплавних систем. Більшість вітчизняних штатних інвентарних конструкцій запроєктовані за старими нормами по навантаженню, яке діяло на той час. Безпечна експлуатація цих систем мостів за викликом сучасних стандартів країн НАТО та діючими нормативними документами щодо тимчасових рухомих навантажень можлива тільки після перевірки їхньої вантажопідйом-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

ності. Пропускна здатність тієї чи іншої конструкції визначається напруженнями, які виникають в елементах під найбільш важкою одиницею рухомого навантаження та діючими технічними умовами.

Діючим керівним документом з визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов мостів є Інструкція з визначення умов та пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах [2]. Вказівки є посібником для оперативного визначення рівня навантаження залізничних мостів рухомим складом залізниць на основі методу класифікації, а також для встановлення режиму пропуску поїздів по мостах. Слід зазначити, що визначення вантажопідйомності за методикою [2] не є нормативним у зв'язку з наявністю суттєвих особливостей, які виявляються під час аналізу дії сучасних залізничних навантажень на наплавні системи. Зазначені особливості зумовлені динамічним характером навантажень, плавучістю конструкцій, коливальними процесами та впливом водного середовища. Таким чином, встановлення вантажопідйомності наплавного мосту НЖМ–56 методом класифікації елементів потребує сучасних підходів. Підготовчими етапами визначення вантажопідйомності наплавної (понтонної) системи мосту є визначення:

– довжини мосту, яка буде розрахунковою;
– варіанту влаштування понтонних опор;
– місць розташування схеми тимчасового
– рухомого залізничного, гусеничного та колісних навантажень.

Для точного встановлення вантажопідйомності рекомендуються сучасні обчислювальні методи, які інтегрують класифікацію елементів з числовим моделюванням. Основним є метод скінченних елементів (МСЕ), реалізований у програмних комплексах інженерного аналізу, що дозволяє враховувати просторову роботу конструкції, динамічний характер навантажень, плавучість елементів та взаємодію з водним середовищем.

Результати

Залежно від необхідної ширини подолання водної перешкоди може бути наведений понтонний міст із майна НЖМ–56 загальною довжиною до 531,8 м, який складається з руслової та перехідної частин. Основними конструктивними елементами наплавного мосту НЖМ–56 є блоки прогонових будов довжиною 6,25 м та понтонні опори. Понтонні опори формуються з трьох секцій – носової, середньої та кормової – відповідно до вимог, наведених у [8]. Один блок прогонової будови встановлюється на одну або дві секції понтонних опор залежно від прийнятої схеми збирання мостового переходу.

Початковим етапом дослідження вантажопідйомності є визначення варіантів довжини мосту, які чинять найбільший вплив на величину зусиль, що виникають у балках під дією тимчасового навантаження. З цією метою конструкція мосту розглядалася в трьох конфігураціях:

– руслова частина без перехідної, яка може існувати як самостійна конструкція;
– сумісна робота руслової частини з перехідною;
– перехідна частина без руслової, яка не може функціонувати як самостійна конструкція, однак перевіряється у випадку виявлення більш критичних розрахункових ситуацій.

У ході визначення критичної довжини мосту було виконано розрахунок по 11 варіантів для кожної конфігурації з однією понтонною опорою під прогоном складеної із трьох секцій. Зазначені розрахункові моделі розглядалися без урахування шарнірних з'єднань, які можуть бути додані при досягнені довжини руслової частини 250…300 м.

Створення розрахункових схем мосту НЖМ–56 було виконано за методикою, описаною раніше у роботі [7]. Розрахункові схеми для крайових варіантів самостійної роботи руслової частини наведено на рис. 1, а отримані результати подано у табл. 1. При цьому за довжину проїзної частини мосту прийнято відстань між зовнішніми гранями крайніх понтонів.

Порівняння варіантів здійснюється на основі аналізу максимальних значень ординат та однознакових площ ліній впливу згинальних моментів і нормальних зусиль, що виникають у балці проїзної частини. Згідно з даними табл. 1, найбільші значення розрахункових показників спостерігаються при довжинах проїзної частини 55,4 та 61,65 м. Оскільки результати для зазначених варіантів є близькими між собою, доцільним є зменшення кількості варіантів для подальших перевірок шляхом розгляду усередненого варіанта.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

У даному випадку найбільш наближеним до оптимального за мінімальним відхиленням отриманих показників є варіант із довжиною проїзної частини 67,9 м. Для цього варіанта спостерігаються такі відхилення від максимальних значень:

– за ординатами згинальних моментів – 2,1 %;

– за ординатами поздовжніх зусиль – 2,6 %;

– за однознаковими площами згинальних моментів – 1,3 %;

– за однознаковими площами поздовжніх зусиль – не більше 0,1 %.

Для нівелювання зазначених відхилень пропонується збільшити нормативне навантаження на величину середніх відхилень, які становлять:

– для ординат ліній впливу (під дією колісного та гусеничного навантаження) – на 2,4 %;

– для однознакових площ ліній впливу (під дією залізничного навантаження) – на 0,7 %.

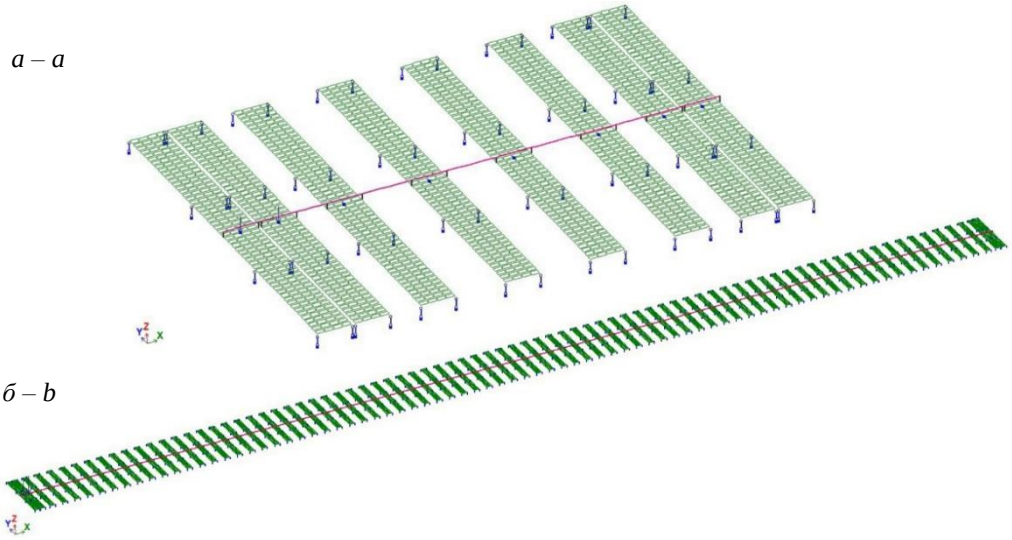


Рис. 1. Розрахункові моделі крайніх варіантів руслової частини за її довжинами:
а – 36,65 м; *б* – 486,65 м

Fig. 1. Computational models of the extreme river-span variants according to their lengths:
a – 36,65 m; *b* – 486,65 m

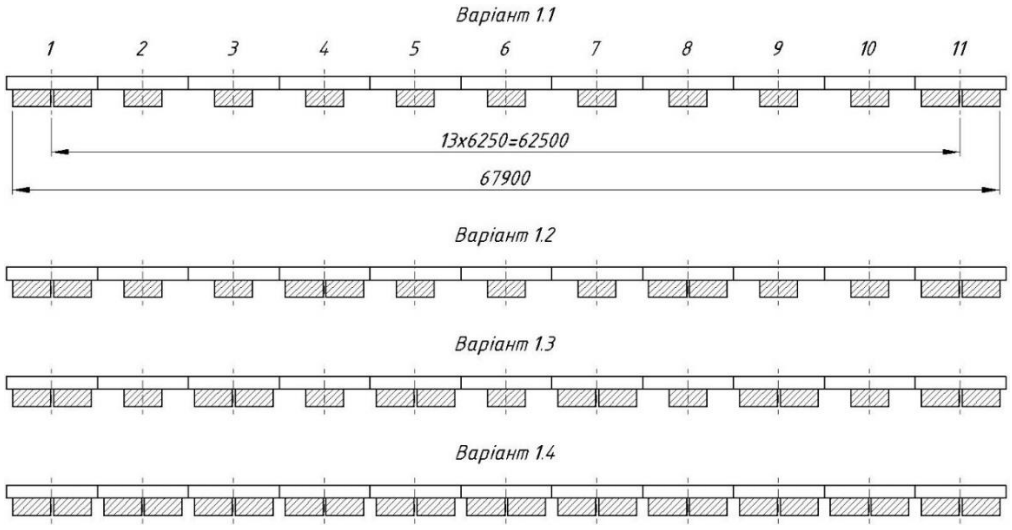


Рис. 2. Схеми руслової частини мосту з різною комбінацією розташування понтонних опор, мм

Fig. 2. Schemes of the river-span section of the bridge with different combinations of pontoon pier arrangement, mm

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

В результаті максимальне зведене відхилення становитиме не більше 0,6 %, що може вважатися несуттєвим. У зв'язку з цим, варіант з довжиною 67,9 м доцільно прийняти для подальших основних розрахунків із використанням фінальних навантажень, наведених у табл. 2.

Наступним етапом дослідження є визначення впливу різної послідовності розташування понтонних опор, як показано на рис. 2. В окремих випадках на цьому етапі може не формуватися симетрична схема мосту. У зв'язку з чим допускається визначення іншого усередненого та універсального варіанта за умови, що виникаючі похибки не спотворюють результати розрахунків. Для цього також можливе застосування підходу, аналогічного використаному при обґрунтуванні довжини 67,9 м. У підсумку для новоутворених варіантів із різним розташуванням понтонних опор необхідно також виконати обчислення параметрів ліній впливу.

Наступним етапом є обчислення варіантів із сумісною роботою руслової частини та перехідної частини мосту. Методика оцінювання впливу на кожну з частин є аналогічною до застосованої раніше для руслової частини мосту, що розглядалася як самостійна система. На рис. 3 наведено основні конфігурації розрахункових схем.

Таблиця 1

Порівняння результатів ліній впливу зусиль у балках проїзду руслової частини мосту як самостійної системи

Table 1

Comparison of influence line results for internal forces in the deck beams of the river-span bridge section considered as an independent system

Довжина проїзної частини мосту, м	Кількість прогонів у русловій частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
За згинальним моментом M					
36,65	6	5,036	–	53,406	–
49,15	8	5,744	+14,1	74,883	+40,2
55,40	9	5,797	+0,9	79,585	+6,3
61,65	10	5,790	–0,1	82,473	+3,6
67,90	11	5,678	–2,0	81,435	–1,3
74,15	12	5,567	–2,0	79,685	–2,2
111,65	18	5,485	–1,5	77,026	–3,3
149,15	24	5,485	0	77,570	+0,7
261,65	42	5,485	0	77,822	+0,3
374,15	60	5,485	0	77,823	>+0,1
486,65	78	5,485	0	77,823	0
За поздовжнім зусиллям N					
36,65	6	1,942	–	21,296	–
49,15	8	2,307	+18,8	30,834	+44,8
55,40	9	2,388	+3,5	33,836	+9,7
61,65	10	2,360	–1,2	34,276	+1,3
67,90	11	2,327	-1,4	34,262	>–0,1

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

Продовження табл. 1

Continuation of Table 1

Довжина проїзної частини мосту, м	Кількість прогонів у русловій частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
74,15	12	2,273	–2,3	33,212	–3,1
111,65	18	2,249	–1,1	32,223	–3,0
149,15	24	2,249	0	32,431	+0,7
261,65	42	2,249	0	33,129	+2,2
374,15	60	2,249	0	33,137	>+0,1
486,65	78	2,249	0	33,137	0

Таблиця 2

Варіанти комбінації видів навантажень для руслової частини мосту

Table 2

Load combination variants for the river-span section of the bridge

№ комбінації	Постійне навантаження	Тимчасове навантаження	
1	Розрахункове значення	Колісний транспорт	Розрахункове значення × 1,024
2		Гусеничний транспорт	Розрахункове значення × 1,024
3		Залізничний транспорт	Розрахункове значення × 1,008

