



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ  
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

*Випуск 214*

**Харків 2025**

## **УДК 656.2(062)**

У Збірнику наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних завдань і проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, здобувачів вищої освіти і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: <https://bit.ly/3vVHlv3>.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті <http://jml2012.indexcopernicus.com>.

**Google Scholar профіль:** <https://scholar.google.com.ua>

**Веб-сторінка збірника:** <https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt>

### **Реферативна база**

**«Наукова періодика України»:** <http://csw.kart.edu.ua>

**ISSN (p) 1994-7852**

**ISSN (online) 2413-3795**

Суб'єкт у сфері друкованих медіа R30-06150, за рішенням № 948 Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення, протокол № 11 від 01 травня 2025 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 13 від 26 грудня 2025 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

ISSN 1994-7852

Зареєстровано 2 червня 2007 р.

у ISSN International Centre 20. Rue  
Bachaumont, 75002 PAPIS, FRANCE

© Український державний університет  
залізничного транспорту, 2025.

**Редакційна колегія**

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, дійсний член (академік) НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ  
Видавничий редактор – Харін Руслан Олександрович, УкрДУЗТ

**Залізничний транспорт (273)**

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)  
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)  
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Мартинів І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Vureika G., dsc, professor (VG TU, Литва)  
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ловська А. О., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)

**Будівництво та цивільна інженерія (192)**

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор  
(НУ Львівська політехніка)  
Борзяк О. С., д.т.н., професор (Західнопомор.  
технол. ун-т, Щецин, Польща)  
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (ХНУМГ)  
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)  
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)  
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)  
Русінська Т., д.т.н., професор, Західнопомор.  
технол. ун-т (Щецин, Польща)  
Веньжон Жу, доцент, Університет Західної  
Шотландії)  
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Механічна інженерія (131, 132, 133)**

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)  
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (Tohoku  
University, Японія)  
Dittrich A., PhD, University of Liberec (Czech  
Republic)

**Транспортні технології (275)**

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ДБТУ)  
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)  
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)  
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Геодезія та землеустрій (193)**

Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Eimuntas Paršeliūnas, д.т.н., професор  
(Вільнюський техн. ун-т ім. Гедімінаса, Литва)  
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, д.т.н., професор  
(Вільнюський техн. ун-т ім. Гедімінаса, Литва)  
Шарий Г. І., д.е.н., професор (НУ «Полтавська  
політехніка ім. Юрія Кондратюка)  
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)  
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)  
Коростельов Є. М., к.т.н., доцент (НАУ ХАІ)  
Ужвієва О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Малащук О. С., к.е.н., доцент (Одеський держ.  
аграрний ун-т)  
Капінос Н. О., к.е.н., доцент (Сумський нац.  
аграрний ун-т)  
Маланчук М. С., к.т.н., доцент (НУ «Львівська  
політехніка»)

**Теплоенергетика (144)**

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)  
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)  
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)  
Редько І. О., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)  
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)  
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)



## ЗМІСТ

### Механічна інженерія (131, 132, 133)

<i>Мощенко А. В.</i> Розмірний ефект за вимірювання твердості металів і сплавів у мікро- та макродіапазонах за методом невідновленого відбитка	7
<i>Лалазарова Н. О., Комарова Г. Л., Афанасьєва О. В., Попова О. Г.</i> Вплив неоднорідності високоміцного чавуну на характер зносу різців із різних інструментальних матеріалів	17
<i>Сайчук О. В., Потоскаєв О. М.</i> Технологічні аспекти ремонту зношених отворів у корпусних деталях аграрних машин із використанням нанокompозитних матеріалів	24
<i>Романович Є. В., Бабенко А. О., Козар Л. М., Козар М. Л.</i> Планування забезпечення автотранспортних і будівельно-дорожніх підприємств пально-мастильними матеріалами	31