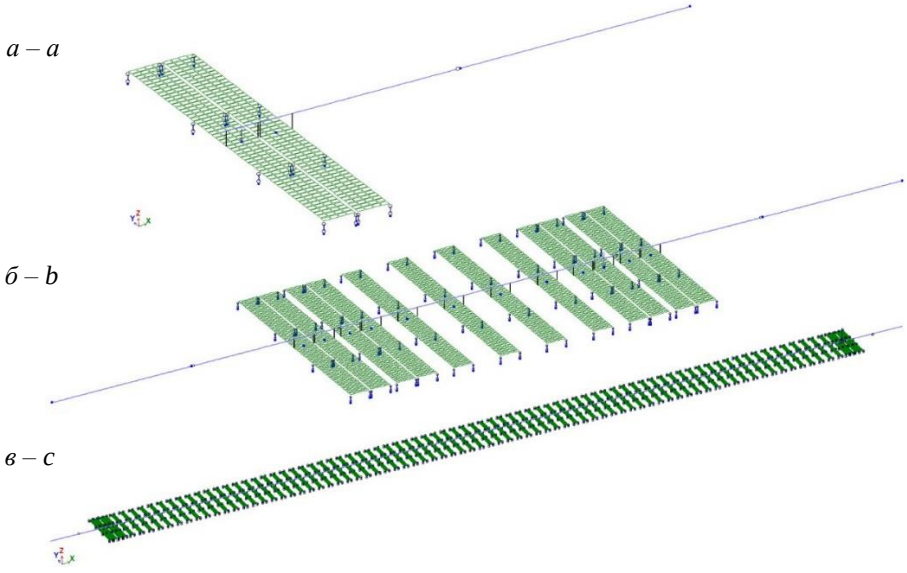


Рис. 3. Варіанти розрахункових моделей мосту за основними відмінностями: самостійна модель перехідної частини (*а*); модель сумісної руслової та перехідної частин мосту сумарною довжиною проїзної частини 114,10 м (*б*) та 564,10 м (*в*)

Fig. 3. Variants of computational bridge models according to the main differences: an independent model of the transition section (*a*); a combined model of the river-span and transition sections of the bridge with a total deck length of 114.10 m (*b*) and 564.10 m (*c*)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Результати для руслової та перехідної частин розглянуто незалежно та наведено відповідно у табл. 3 та 4. У табл. 3 додатково подано результати для перехідної частини, розглянутої як самостійна система (38,725 м).

За результатами, наведеними у табл. 3, максимальні значення розрахункових показників для перехідної частини конструкції спостерігаються у таких випадках: 1) при розгляді перехідної частини як самостійної системи (довжина 38,725 м); 2) при сумісній роботі з русловою частиною конструкції, за довжин руслової частини 49,15 та 486,65 м.

За результатами для руслової частини спостерігається тенденція до зростання нормальних зусиль зі збільшенням довжини проїзної частини. У зв'язку з чим конструкції, у яких довжина проїзної частини руслової секції перевищує 486,65 м, необхідно розглядати додатково.

Варіанти з довжинами 61,65 та 74,15 м є найближчими до варіанта з довжиною 67,9 м, який було прийнято при обчисленнях руслової частини як самостійної системи. Відхилення значень цих варіантів від значення варіанта з довжиною 67,9 м становлять:

– за ординатами згинального моменту – 0,2 %;

– за однознаковими площами згинального моменту – 0,9 %.

З огляду на незначні відхилення показників згинальних моментів, а також з метою оптимізації обсягів трудомістких розрахунків, варіант з довжиною 67,9 м допустимо розглядати під час перевірки сумісної роботи руслової та перехідної частин конструкції. Разом з тим, за показниками поздовжніх зусиль спостерігається суттєва різниця як для варіанта з довжиною 67,9 м, так і для варіанта з довжиною 49,15 м. Таким чином, за результатами перевірки сумісної роботи перехідної та руслової частин, до подальших розрахунків прийнято чотири варіанти мосту з довжинами руслової частини 36,65, 47,15, 67,9 та 486,65 м, а також окремий варіант самостійної перехідної частини довжиною 38,725 м.

Після визначення та обчислення параметрів ліній впливу здійснюється встановлення повного комплексу постійних і тимчасових навантажень. У даному розрахунку для НЖМ–56 розглядається навантаження від колісного транспорту класу MLC120, гусеничного транспорту MLC150, а також залізничне навантаження С10 (рис. 4).

Таблиця 3

Порівняння результатів ліній впливу зусиль у балках проїзду перехідної частини мосту під час самостійної та у сумісної роботи з русловою частиною

Table 3

Comparison of influence line results for internal forces in the deck beams of the transition section of the bridge under independent action and in combined action with the river-span section

Довжина проїзної частини мосту, м	Довжина проїзної частини руслової ділянки мосту, м	Кількість прогонів у руслові частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
За згинальним моментом М						
38,725	–	–	9,448	–	112,849	–
114,10	36,65	6	6,980	–	174,760	–
120,35	42,90	7	7,026	+0,7	179,250	+2,6
126,60	49,15	8	7,031	+0,7	180,408	+0,7
132,85	55,40	9	7,025	> –0,1	179,238	–0,7
139,10	61,65	10	7,020	> –0,1	176,883	–1,3
145,35	67,90	11	7,017	> –0,1	174,295	–1,5

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

Продовження табл. 3

Continuation of Table 3

Довжина проїзної частини мосту, м	Довжина проїзної частини руслової ділянки мосту, м	Кількість прогонів у руслові частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
151,60	74,15	12	7,015	> –0,1	173,187	–0,6
226,60	149,15	24	6,997	–0,3	172,552	–0,4
339,10	261,65	42	6,982	–0,2	170,542	–1,2
564,10	486,65	78	6,972	–0,1	169,085	–0,9
За поздовжнім зусиллям N						
38,725	–	–	11,834	–	98,845	–
114,10	36,65	6	6,110	–	157,179	–
120,35	42,90	7	6,492	+6,3	184,278	+17,2
126,60	49,15	8	6,650	+2,4	206,109	+11,9
132,85	55,40	9	6,785	+2,0	220,805	+7,1
139,10	61,65	10	6,913	+1,9	229,579	+4,0
145,35	67,90	11	7,005	+1,3	234,134	+2,0
151,60	74,15	12	7,076	+1,0	236,212	+0,9
226,60	149,15	24	7,573	+7,0	244,048	+3,3
339,10	261,65	42	7,877	+4,0	252,225	+3,4
564,10	486,65	78	8,087	+2,7	256,683	+1,8

Таблиця 4

Порівняння результатів ліній впливу зусиль у балках проїзду перехідної частини мосту під час сумісної роботи з русловою частиною

Table 4

Comparison of influence line results for internal forces in the deck beams of the bridge transition section under combined action with the river-span section

Довжина проїзної частини мосту, м	Довжина проїзної частини руслової ділянки мосту, м	Кількість прогонів у руслові частині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення поточного значення від значення попереднього варіанту, %
За згинальним моментом M						
114,10	36,65	6	4,907	–	84,558	–
120,35	42,90	7	5,348	+9,0	95,670	+13,1
126,60	49,15	8	5,692	+6,4	107,502	+12,4
132,85	55,40	9	5,871	+3,2	117,258	+9,1

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Продовження табл. 4

Continuation of Table 4

Довжина проїзної частини мосту, м	Довжина проїзної частини русло-вої ділянки мосту, м	Кількість прогонів у русло-вій час-тині, шт.	Максимальна ордината лінії впливу за модулем	Відхилення по-точного значен-ня від значення попереднього варіанту, %	Максимальна однознакова площа лінії впливу за модулем	Відхилення по-точного значен-ня від значення попереднього варіанту, %
139,10	61,65	10	5,930	+1,0	123,947	+5,7
145,35	67,90	11	5,926	>–0,1	127,946	+3,2
151,60	74,15	12	5,903	–0,4	129,127	+0,9
226,60	149,15	24	5,872	–0,5	123,339	–4,5
339,10	261,65	42	5,872	0	120,856	–2,0
564,10	486,65	78	5,872	0	119,022	–1,5
За поздовжнім зусиллям N						
114,10	36,65	6	3,781	–	96,515	–
120,35	42,90	7	3,604	–4,7	94,792	–1,8
126,60	49,15	8	3,529	–2,1	91,469	–3,5
132,85	55,40	9	3,509	–0,6	86,852	–5,1
139,10	61,65	10	3,509	0	81,511	–6,2
145,35	67,90	11	3,510	>0,1	76,025	–6,7
151,60	74,15	12	3,507	>–0,1	74,205	–2,4
226,60	149,15	24	3,379	–3,7	86,513	+16,6
339,10	261,65	42	3,296	–2,5	95,052	+9,9
564,10	486,65	78	3,239	–1,7	99,751	+4,9

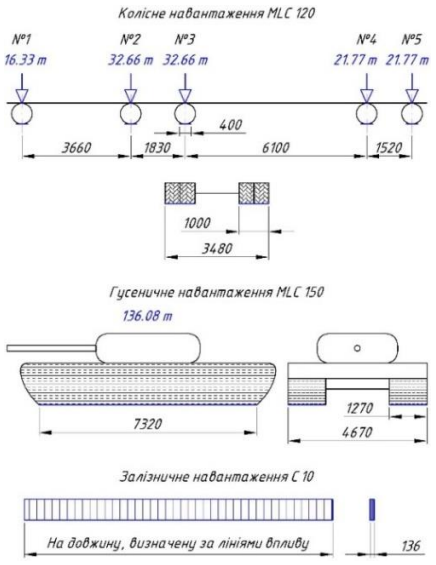


Рис. 4. Розрахункові моделі транспортних засобів

Fig. 4. Computational models of vehicles

Види та величини постійних і тимчасових навантажень подано відповідно у табл. 5 та 6.

Навантаження від сучасних поширених моделей локомотивів і піввагонів, як правило, не перевищує 7,5 т/п. м [9]. Водночас, відповідно до [3], характеристичне тимчасове вертикальне навантаження від рухомого складу залізниць класу СК для мостів, які розглядаються як тимчасові, становить С10 – 10 т/п. м. Тимчасове вертикальне навантаження від порожнього рухомого складу приймається на рівні 1,4 тс/м колії [4].

Коефіцієнт надійності за навантаженням для постійних навантажень прийнято відповідно до норм [3] як для суміщених мостів, він становить $\gamma_f = 1{,}25$. Коефіцієнти надійності та динамічності для колісного навантаження за класифікацією MLC прийнято відповідно до методики, визначеної для екіпажу НК згідно з [3].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

Гусенична модель навантаження в актуальних вітчизняних будівельних нормах відсутня. Однак з огляду на перевищення маси гусеничної моделі максимального значення колісної моделі НК–100 її прийнято з аналогічними правилами прикладання до споруди та з використанням відповідних коефіцієнтів за навантаженням.

Визначення коефіцієнтів для залізничного навантаження базується на довжині завантаження лінії впливу, яка залежить від довжини мосту. Оскільки розрахункові моделі мають різну довжину, для спрощення прийнято середнє значення коефіцієнта γ_f =1,15, що відповідає довжині завантаження λ = 50 м. Для цієї ж довжини визначено коефіцієнт динамічності 1+μ.

Після визначення критичних місць розташування навантаження, виконується розстановка моделей колісного, гусеничного та залізничного транспорту. Окрім цього, варто звернути увагу на можливі додаткові зони прикладення тимчасового навантаження, які можуть впливати на оцінку просідання понтонних опор і не охоплюються методом аналізу ліній впливу.

Таблиця 5

Нормативні та розрахункові значення постійних навантажень

Table 5

Characteristic and design values of permanent loads

Елемент	Нормативне значення, т	Коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f	Розрахункове значення, т
Балки центрального прогону	7,02	1,25	8,78
Ребра, косинки, накладки центрального прогону	2,40		3,00
Настил центрального прогону	3,05		3,81
Прогін бокових проїздів	1,52		1,90
Носова секція понтона	4,00		5,00
Середня секція понтона	3,70		4,625
Кормова секція понтона	4,10		5,125

Таблиця 6

Нормативні та розрахункові значення тимчасових навантажень

Table 6

Characteristic and design values of temporary loads

Модель навантаження		Нормативне значення	Коефіцієнти надійності та динамічності	Розрахункове значення
Для всіх моделей, окрім моделей руслової частини як самостійної системи				
Колісне	Вісь 1	16,33 т	γ_f = 1,0; 1+μ=1	16,33 т
	Вісь 2	32,66 т		32,66 т
	Вісь 3	32,66 т		32,66 т
	Вісь 4	21,77 т		21,77 т
	Вісь 5	21,77 т		21,77 т
Гусеничне	–	136,08 т	–	136,08 т

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

Продовження табл. 6

Continuation of Table 6

Модель навантаження		Нормативне значення	Коефіцієнти надійності, динамічності та інше	Розрахункове значення
Для всіх моделей, окрім моделей руслової частини як самостійної системи				
Залізничне	Повне завантаження	10,0 т/п м	$\gamma_f = 1{,}15$; $1+\mu=1+\frac{14}{30+\lambda} \geq 1.15$	12,0 т/п м
	Порожній склад	1,4 т/п м	$\gamma_f = 1{,}0$	1,4 т/п м
Для моделей руслової частини як самостійної системи				
Колісне	Вісь 1	16,33 т ×1,024* =16,72 т	$\gamma_f = 1{,}0$; $1+\mu=1$	16,72 т
	Вісь 2	32,66 т ×1,024* =33,44 т		33,44 т
	Вісь 3	32,66 т ×1,024* =33,44 т		33,44 т
	Вісь 4	21,77 т ×1,024* =22,29 т		22,29 т
	Вісь 5	21,77 т ×1,024* =22,29 т		22,29 т
Гусеничне	–	136,08 т ×1,024* =139,35 т	–	139,35 т
Залізничне	Повне завантаження	10,0 т/п м ×1,008* =10,08 т/п м	$\gamma_f = 1{,}15$; $1+\mu=1+\frac{14}{30+\lambda} \geq 1.15$	12,1 т/п м
	Порожній склад	1,4 т/п м, ×1,008* = 1,41 т/п м	$\gamma_f = 1{,}0$	1,41 т/п м

*Додатковий множник, визначений у табл. 2.

Розташування колісного та гусеничного навантаження на мосту встановлюється відповідно до положення максимальних ординат ліній впливу. Для залізничного навантаження критичні положення визначаються за максимальним сумарним значенням площ ліній впливу однозначних ділянок. На рис. 5 наведено приклад встановлення навантажень на критичних ділянках на основі ліній впливу.

На рис. 6 показано один із результатів розташування різних моделей навантаження на критичних ділянках на прикладі варіанта 1.1. Навантаження № 8 та № 9, а відповідають випадкам додаткових перевірок, призначених для визначення максимальної просадки мосту, як було зазначено вище.

Додатково у табл. 7 наведено вплив порядку розташування понтонів у варіантах 1.1–1.4 на максимальні ординати ліній впливу в балках проїзної частини. У даному випадку найбільші значення параметрів ліній впливу спостерігаються при найбільшій кількості понтонів.

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

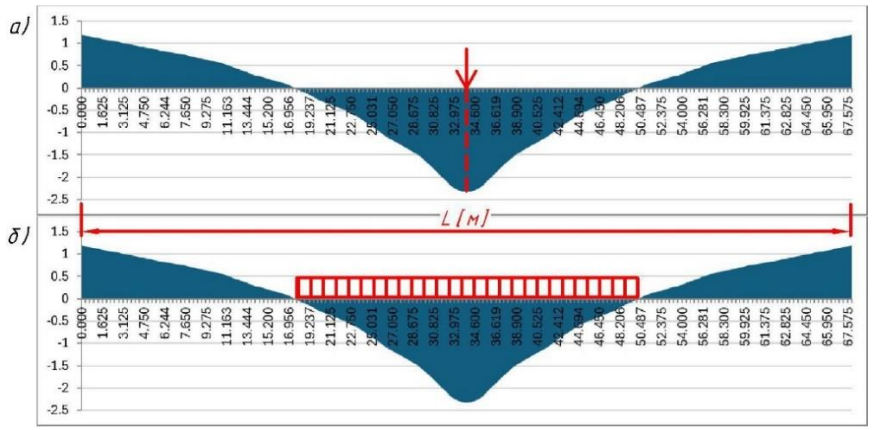


Рис. 5. Приклад завантаження ліній впливу зусилля N у балках проїзду варіанту 1,1 руслової частини мосту зосередженим (*а*) та розподіленим (*б*) навантаженням

Fig. 5. Example of loading the influence line of axial force N in the deck beams of variant 1.1 of the river-span section of the bridge with concentrated (*a*) and distributed (*b*) loads

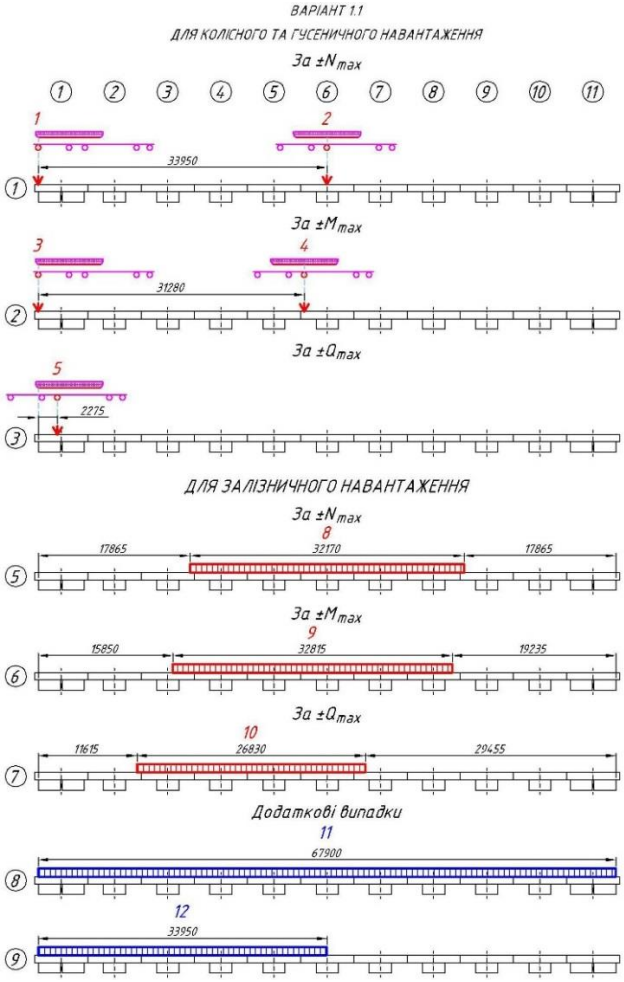


Рис. 6. Критичне та додаткове розташування моделей тимчасового навантаження для варіанта мосту 1,1, мм

Fig. 6. Critical and additional positions of variable load models for bridge variant 1.1, mm

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Таблиця 7

Максимальні ординати ліній впливу зусиль в балках проїзду варіантів руслової частини мосту

Table 7

Maximum ordinates of influence lines for internal forces in the deck beams of the river–span bridge variants

№ варіанту	Ордината				Площа			
	$-N_{max}$	$+N_{max}$	$-M_{max}$	$+M_{max}$	$-N_{max}$	$+N_{max}$	$-M_{max}$	$+M_{max}$
1	2,327	2,170	4,798	5,678	34,262	22,729	50,227	81,435
2	2,309	2,390	5,349	5,609	34,570	26,315	58,557	80,848
3	2,327	2,631	5,887	5,622	33,695	30,188	67,331	78,048
4	2,617	3,145	7,062	6,277	40,025	39,094	87,999	91,771

У результаті визначені критичні місця та моделі завантаження дають змогу встановити діючі зусилля та напруження в балках проїзду або перенести навантаження на більш складні та точні розрахункові моделі, що забезпечує економію часу обчислень.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає в отриманні нових результатів на основі уточненої методики та підходів до визначення вантажопідйомності інвентарних конструкцій наплавних (понтонних) мостів, які застосовуються для подолання водних перешкод в умовах бойових дій та інших кризових ситуацій. З урахуванням відсутності діючої методики перерахунку вантажопідйомності інвентарних наплавних мостових систем визначено та обґрунтовано основні етапи оцінювання несучої здатності конструкції за допомогою ліній впливу зусиль та методу скінченних елементів.

Визначено критичні довжини руслової та перехідної частин мосту як при їх спільній роботі, так і при самостійній роботі, які доцільно включати до розрахункової схеми під час проведення досліджень. Отримано та проаналізовано результати максимальних ординат ліній впливу зусиль *N* та *M* у балках проїзду руслової частини мосту для чотирьох варіантів влаштування понтонних опор. Визначено критичні та додаткові розташування моделей тимчасового колісного, гусеничного та залізничного навантажень для варіанта наплавного мосту. Наведено приклади завантаження ліній впливу зусилля *N* у балках проїзду варіанта мосту руслової частини зосередженим та розподіленим навантаженням. Визначено нормативні та розрахункові значення постійних і тимчасових навантажень.

Практична значимість роботи визначається можливістю використання отриманих результатів для визначення вантажопідйомності наплавного мосту НЖМ–56. Наведені максимальні ординати та однознакові площі ліній впливу можуть бути використані для руслової та перехідної частин мосту під час складання й вибору схеми мосту для подолання водної перешкоди.

Висновки

1. Запропонована методика включає в себе основні етапи для дослідження наплавної (понтонної) системи мосту, яку можна застосовувати для вибору схеми подолання водної перешкоди та визначення її вантажопідйомності. Вона дозволяє обґрунтовано визначати довжини руслової та перехідної частин мосту, а також варіант влаштування понтонних опор у розрахунковій схемі понтонного мосту.

2. Досліджено особливості конструкції наплавної системи мосту НЖМ–56, основні частини, можливі варіанти влаштування понтонних опор, варіанти розміщення тимчасових рухомих колісних, гусеничних та залізничних навантажень.

3. Застосування сучасного програмного забезпечення, що реалізує метод скінчених еле-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

ментів, дозволяє відтворити роботу наплавного мосту та отримати значення напружено-деформованого стану, що забезпечує об'єктивне визначення вантажопідйомності мосту.

4. Застосування методики визначення ліній впливу дає змогу спростити перевірку балок проїзної частини аналітичним методом або перенести критичні положення транспортних навантажень у задані місця з метою прискорення обчислень детальних, але ресурсоємних моделей мосту.

5. Отримані результати дозволяють забезпечити безпечний пропуск сучасного колісного, гусеничного та залізничних навантажень по інвентарній конструкції наплавного залізничного мосту НЖМ–56, яка запроєктована за старими нормами по навантаженню.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гернич М. В., Ключник С. В. Використання майна наплавного мосту НЖМ–56 зважаючи на виклики військового сьогодення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 22. С. 27–32. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268185
2. *ГСТУ 32.6.03.111-2002. Експлуатація залізничних мостів. Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів*. [Чинний 2002-04-01]. Київ : Мінтранс України, 2002. 382 с.
3. *ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби.* [Чинний від 2010-03-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 83 с.
4. *ДБН В.2.3-19:2025. Залізниці колії 1520 мм. Норми проектування*. [Чинний від 2026-01-01]. Вид. офіц. Київ : М-во розвитку громад та територій України, 2025. 127 с.
5. *МР В.2.3-37641918-921:2021. Методичні рекомендації з визначення вантажопідйомності автодорожніх мостів*. [Чинний від 2021-12-03]. Київ : ДП «Національний інститут розвитку інфраструктури», 2021. 48 с.
6. *МР В.2.3-37641918-940:2024. Методичні рекомендації щодо проєктування та влаштування тимчасових автомобільних доріг і мостів.* [Чинний 2025-01-03]. Київ : ДП «НІРІ», 2025. 58 с.
7. Перепелиця К. М., Ключник С. В. Дослідження елементів понтонного мосту з огляду на сучасні виклики щодовантажопідйомності. *Наука та прогрес транспорту.* 2025. № 2(110). С. 154–164. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2025/332774
8. Телов В. И., Коблов И. Т., Тараканов И. Н., Новиков Г. И. *Наплавной железнодорожный мост НЖМ–56*. Главное управление железнодорожных войск. Москва : Воениздат, 1977. 344 с.
9. *ЦП-0093. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних мостах*. Наказ Укрзалізниці № 354-Ц від 10.06.2002 р. Головне управління колійного господарства Укрзалізниці, 2002. 301 с.
10. Chmielewski R., Piechota M., Bawiec B. Emergency use of a floating bridge within a large urban conurbation. *Engineering Expert.* 2020. No. 11. P. 24–34. DOI: https://doi.org/10.37105/enex.2020.1.1.04
11. *Military Load Classification of Bridges, Ferries, Rafts and Vehicles* (STANAG 2021 Ed. 8 / AEP-3.12.1.5). Brussels : NATO Standardization Office, 2017. 6 p.