### Будівництво та цивільна інженерія (192)

<i>Виноградов В. В., Альошечкіна Т. М.</i> Інтеграція інформації для управління об'єктами у BIM за допомогою COBie: сучасний стан і перспективи розвитку	42
<i>Бражнік Г. В.</i> Вплив повітровтягнення бетонної суміші на фізико-механічні властивості цементобетону	51
<i>Серіков Я. О., Данова К. В., Малишева В. В., Брусенцов В. Г., Герасименко В. А., Сіренко О. В.</i> Удосконалення ультразвукового імпульсного методу дослідження бетону в пошкоджених воєнними діями будівельних об'єктах для забезпечення їхньої експлуатаційної техногенної безпеки	57
<i>Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю., Вишнівський Б. О.</i> Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів	63
<i>Мірошніченко С. В., Романенко А. В., Рильський А. О., Тют'кін С. В.</i> Випробування бетонних сумішей для 3D-друку з доступних матеріалів	74
<i>Валовой О. І., Афанасьєв В. В., Валовой М. О.</i> Аналіз матеріалу щодо удосконалення верхньої будови залізничної колії та розроблення нового технічного рішення	82

### Геодезія та землеустрій (193)

<i>Воронков О. О., Євдокімов А. А.</i> Геоінформаційна основа для оцінювання нерухомості	92
--	----

### Залізничний транспорт (273)

<i>Каграманян А. О., Бондаренко В. В., Жерновенков О. А.</i> Використання енергоефективних технологій у конструкції сучасного рухомого складу залізниць	100
---	-----

<i>Крашенінін О. С., Шапатіна О. О., Бондаренко К. С.</i> Моделювання доопрацювання обладнання локомотивів	107
<i>Потапов Д. О., Тертичний В. В.</i> Теоретичні дослідження розвитку нерівностей колії в горизонтальній площині для безстикової конструкції	120
<i>Квасов П. В., Продащук М. В.</i> Удосконалення технології роботи залізничної транспортної інфраструктури із застосуванням інноваційних рішень у контексті управління ризиками та невизначеністю	127
<i>Вітольберг В. Г., Чесак С. С.</i> Використання інерціальних вимірювальних блоків для оцінювання геометричних параметрів колії	136
<i>Маслій А. С., Буряковський С. Г., Геврасьов В. А., Антоненко Р. М., Маслій А. С., Жуков А. Ю.</i> Архітектурно-технологічні принципи інтеграції електрохімічних накопичувачів енергії у plug-in гібридні тягові системи залізничного транспорту	148
<i>Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Шовкун В. О., Литовченко О. М.</i> До питання мінімізації контактних напружень у підшипниках букс вантажних вагонів	160
<i>Сушко Д. Л.</i> Проблеми і перспективи розвитку сучасних методів і засобів моніторингу теплового стану тягових двигунів локомотивів	170

#### **Транспортні технології (275)**

<i>Panchenko S. V., Babaiev M. M., Nerubatskyi V. P.</i> Analysis of the efficiency of operation of modern control systems for brushless traction motors	181
<i>Сотник В. О., Алмамедова М. Г. гизи, Меліхов А. А.</i> Кібербезпека систем залізничної автоматики і телемеханіки. Штучний інтелект для виявлення та реагування на загрози	200
<i>Долгополов П. В., Головка Т. В., Кулешов В. В., Пелех П. Р.</i> Удосконалення роботи сортувальної станції і дільниці із застосуванням кольорових мереж Петрі	214

УДК 620.178.1

**РОЗМІРНИЙ ЕФЕКТ ЗА ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ  
У МІКРО- ТА МАКРОДІАПАЗОНАХ ЗА МЕТОДОМ НЕВІДНОВЛЕНОГО ВІДБИТКА**

Асп. А. В. Мощенко

**INDENTATION SIZE EFFECT IN HARDNESS MEASUREMENT OF METALS  
AND ALLOYS IN MICRO- AND MACRO-RANGES BY THE UNRECOVERED  
INDENTATION METHOD**

Postgraduate student A. V. Moshchenok

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351611>

***Анотація.** У статті досліджено прояв розмірного ефекту за вимірювання твердості металів і сплавів у мікро- та макродіапазонах за методом невідновленого відбитка. Порівняно поверхневу, проєкційну та об'ємну твердість, встановлено їхню степеневу залежність від навантаження. Показано, що всі три параметри твердості зменшуються зі зростанням навантаження, причому об'ємна твердість має найсильніший спад. Отримані результати доводять, що твердість є функцією навантаження і вибір її виду визначає точність оцінювання механічної поведінки матеріалу та якості металопродукції.*