K. M. PEREPELYTSIA[1*], D. S. SPIVAK[2]

[1*]Fac. of Military Training of the State Special Transport Service, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 738 54 25, e-mail kirill_perepelitsa@ukr.net, ORCID 0009-0006-4454-7237
[2]Research Center of the State Special Transport Services, Ukraine, tel. +38 (099) 200 07 64, e-mail d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

Methodology for Evaluating the Load-Carrying Capacity of Standardized Pontoon Bridge Structures

Purpose. The objective of this study is to develop approaches for the objective investigation of the inventory structure of the NZhM–56 floating railway bridge. It involves selecting a computational model for the floating bridge to facilitate further substantiated research into load-carrying capacity and formulating recommendations

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

for the deployment of NZhM–56 equipment to accommodate railway, vehicular, and tracked loads. **Methodology.** Variational modeling of NZhM–56 floating (pontoon) bridges using diverse configurations (varying in length and number of pontoon supports) for analysis via the influence line method. Analysis of the obtained results and substantiation of the bridge crossing computational model proposed for further research. Application of software implementing the Finite Element Method (FEM) to conduct the investigations. **Findings.** Development of approaches for recalculating the load-carrying capacity of inventory floating (pontoon) bridge systems using the finite element method. The study identifies the specific length and assembly configuration of the NZhM–56 floating bridge that exerts the greatest impact on internal forces generated under live loads. This configuration is selected for further research and for providing substantiated recommendations regarding live load passage. Furthermore, the most critical (unfavorable) scenarios and positions for live load placement have been proposed to investigate the stress-strain state of the structure. **Originality.** The scientific significance of this work lies in the selection of a methodology for recalculating the load-carrying capacity of floating (pontoon) bridge systems, specifically focusing on the NZhM–56 bridge. A comprehensive investigation is conducted into the relationship between the critical length, the assembly configuration of the NZhM–56 bridge, and the magnitude of internal forces generated under live loads. Furthermore, the research focuses on the specific behavior of the transition section of the pontoon bridge, analyzed both as an independent subsystem and in its structural interaction with the river (main) span elements. **Practical value.** Definition of approaches and methodologies for recalculating the load-carrying capacity of inventory floating (pontoon) bridge systems, necessitated by contemporary challenges. The research is aimed at ensuring the safe passage of temporary railway, tracked, and wheeled loads over the NZhM–56 floating bridge. Furthermore, the study identifies specific features of investigating floating bridge systems through the application of software implementing the Finite Element Method (FEM).

Keywords: floating (pontoon) bridges; critical length; assembly scheme; overcoming water obstacles; transport infrastructure functioning; Influence line method; variational modeling of floating systems; Finite Element Method (FEM)

REFERENCES

1. Hernich, M. V., & Kliuchnyk, S. V. (2022). Use of property of floating bridge NZHM-56 considering today's military challenges. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, *22*, 27-32. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268185 (in Ukrainian)
2. *Ekspluatatsiia zaliznychnykh mostiv. Pravyla vyznachennia vantazhopidiomnosti metalevykh prohonovykh budov zaliznychnykh mostiv, 382 HSTU 32.6.03.111-2002*. (2002). (in Ukrainian)
3. *Sporudy transportu. Navantazhennia ta vplyvy. Mosty ta truby, 83 DBN V.1.2-15:2009*. (2009). (in Ukrainian)
4. *Zaliznytsi kolii 1520 mm. Normy proektuvannia, 127 DBN V.2.3-19:2025.* (2025). (in Ukrainian)
5. *Metodychni rekomendatsii z vyznachennia vantazhopidiomnosti avtodorozhnikh mostiv, 48 MR V.2.3-37641918-921:2021*. (2021). (in Ukrainian)
6. *Metodychni rekomendatsii shchodo proiektuvannia ta vlashtuvannia tymchasovykh avtomobilnykh dorih i mostiv, 58 MR V.2.3-37641918-940:2024*. (2025). (in Ukrainian)
7. Perepelytsia, K. M., & Kliuchnyk, S. V. (2025). Research of Pontoon Bridge Elements in View of Modern Challenges in Terms of Load Capacity. *Science and Transport Progress, 2(110),* 154-164. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2025/332774 (in Ukrainian).
8. Telov, V. Y., Koblov, Y. T., Tarakanov, Y. N., & Novykov, H. Y. (1977). *Naplavnoi zheleznodorozhnыi most NZhM–56.* Moscow, Russia: Voenyzdat (in Russian)
9. *Instruktsiia z vyznachennia umov propusku rukhomoho skladu po metalevykh ta zalizobetonnykh mostakh, 301 TsP-0093*. (2002). (in Ukrainian)
10. Chmielewski, R., Piechota, M., & Bawiec, B. (2020). Emergency use of a floating bridge within a large urban conurbation. *Engineering Expert, 1,* 24-34. DOI: https://doi.org/10.37105/enex.2020.1.1.04 (in English)
11. *Military load classification of bridges, ferries, rafts and vehicles (STANAG 2021 Ed. 8 / AEP-3.12.1.5).* (2017). Brussels: NATO Standardization Office (in English)

Надійшла до редколегії: 11.11.2025
Дата рецензування: 21.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/353405
© К. М. Перепелиця, Д. С. Співак, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

УДК 625.42:624.166.8-027.28

К. Є. ФЕДОРОВ[1*]

[1*]Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 353 29 33, ел. пошта kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489

Обґрунтування конструкції станції метрополітену пілонного типу в скельних породах при варіюванні ширини пілонної частини

Мета. Автор ставить за мету провести чисельний аналіз методом скінченних елементів конструкції станції пілонного типу, що зводиться в скельних породах Новоавстрійським методом спорудження тунелів (NATM), й провести її обґрунтування під час варіювання ширини пілонної частини, визначивши залежності компонент напружено-деформованого стану. **Методика.** Визначено, що станція метрополітену пілонного типу, що досліджується, є конструкцією, яка має явну неоднорідність структури. Проведений детальний аналіз конструктивного рішення системи «пілон – прохід» станції метрополітену пілонного типу, що споруджується NATM. Обґрунтовано, що відображення неоднорідної структури станції метрополітену пілонного типу із відтворенням системи «пілон – прохід» є завданням математичного моделювання на основі методу скінченних елементів. За допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD розроблено скінченно-елементні моделі станції пілонного типу із варіюванням ширини пілонної частини. **Результати**. Отримано результати напружено-деформованого стану комбінованої оправи станції метрополітену пілонного типу за допомогою скінченно-елементних моделей із варіацією ширини пілону. Доведено, що для станції метрополітену пілонного типу при варіації ширини пілону $b_{піл}$ деформований стан залишається однорідним. Якісний аналіз шістьох компонент напружено-деформованого стану при варіації ширини пілону доводить, що вплив ширини пілону є локальним і загасає в околиці 1,0…1,2 м. Проаналізовані залежності є лінійними або поліноміальними відповідно для різних компонент напруженого й деформованого стану і дозволяють обґрунтувати ширину пілону, що забезпечує міцність станційної конструкції. **Наукова новизна** характеризується вперше отриманими залежностями напружено-деформованого стану комбінованої оправи станції метрополітену пілонного типу при варіації ширини $b_{піл}$. **Практична значимість** полягає в проведенні низки розрахунків під час математичного моделювання методом скінченних елементів із проведенням аналізу міцності станційної конструкції та наданням рекомендацій щодо вибору її розмірів.

Ключові слова: метрополітен; станція пілонного типу; скельні породи; напружено-деформований стан; метод скінченних елементів; Новоавстрійський метод спорудження тунелів

Вступ

Наукове обґрунтування підземних об’єктів має об’єктивно складний аналітичний перебіг, оскільки, наприклад, станція метрополітену пілонного типу є конструкцією, яка має неоднорідність структури [1, 2]. Саме наявність ослаблених ділянок, якими є проходи, й підсилених частин конструкції, якими є пілони (система «пілон – прохід»), потребує особливих підходів під час математичного моделювання, що направлені на відображення складної взаємодії станційної конструкції [6, 11].

Можливість створення в ході чисельного аналізу математичних моделей, що характеризуються складним й нерегулярнім розподілом деформаційних характеристик і, відповідно, неоднорідністю структури, дозволяє врахувати основні особливості конструкції станції метрополітену пілонного типу й трисклепінчастих підземних об’єктів взагалі [2, 10, 12]. Розрахункові комплекси, які використовуються під час чисельного аналізу, дозволяють таке врахування на етапі створення геометрії моделі (врахування структури трисклепінчастої станційної конструкції) із подальшим наданням різних деформаційних характеристик [6–8].

Система «пілон – прохід» в станції метрополітену пілонного типу, що зводиться в скельних породах Новоавстрійським методом спорудження тунелів (далі – NATM), є суцільною замкненою конструкцією, яка поєднана відповідно з комбінованою (тимчасовою і постійною) оправою бокового й середнього станційних тунелів. При цьому комбінована оправа обрамлює систему «пілон – прохід», тобто вся станційна конструкція є суцільною (рис. 1).

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

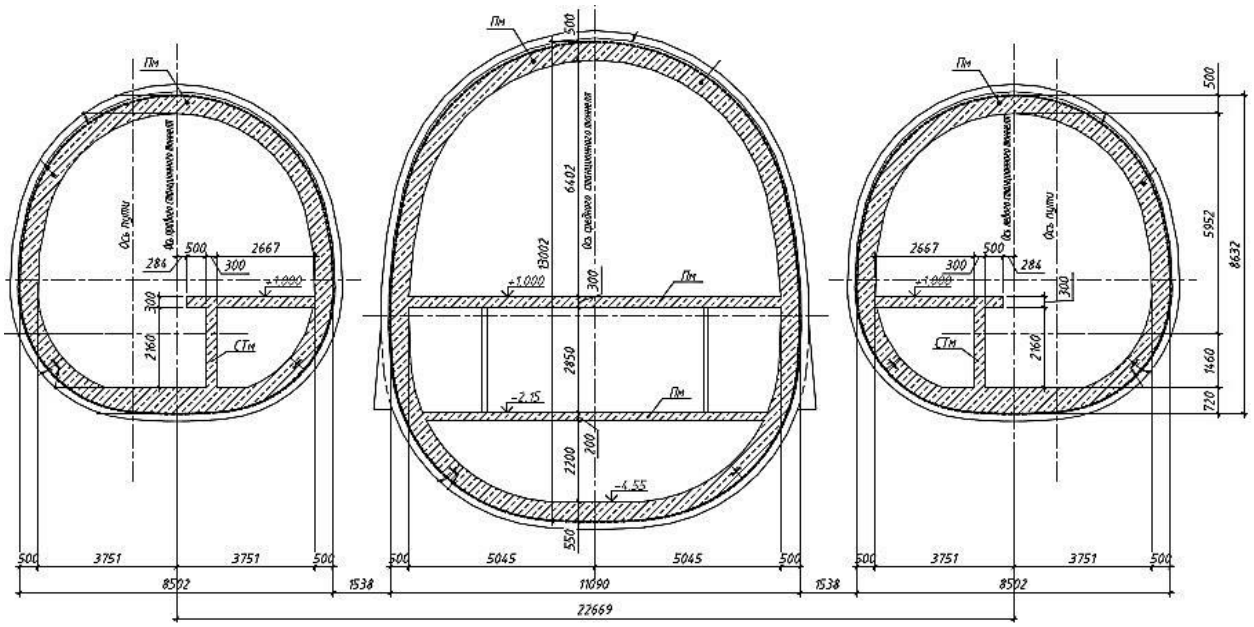


Рис. 1. Конструкція трисклепінчастої станції із монолітного бетону в дільниці пілону

Fig. 1. Construction of a three-arch station made of monolithic concrete in the pylon section

Не викликає сумнівів, що відображення неоднорідної структури станції метрополітену пілонного типу із відтворенням системи «пілон – прохід» є завданням математичного моделювання [3–5]. Причому після проведення чисельного аналізу змодельованих скінченно-елементних моделей потребується розгляд всіх компонент напруженого і найбільш характерних компонент деформованого стану [9]. Відсутність аналізу хоча б однієї компоненти напруженого стану не дозволяє зробити однозначний висновок про міцність комбінованого кріплення станції метрополітену пілонного типу під час варіювання ширини пілонної частини.

Більш детальний аналіз конструктивного рішення системи «пілон – прохід» станції метрополітену пілонного типу, що споруджується NATM в скельних породах, надає можливість свідчити, що його проєктна ширина навіть більше ніж ширина пілону, що був виконаний з ґрунту у варіанті станції із збірного чавуну ($b_{\text{піл}} = 4{,}5$ м) [1]. З позиції формування напружено-деформованого стану таке збільшення ширини пілону є позитивним тому, що він наближається до конструкції суцільної поздовжньої стіни. Таке рішення в конструкції станцій метрополітену глибокого закладення пілонного типу мало назву «глуха частина» і займало подекуди 2/3 довжини станції [1, 3]. Безсумнівно, для сучасних станцій така конструкція з позиції розподілу пасажиропотоку не є раціональною, оскільки на всю довжину станції влаштовувалося всього 5 пар проходів. Однак з огляду на розподіл компонент напружень й деформацій стіна між станційними тунелями ще активніше вивільнювала просторовий фактор і успішно розподіляла напружений стан, зменшуючи його інтенсивність.

Таким чином, збільшення ширини пілону в станції метрополітену пілонного типу, що споруджується NATM, є тим конструктивним рішенням, що, за можливості, слід зберегти. Проте, якщо розглядати таку конструкцію з ракурсу формування й розподілу пасажиропотоків, то при проході значної ширини, що більше регульованих значень (3,0…3,75 м), ширина пілону не є такою, що дозволяє успішно вирішити проблему комфортного заповнення платформи. Відомо, що чим пілон має менші розміри, тим пасажирам зручніше заповнювати бічні платформи й формувати однорідні пасажиропотоки в середньому залі й проходах [1]. Таким чином, для вирішення цієї практичної задачі слід змінити ширину пілону, зменшуючи її.

Другим важливим моментом, що визначено під час аналізу конструкцій станції метрополі-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

тену пілонного типу, є те, що у такої станції, котра споруджується NATM, і товщина пілону ($t_{піл}$ = 2,54 м) наближається до значень, що притаманні варіанту станції із збірного чавуну ($b_{піл}$ = 2,3 м), але менше товщини варіанту станції із збірного залізобетону ($b_{піл}$ = 3,2 м), в якій пілон є окремим залізобетонним елементом, що повністю замінює ґрунт оточуючого масиву. Такий вибір товщини пілону обґрунтовується досвідом спорудження Київського метрополітену, для котрого і була розроблена остання конструкція, однак пілон станції «Центральна» пов'язує в собі і досвід будівництва конструкцій станцій метрополітену, в яких серцевиною пілону є ґрунт оточуючого масиву (для міста Дніпра ним є міцний та міцний тріщинуватий плагіограніт).

Мета

Метою наукової статті є проведення чисельного аналізу методом скінченних елементів й обґрунтування конструкції станції метрополітену пілонного типу, що зводиться в скельних породах Новоавстрійським методом спорудження тунелів, під час варіювання ширини пілонної частини із визначенням залежностей компонент напружено-деформованого стану.

Методика

Для досягнення поставленої задачі було розроблено скінченно-елементну модель станції метрополітену пілонного типу у професійному розрахунковому комплексі Structure CAD.

Якщо охарактеризувати і плоску, і 3D-модель з позиції основних розрахункових схем, то вони відносяться до схеми, що базується на взаємному впливі деформацій. Ця схема, на відміну від схеми завданого навантаження, враховує не лише зміну внутрішніх зусиль в оправі й напружень в оточуючому масиві, а й їхнє деформування. Без сумнівів, моделі, що відносяться до схеми взаємного впливу деформацій при взаємодії елементів системи «станційна конструкція – оточуючий масив».

Найважливішим для схем, що базуються на взаємному впливі деформацій, є відтворення не тільки геометричних форм елементів системи «станційна конструкція – оточуючий масив», а присвоєння створеній геометрії деформаційних властивостей, що взяті із реальних випробувань гірських порід.

Проведено чисельний аналіз скінченно-елементної моделі мультифронтальним методом на поєднання навантажень, які притаманні наданій розрахунковій ситуації. Використано наступне поєднання з коефіцієнтами надійності за граничним навантаженням: 1,1 (власна вага та навантаження від навколишнього ґрунту) + 1,05 (тимчасове навантаження).

Прохід створений шляхом усунення частини схеми, має прямокутний обрис, при цьому розміри по висоті та ширині, а також геометричні параметри кріплення (верхня та нижня плити проходу) дотримані (рис. 2).

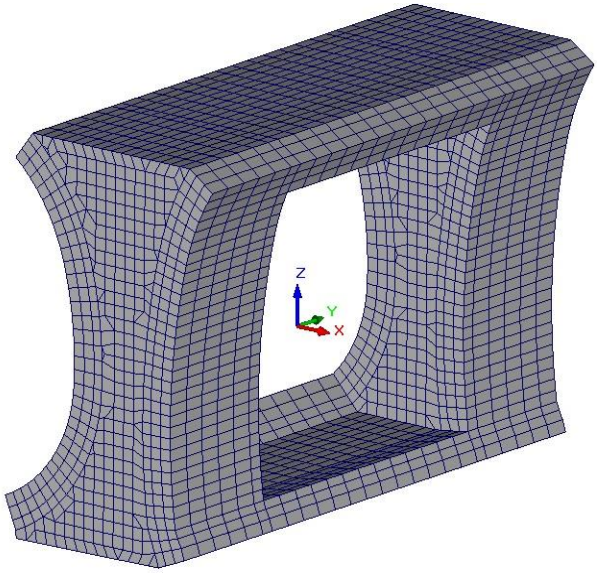


Рис. 2. Фрагмент скінченно-елементної моделі – система «пів пілона – прохід – пів пілона»

Fig. 2. Fragment of the finite element model – the system «half-pylon – passage – half-pylon»

Жорсткість загальної системи, що зменшиться по причині зменшення площі пілону, може призвести до того, що просторовий фактор в станції метрополітену пілонного типу не вивільниться повною мірою й розподіл напружень та деформацій не буде задовільним. Для того, щоб з'ясувати вплив жорсткості пілону на зміну напружено-деформованого стану до вже розрахованої моделі із проєктною шириною пілону розроблені й розраховані скінченно-елементні моделі із такими значеннями ширини

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

пілону: 4,65 м; 2,79 м; 1,86 м тобто $2/3b_{піл}$, $1/2b_{піл}$ й $1/3b_{піл}$ від проєктної ширини $b_{піл}$, що складає 5,58 м.

Результати

Перед тим, як перейти до аналізу результатів напружено-деформованого стану комбінованої оправи станції метрополітену пілонного типу для проєктної ширини пілону $b_{піл}$, що складає 5,58 м, слід відмітити, що для отримання залежностей переміщень й напружень їх доповнено результатами чисельного аналізу скінченно-елементних моделей з варіацією $b_{піл}$, але для економії місця не всі компоненти наведено, але всі проаналізовано.

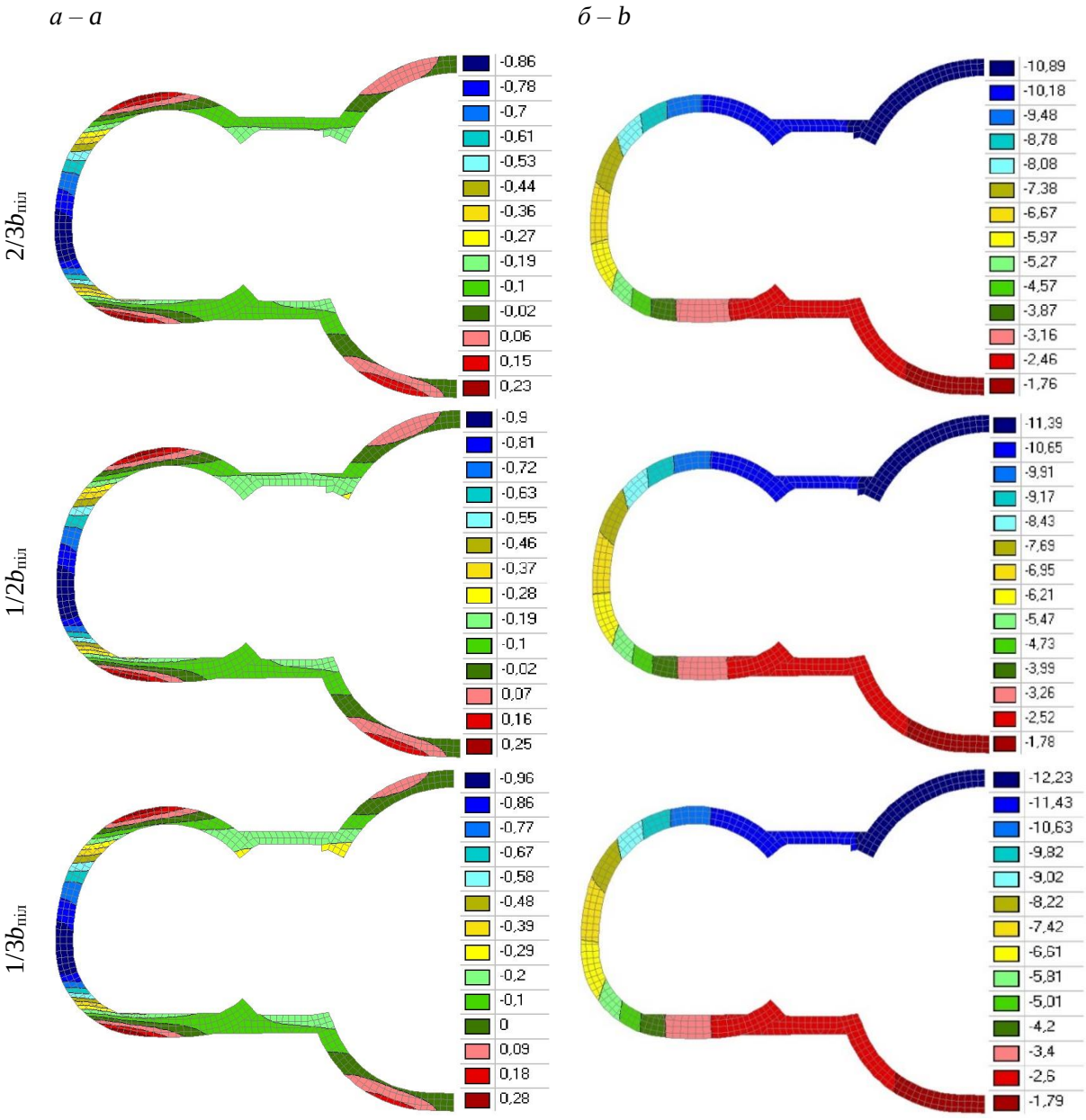


Рис. 3. Ізолінії та ізополя горизонтальних (*а*) і вертикальних (*б*) переміщень (мм) в місці проходу при варіації ширини пілону $b_{піл}$

Fig. 3. Isolines and isofields of horizontal (*a*) and vertical (*b*) displacements (mm) at the passage location with variation of the pylon width b_{pyl}

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Якісний аналіз компонент переміщень (рис. 3) свідчить про те, що розподіл ізоліній та ізополів майже ідентичний і дозволяє провести кількісний аналіз в повній мірі. Як і для станції метрополітену пілонного типу з проєктною шириною пілону $b_{піл}$, у випадку варіації цього параметру деформований стан залишається однорідним, що демонструє розподіл наведених ізополів. Цей факт доводить те, що навіть при зменшенні ширини пілону його жорсткість залишається достатньою для вивільнення просторового фактору і формування однорідного деформованого стану.

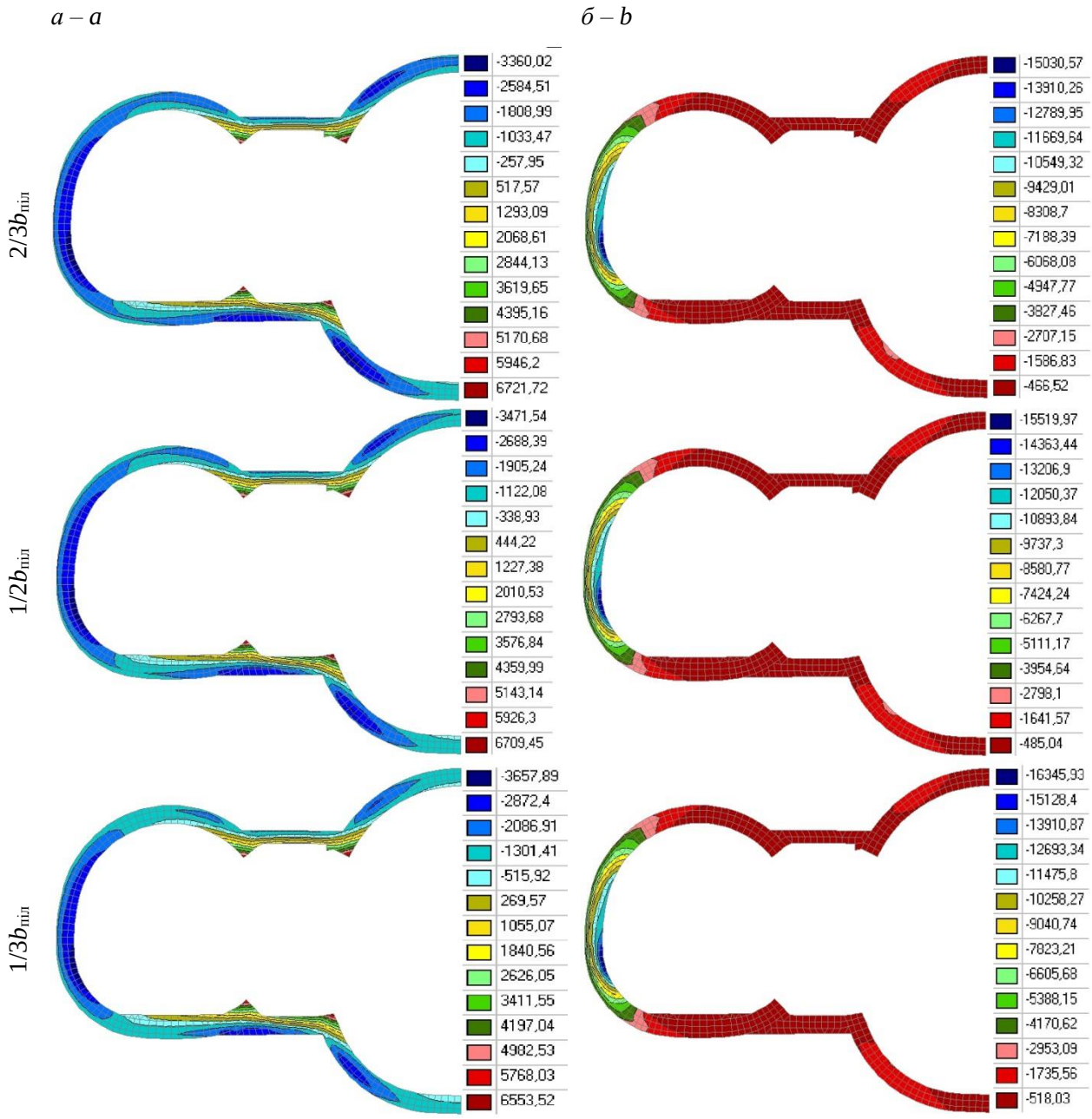


Рис. 4. Ізолінії та ізополя поздовжніх (*а*) й вертикальних (*б*) нормальних напружень (кН/м^2) в місці проходу при варіації ширини пілону $b_{піл}$

Fig. 4. Isolines and isofields of longitudinal (*a*) and vertical (*b*) normal stresses (kN/m^2) at the passage location with variation of the pylon width b_{pyl}

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Якісний аналіз нормальних напружень за трьома компонентами надає можливість стверджувати, що в місці проходу розподіл ізоліній та ізополів майже ідентичний, а у пілонній частині має явні відмінності (рис. 4). Особливо ці відмінності явно виражені у поздовжній та вертикальній компонентах нормальних напружень, причому зміни форми ізополів спостерігаються відповідно в тілі пілону (поздовжнє нормальне напруження, вісь Y) й частині оправи, що межує з пілоном (вертикальне нормальне напруження, вісь Z).

Найбільш характерним в перерозподілі вертикальної компоненти нормальних напружень є значна зміна форм концентраторів. Безсумнівно, очікувалося, що зміна жорсткості пілону внаслідок варіації зміни його ширини призведе до перерозподілу компонент напружено-деформованого стану. Проте характер зміни ізоліній та ізополів не міг бути передбачуваним, що ілюструється отриманими результатами, які в якісному плані доводять досить значний вплив жорсткості на деякі компоненти напруженого стану, наприклад, дотичних напружень, розподіл яких демонструє зміну як форми, так і розташування концентраторів.

Якісний аналіз шістьох компонент напружено-деформованого стану при варіації ширини пілону і, відповідно, його жорсткості доводить, що зміна розміру цього важливого елементу станційної конструкції є мінімальною для місця проходу. Тобто вплив пілону є локальним і загасає в околиці 1,0…1,2 м, якісно не впливаючи на розподіл напружень й переміщень в проході. Для пілонної ж частини вплив пілону та варіації його ширини є визначальним для формування напружено-деформованого стану станційної конструкції із комбінованою оправою бокового й станційного тунелів.

Характер перерозподілу ізоліній та ізополів напружень потребує кількісного аналізу по компонентам, а не тільки еквівалентних напружень для з’ясування міцності. Проведено аналіз компонент напруженого станів у відповідності до розташування концентраторів напружень у кріпленні станції метрополітену пілонного типу в пілонній частині та місці проходу. Однак, для економії місця, обрано не всі точки концентрації, а ті, в яких зміна напруженого стану є явно вираженою.

На основі отриманих даних побудовано графіки залежностей переміщень (рис. 5) та нормальних (рис. 6–7) напружень, які демонструють кількісні зміни напружено-деформованого стану при варіації ширини пілону $b_{піл}$.

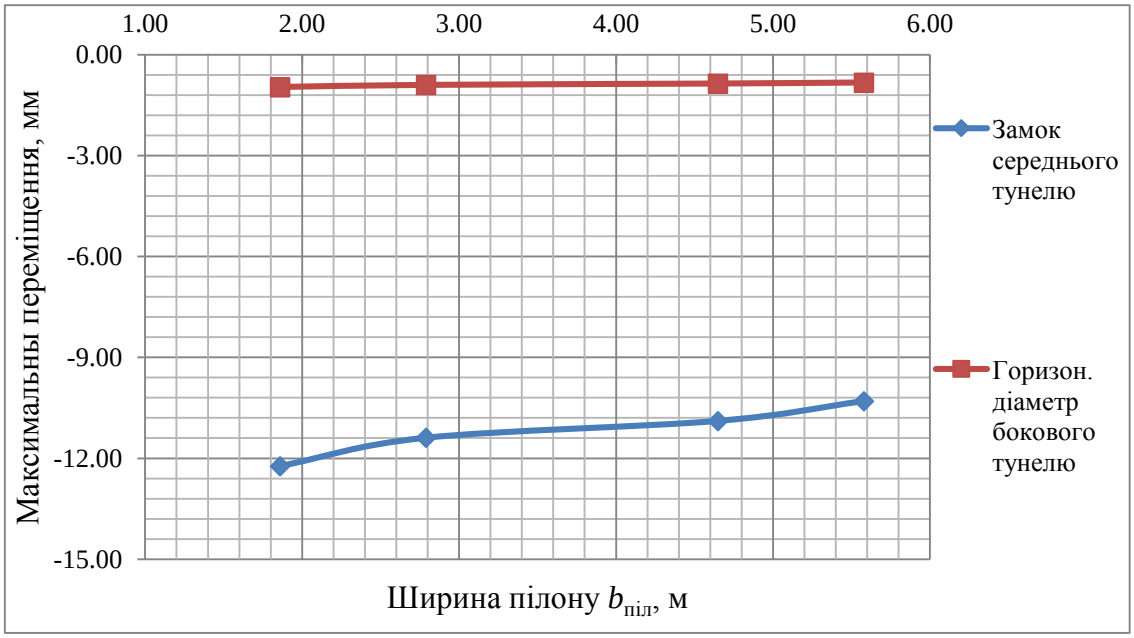


Рис. 5. Залежності максимальних переміщень при варіації ширини пілону $b_{піл}$

Fig. 5. Dependences of maximum displacements with variation of the pylon width b_{pyl}

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

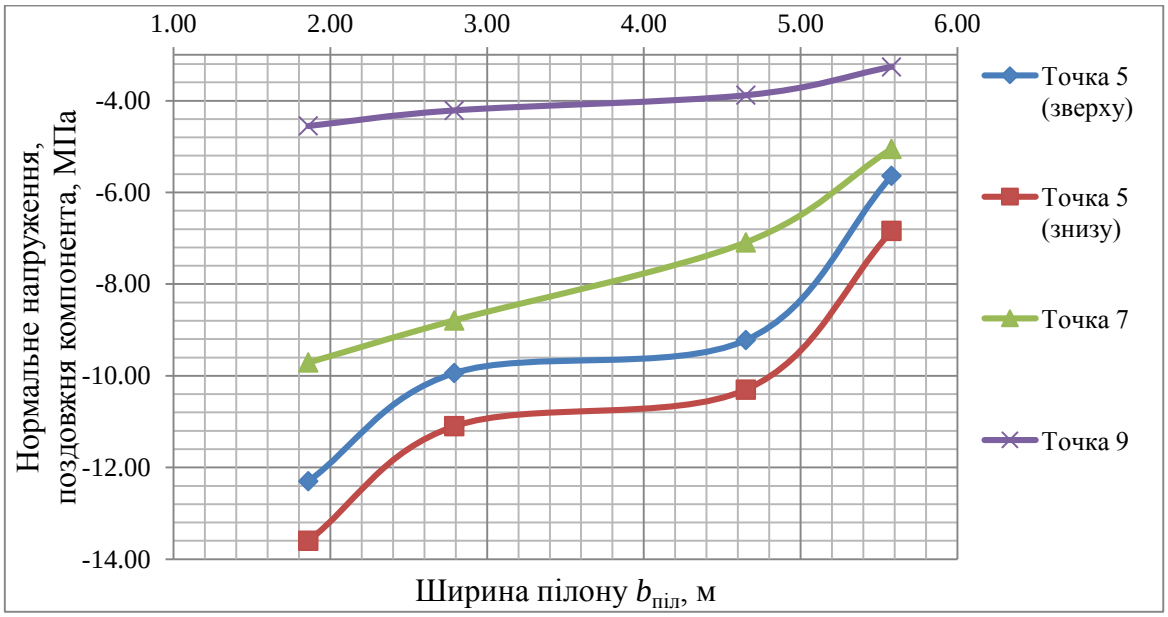


Рис. 6. Залежності нормальних напружень (поздовжня компонента) в точках-концентраторах при варіації ширини пілону bпіл

Fig. 6. Dependences of normal stresses (longitudinal component) at concentrator points with variation of the pylon width bpyl

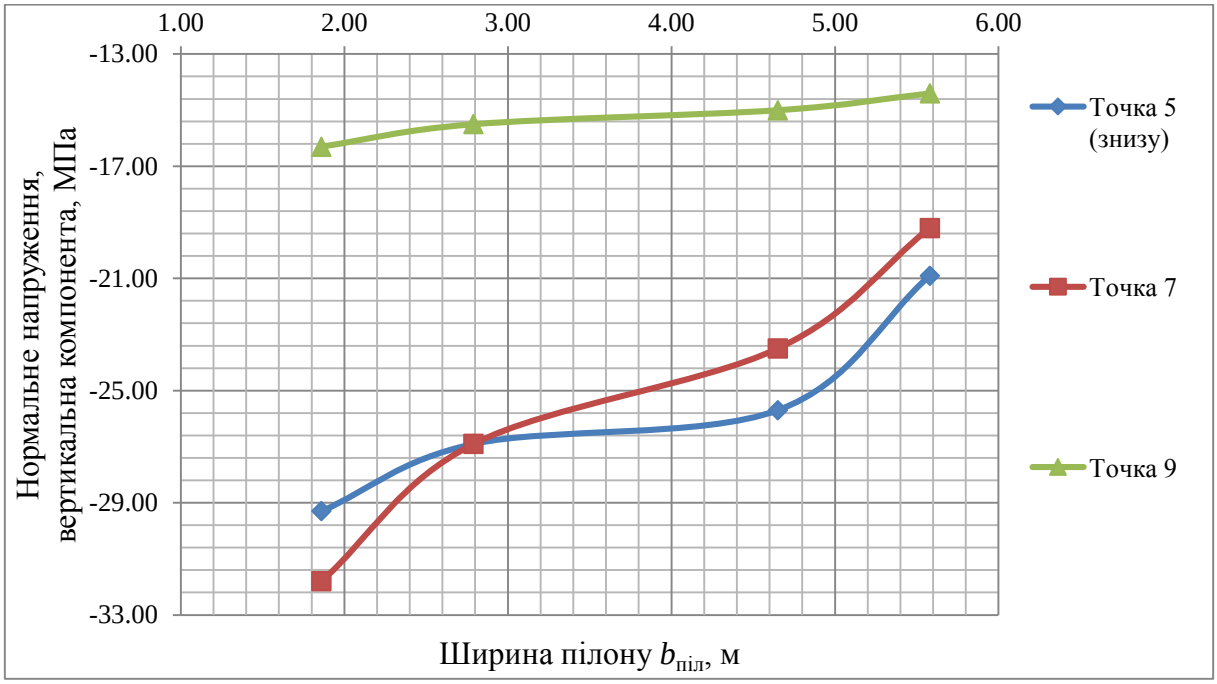


Рис. 7. Залежності нормальних напружень (вертикальна компонента) в точках-концентраторах при варіації ширини пілону $b_{піл}$

Fig. 7. Dependences of normal stresses (vertical component) at concentrator points with variation of the pylon width b_{pyl}

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

Аналіз залежностей деформованого стану від ширини пілону $b_{піл}$ (чотири розрахункові випадки: проєктна ширина $b_{піл}$, що складає 5,58 м; зменшені значення ширини 4,65 м ($2/3b_{піл}$); 2,79 м ($1/2b_{піл}$); 1,86 м ($1/3b_{піл}$) ще раз доводить, що варіація властивостей оточуючого масиву або варіація жорсткості елементів конструкції станції метрополітену пілонного типу викликає рівномірну зміну компонент переміщень.

Про це свідчить характер графіків залежностей (рис. 5), які є монотонними, без наявних стрибків або різких змін напрямку розвитку функцій. З високим ступенем апроксимації (R^2 = 0,95…0,98) тренди функцій максимальних вертикальних переміщень в замку середнього тунелю та максимальних горизонтальних переміщень на горизонтальному діаметру бокового тунелю є лінійними. Відповідно, варіація властивостей оточуючого масиву та елементів конструкції залишає деформований стан однорідним, змінюючи його поступово й незначно.

Переходячи до аналізу залежностей нормальних напружень (рис. 6-7), слід відмітити, що в концентраторах, котрі знаходяться на поверхні бокового тунелю (точки 8 (зверху), 8 (знизу) й точка 9), як і для компоненти деформованого стану, для компонент напруженого характер розподілу є монотонним, а тренди функцій з високим ступенем апроксимації (R^2 = 0,97…0,98) є лінійними. Це доводить той факт, що вже було відмічено, а саме локальний вплив пілону в околиці 1,0…1,2 м в проході, а також виключно незначну кількісну зміну напружень (не більше ніж 3…10 % в залежності від зменшення ширини $b_{піл}$), що змінюються поступово.

Кардинально іншою є картина розподілу компонент нормальних напружень в концентраторах, котрі знаходяться на поверхні комбінованої оправи, що обрамляє пілон. Для залежностей нормальних напружень від ширини пілону трендом функцій з високим ступенем апроксимації (R^2 = 0,97…0,99) є поліном третього порядку ($\sigma = a \cdot b_{піл}^3 - b \cdot b_{піл}^2 + c b_{піл} - d$) (рис. 6–7). Характерною особливістю цього поліному є немонотонна хвилеподібна зміна напружень із певним майданчиком, що має більш монотонний характер і розташовується між значеннями ширини пілону 4,65 м ($2/3b_{піл}$) й 2,79 м ($1/2b_{піл}$). Тобто від значення проєктної ширини пілону $b_{піл}$ (5,58 м) до зменшеної 4,65 м ($2/3b_{піл}$) графік має значну зміну напружень за всіма компонентами, потім, від ширини пілону 4,65 м ($2/3b_{піл}$) до 2,79 м ($1/2b_{піл}$), графік демонструє знижену інтенсивність збільшення напружень, яка стрімко збільшується на ділянці від 2,79 м ($1/2b_{піл}$) до 1,86 м ($1/3b_{піл}$).

Таким чином, результати аналізу залежностей компонент нормальних напружень свідчать про те, що їхній розподіл в залежності від варіації ширини пілону характеризується стрімким збільшенням значення від $b_{піл}$ до $2/3b_{піл}$, які потім дещо менш інтенсивні на дільниці від $2/3b_{піл}$ до $1/2b_{піл}$ і отримують прогресування на дільниці від $1/2b_{піл}$ до $1/3b_{піл}$. Це дає можливість, обґрунтовуючи розмір пілону як елементу станційної конструкції, зробити однозначний висновок, що не треба зменшувати ширину пілону менше, ніж значення 2/3 від проєктної ширини $b_{піл}$.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна виконаного дослідження характеризується отриманими вперше залежностями напружено-деформованого стану комбінованої оправи станції метрополітену пілонного типу при варіації ширини пілону $b_{піл}$. Проаналізовані залежності є лінійними або поліноміальними відповідно для різних компонент напруженого й деформованого стану і дозволяють обґрунтувати ширину пілону, що забезпечує міцність станційної конструкції.

Практична значимість полягає в проведенні низки розрахунків під час математичного моделювання методом скінченних елементів із проведенням аналізу міцності станційної конструкції та наданням рекомендацій щодо вибору її розмірів.

Висновки

У статті наведено результати чисельного аналізу конструкції станції пілонного типу під час варіювання ширини пілонної частини. Проаналізовано конструкції системи «пілон – прохід» й розроблені скінченно-елементні моделі із варіацією значення ширини пілону: 4,65 м; 2,79 м; 1,86 м тобто $2/3b_{піл}$, $1/2b_{піл}$ й $1/3b_{піл}$ від проєктної ширини $b_{піл}$ = 5,58 м. З'ясовано, що

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

вплив пілону є локальним і загасає в околиці 1,0…1,2 м, якісно не впливаючи на розподіл напружень й переміщень в проході, при цьому деформований стан є однорідним.

На основі отриманих результатів обґрунтовано, що суттєве зменшення ширини пілону для станції метрополітену, котра споруджена в скельних породах за допомогою NATM, нераціональне з позиції напруженого стану. Обґрунтована ширина пілону знаходиться в межах $b_{\text{піл}} = 5{,}15…5{,}58$ м і не може бути зменшена по причині появи еквівалентних напружень, що перевищують міцність торкрет-бетону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тютькін О. Л. *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій* : монографія. Дніпро : Журфонд. 2020. 187 с.
2. Федоров К. Є., Тютькін О. Л. Критичний аналіз методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 26. С. 104–112. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315520
3. Федоров К. Є., Тютькін О. Л. Математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 4(112). С. 200–209. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2025/343192
4. Ding D. Y., Yang X. R., Lu W. D., Liu W. N., Yan M., Li A. M. Numerical analysis of metro station construction by large-diameter shield and pile-beam-arch method. *Advanced Materials Research*. 2012. Vols. 368–373. P. 2711–2715. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.368-373.2711
5. Fung I. W., Wang J. A., Au A. S., Zhou Y. F. Three-dimensional numerical analysis of stress and deformation of surrounding soil in safety construction of metro station. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. Vol. 96. P. 012121. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/96/1/012121
6. Jiang C., Tiutkin O. L., Chen Z., Chen Z. Analytical regularities of force factors in the lining of a three-vaulted metro station with variation of the elastic resistance coefficient of the rock. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*. 2025. Vol. 27. P. 70–77. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333785
7. Li H., Wei R., Zhu H., Jia C., Shang H., Wang X., Li S., Shi G. Numerical analysis of excavation stability of transfer station of Jinan Metro. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 632, Iss. 2. P. 022019. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/2/022019
8. Li Y., Jin X., Lv Z., Dong J., Guo J. Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 56. P. 22–33. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016
9. Yan M., Ding D. Y., Yang X. R., Yang X. R., Lu W. D., Liu W. N., Li A. M. 3D numerical analysis of metro station by PBA method to enlarge existing large-size shield tunnel. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vols. 170–173. P. 1673–1678. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.170-173.1673
10. Yanjuan H., Dingli Z., Ran L., Xu C., Weiwei Q. Calculation method for surrounding rock pressure of deeply buried triple-arch tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024. Vol. 56, Iss. 11. P. 3213–3226. DOI: http://doi.org/10.6052/0459-1879-24-015
11. Zhang J.-L., Liu X., Zhao J.-B., Yuan Y., Mang H. Application of a combined precast and in-situ-cast construction method for large-span underground vaults. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 111. 103795. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103795
12. Zhou M., Chen J., Huang H., Zhang D., Zhao S., Shadabfar M. Multi-source data driven method for assessing the rock mass quality of a NATM tunnel face via hybrid ensemble learning models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. Vol. 147. 104914. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104914

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2026, № 1 (113)

K. YE. FEDOROV[1*]

[1*]Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 353 29 33, e-mail kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489

Substantiation of the Design of a Pylon-Type Metro Station in Rock Formations with Varying the Width of the Pylon Part

Purpose. The author aims to conduct a numerical analysis using the finite element method of the structure of a pylon-type station, which is being built in rock formations using the New Austrian tunneling method (NATM), and to conduct its substantiation when varying the width of the pylon part, determining the dependences of the components of the stress-strain state. **Methodology.** It was determined that the pylon-type metro station under study is a structure that has obvious structural heterogeneity. A detailed analysis of the structural solution of the «pylon – passage» system of a pylon-type metro station constructed by NATM was conducted. It was substantiated that the reflection of the heterogeneous structure of a pylon-type metro station with the reproduction of the «pylon – passage» system is a task of mathematical modeling based on the finite element method. Using the professional calculation complex Structure CAD, finite element models of a pylon-type station with varying the width of the pylon part were developed. **Findings.** The results of the stress-strain state of the combined lining of a pylon-type metro station were obtained using finite element models with varying the pylon width. It is proven that for a pylon-type metro station with varying the pylon width b_{pyl}, the deformed state remains homogeneous. Qualitative analysis of the six components of the stress-strain state with variation in the pylon width proves that the effect of the pylon width is local and decays in the vicinity of 1.0 … 1.2 m. The analyzed dependencies are linear or polynomial, respectively, for different components of the stress and strain state and allow us to justify the width of the pylon, which ensures the strength of the station structure. **Originality** is characterized by the first-ever obtained dependences of the stress-strain state of the combined lining of the pylon-type metro station with variations in the width b_{pyl}. **Practical value** lies in carrying out a series of calculations during mathematical modeling by the finite element method with the analysis of the strength of the station structure and the provision of recommendations for the selection of its dimensions.

Keywords: metro; pylon-type station; rock formations; stress-strain state; finite element method; New Austrian tunneling method

REFERENCES

1. Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruktsii*: monohrafiia. Dnipro : Zhurfond (in Ukrainian)
2. Fedorov, K. Ye., & Tiutkin, O. L. (2024). Critical Analysis of Methods for Calculating the Stress-Strain State ofthe Pylon-Type Metro Station Structure. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice, 26*, 104-112. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315520 (in Ukrainian)
3. Fedorov, K. Ye., & Tiutkin, O. L. (2025). Mathematical Modeling of the Pylon-Type Metro Station Design Based on Numerical Analysis. *Science and Transport Progress*, (*4*(112), 200-209. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2025/343192 (in Ukrainian)
4. Ding, D. Y., Yang, X. R., Lu, W. D., Liu, W. N., Yan, M., & Li, A. M. (2012). Numerical analysis of metro station construction by large-diameter shield and pile-beam-arch method. *Advanced Materials Research, 368-373*, 2711-2715. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.368-373.2711 (in English)
5. Fung, I. W., Wang, J. A., Au, A. S., & Zhou, Y. F. (2008). Three-dimensional numerical analysis of stress and deformation of surrounding soil in safety construction of metro station. *Journal of Physics: Conference Series, 96*, 012121. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/96/1/012121 (in English)
6. Jiang, C., Tiutkin, O. L., Chen, Z., & Chen, Z. (2025). Analytical regularities of force factors in the lining of a three-vaulted metro station with variation of the elastic resistance coefficient of the rock. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice, 27*, 70-77. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333785 (in English)
7. Li, H., Wei, R., Zhu, H., Jia, C., Shang, H., Wang, X., Li, S., & Shi, G. (2021). Numerical analysis of excavation stability of transfer station of Jinan Metro. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 632*(2), 022019. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/2/022019 (in English)
8. Li, Y., Jin, X., Lv, Z., Dong, J., & Guo, J. (2016). Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology, 56*, 22-33. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

9. Yan, M., Ding, D. Y., Yang, X. R., Yang, X. R., Lu, W. D., Liu, W. N., & Li, A. M. (2012). 3D numerical analysis of metro station by PBA method to enlarge existing large-size shield tunnel. *Applied Mechanics and Materials*, *170-173*, 1673-1678. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.170-173.1673 (in English)
10. Yanjuan, H., Dingli, Z., Ran, L., Xu, C., & Weiwei, Q. (2024). Calculation method for surrounding rock pressure of deeply buried triple-arch tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, *56*(11), 3213-3226. DOI: http://doi.org/10.6052/0459-1879-24-015 (in English)
11. Zhang, J.-L., Liu, X., Zhao, J.-B., Yuan, Y., & Mang, H. (2021). Application of a combined precast and in-situ-cast construction method for large-span underground vaults. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *111*, 103795. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103795 (in English)
12. Zhou, M., Chen, J., Huang, H., Zhang, D., Zhao, S., & Shadabfar, M. (2021). Multi-source data driven method for assessing the rock mass quality of a NATM tunnel face via hybrid ensemble learning models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *147*, 104914. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104914 (in English)

Надійшла до редколегії: 12.11.2025
Дата рецензування: 17.12.2025
Дата публікації: 27.03.2026

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2026/351391
© К. Є. Федоров, 2026

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

К. В. ГОНЧАРОВ, Р. В. РИБАЛКА, Т. М. СЕРДЮК
Застосування згорткової нейронної мережі для класифікації кодів автоматичної локомотивної сигналізації 5

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

М. М. БІЛЯЄВ, А. О. ЧІРКОВ
Ієрархія математичних моделей для розрахунку аеротенків..... 17

В. В. БІЛЯЄВА, О. І. ГУБІН, Ю. В. БРАЗАЛУК
Чисельне дослідження процесу затвердіння тонкого покриття на поверхні тіла..... 24

П. С. КІРІЧЕНКО, В. В. САВІН, В. А. КОЗАЧИНА, П. Б. МАШИХІНА, В. В. КОЗАЧИНА
Оптимізація енергоспоживання насосного обладнання ВНС шляхом підбору сучасних насосів 34

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

І. Е. МАРТИНОВ, А. В. ТРУФАНОВА, В. О. ШОВКУН, М. В. ДМИТРЕНКО, О. О. БАЛАШОВ
Аналіз пошкоджень кузовів залізничних напіввагонів 43

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

А. М. АФАНАСОВ, С. В. КОНЧАНІН, Р. Д. ГОЛОВКО
Моделювання процесу буксування колісної пари електровоза 52

В. М. КОВАЛЬОВ
Аналіз енергоефективності тягових електродвигунів магістральних електровозів..... 64

С. В. РОЙ, Є. С. РЯБОВ
Визначення параметрів plug-in гібридної енергетичної установки маневрово-вивізного локомотиву для промислових підприємств 73

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

М. Б. КУРГАН, Р. В. ІВАНОВ
Комплексна оцінка небезпеки перетинів в одному рівні залізниці й автомобільної дороги з урахуванням когнітивного фактору..... 85

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

О. П. ІВАНОВ, І. М. ДЕМИДОВИЧ
Сучасні засоби підвищення якості навчання з застосуванням онлайн-системи обліку навантаження та успішності студентів..... 96

Д. О. КАРПОВСЬКИЙ
Методи та засоби рефакторингу онтологій 105

О. І. ЛЕТУЧИЙ
Визначення експериментальної обчислювальної складності реалізації просторових графових фракталів засобами конструктивно-продукційного моделювання 119

М. Б. НАМАЗОВ, М. Е. РАХІМОВ
Розробка гібридної системи оцінювання на основі нечіткої логіки та SHAP для прогнозування банківських депозитів у банківському секторі 128

В. І. ШИНКАРЕНКО, В. О. МАСЛЮК, А. В. СТАДНІК
Визначення фрактальної розмірності часткових геометричних фракталів.....141

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А. Я. КУЗИШИН
Дослідження вертикальної динаміки електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» в умовах швидкісного руху.....148

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Д. О. БАННІКОВ, І. М. БАКАН
Експериментальна оцінка міцності та деформативності сталевих цвяхів для дерев'яних конструкцій 159

Г. П. ІВАНОВА, В. В. ЯНКО, Н. В. ХОЗЯЙКІНА
Епістемологічна неоднозначність графічної інформації у будівельному та кресленні та її вплив на процес проєктування та реалізації будівельних об'єктів 171

В. І. КРИСАН, В. В. КРИСАН, О. І. ДУБІНЧИК, М. В. МАЗУРЕНКО
Аналіз результатів лабораторних випробувань пружних властивостей ґрунтоцементу 178

К. М. ПЕРЕПЕЛИЦЯ, Д. С. СПІВАК
Методика оцінювання несучої здатності інвентарних конструкцій наплавних мостів.....186

К. Є. ФЕДОРОВ
Обґрунтування конструкції станції метрополітену пілонного типу в скельних породах при варіюванні ширини пілонної частини 201

CONTENTS

AUTOMATED AND TELEMATIC SYSTEMS ON TRANSPORT

K. V. HONCHAROV, R. V. RYBALKA, T. M. SERDIUK
Application of Convolutional Neural Network for Classification of Automatic Cab Signalling Codes 5

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

M. M. BILIAIEV, A. O. CHIRKOV
Hierarchy of Mathematical Models for Calculating Aeration Tanks 17

V. V. BILIAIEVA, O. I. GUBIN, IU. V. BRAZALUK
Numerical Study of the Solidification Process of a Thin Coating on a Body Surface 24

P. S. KIRICHENKO, V. V. SAVIN, V. A. KOZACHYNA, P. B. MASHYKHINA, V. V. KOZACHYNA
Optimization of Energy Consumption of Pumping Equipment of the WPS by Selecting Modern Pumps..... 34

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

I. E. MARTYNOV, A. V. TRUFANOVA, V. N. SHOVKUN, M. V. DMITRENKO, O. O. BALASHOV
Analysis of Damage to Railway Gondola Bodies..... 43

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

A. M. AFANASOV, S. V. KONCHANIN, R. D. GOLOVKO
Simulation of the Wheel Pair Slip Process in an Electric Locomotive 52

V. M. KOVALOV
Energy Efficiency Analysis of Traction Motors of Mainline Electric Locomotives..... 64

S. V. ROI, YE. S. RIABOV
Determination of Parameters for Plug-in Hybrid Power Plant for a Shunting and Haulage Locomotive for Industrial Enterprises..... 73

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

M. B. KURHAN, R. V. IVANOV
Comprehensive Hazard Assessment of Railway–Road Level Crossings Considering the Cognitive Factor 85

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING

O. P. IVANOV, I. M. DEMIDOVICH
Modern Means of Improving the Education Quality Using an Online System for Recording Student Workload and Performance 96

D. O. KARPOVSKYI
Methods and Tools for Refactoring Ontologies..... 105

O. I. LETUCHYI
Determination of the Experimental Computational Complexity of Formation of Spatial Graph Fractals Using Constructive-Synthesizing Modelling..... 119

M. B. NAMAZOV, M. E. RAHIMOV
Development of a Hybrid Fuzzy Logic and SHAP-Based Evaluation Framework for the Prediction of Bank Deposits in the Banking Sector..... 128

V. I. SHYNKARENKO, V. O. MASLIUK, A. V. STADNIK
Determination of Fractal Dimension of Partial Geometric Fractals 141

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

A. YA. KUZYSHYN
Investigation of the Vertical Dynamics of the EKr–1 «Tarpan» Electric Train Under High-Speed Operating Conditions 148

TRANSPORT CONSTRUCTION

D. O. BANNIKOV, I. M. BAKAN
Experimental evaluation of Strength and Deformability of Steel Nails for Wooden Structures 159

H. P. IVANOVA, V. V. YANKO, N. V. KHOZIAIKINA
Epistemological Ambiguity of Graphic Information in Construction and Drawing and its Impact on the Process of Designing and Implementing Construction Projects 171

V. I. KRYSAN, V. V. KRYSAN, O. I. DUBINCHYK, M. V. MAZURENKO
Analysis of Laboratory Test Results of Elastic Properties of Soil Cement 178

K. M. PEREPELYTSIA, D. S. SPIVAK
Methodology for Evaluating the Load-Carrying Capacity of Standardized Pontoon Bridge Structures 186

K. YE. FEDOROV
Substantiation of the Design of a Pylon-Type Metro Station in Rock Formations with Varying the Width of the Pylon Part 201

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету**;
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть пропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість**. Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання**;**
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Наукова бібліотека (ауд. 166),
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: http://stp.ust.edu.ua/

Для нотаток

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.

№ 1 (113) 2026
(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова
Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Формат 60×84 1/8. Ум. друк. арк. 25,11. Тираж 100 пр. Зам. №02/01

Український державний університет науки і технологій
Адреса редакції, видавця:
вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна
Тел.: +38 (056) 371-51-05
E-mail: stp.journal@ust.edu.ua
Друк:
Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.

♦ ♦ ♦ ♦ ♦

Scientific Edition

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 1 (113) 2026
(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova
Desktop publishing – O. V. Pominova

Format 60×84 1/8. Conventional printed sheet 25,11. Circulation 100. Order no. 02/01

Ukrainian State University of Science and Technologies
Address of editor and editorial office
Lazaryan St.,2, r.267, Dnipro, 49010, Ukraine
Tel.: +38 (056) 371-51-05
E-mail: stp.journal@ust.edu.ua
Printing
Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online) | Наука та прогрес транспорту. 2026. № 1 (113). 1-216