***Ключові слова:** твердість, за Мартенсом, інденування, піраміда Берковича, розмірний ефект, метод невідновленого відбитка, поверхнева твердість, проєкційна твердість, об'ємна твердість.*

***Abstract.** The article investigates the indentation size effect in hardness measurement of metals and alloys in the micro- and macro-ranges using the unrecovered indentation method with a Berkovich indenter. Instrumented indentation according to ISO 14577-1:2015 is applied to obtain the load–depth curves and calculate surface (Martens), projection and volume hardness. These three hardness types represent fundamentally different interpretations of the elastic–plastic interaction under contact loading. Martens hardness considers the total contact surface of the indenter and reflects the combined elastic–plastic resistance to penetration. Projection hardness uses only the projected area of the imprint and better characterizes plastic deformation. Volume hardness relates the load to the indented volume and reveals the most complete internal response of the material. Experimental tests were performed on U12A steel samples with different initial hardness levels (500 HV10 and 790 HV10) using loads from 0.01 to 0.2 N to cover both micro- and macro-ranges. The results clearly demonstrate a strong indentation size effect (ISE): as the load decreases and the indentation depth becomes smaller, all three hardness values increase significantly. Power-law correlations  $H = A \cdot F^{-b}$  were obtained with high coefficients of determination ( $R^2 > 0.98$ ), confirming the predictable nature of ISE. Surface hardness decreases moderately ( $\approx 55\text{--}65\%$ ), projection hardness shows a similar but slightly more pronounced reduction ( $\approx 55\text{--}62\%$ ), while volume hardness exhibits the strongest drop ( $\approx 95\text{--}96\%$ ) across the entire load range. This indicates that the deeper the level of geometric interaction considered, the more evident the influence of scale. Comparison between materials of different hardness reveals that harder steel always retains higher hardness values, but the difference between the curves changes with load due to different plasticity*

*mechanisms. The indentation size effect is shown to be a fundamental phenomenon that must be accounted for in modern materials science. Traditional hardness methods (Brinell, Rockwell, Vickers) often ignore scale effects and may fail to reflect real mechanical behaviour at small depths. The unrecovered indentation method captures the instantaneous response under maximum load, providing more accurate insight into surface integrity, wear resistance and contact strength. Understanding the indentation size effect enables more precise evaluation of material quality, optimization of heat treatment and strengthening technologies, and development of advanced coatings. The study proves that hardness is not a constant but a function of indentation scale, and the choice of hardness parameter (surface, projection, volume) must correspond to the specific engineering task. Therefore, accounting for ISE is critically important for reliable assessment, prediction of performance and improvement of metallic products.*

**Keywords:** *Martens hardness, indentation, Berkovich pyramid, indentation size effect, unrecovered indentation, surface hardness, projection hardness, volume hardness.*

**Вступ.** Дослідження належать до галузі матеріалознавства та машинобудівного виробництва, де точне визначення локальних механічних властивостей матеріалів є критичним для проектування, контролю якості та прогнозування довговічності виробів. Сучасні конструкції стають меншими за розмірами, навантаження зростають, використовують нові матеріали, тому класичні методи вимірювання твердості вже не забезпечують потрібної точності та не враховують вплив глибини інденування. Інструментальне інденування стало основним методом, оскільки допомагає визначати твердість, модуль пружності, енергію деформації та досліджувати масштабну залежність властивостей у мікро- та макродіапазонах. Особливої уваги потребує аналіз трьох взаємопов'язаних видів твердості – поверхневої (за Мартенсом), проекційної та об'ємної, які по-різному характеризують пружно-пластичну взаємодію матеріалу з індентором і відображають різні аспекти деформаційного стану. Їх порівняння дає змогу комплексно оцінити поведінку матеріалу під навантаженням, встановити закономірності зміни властивостей і виявити розмірний ефект, що має фундаментальне значення для розуміння реальної механічної відповіді матеріалу та підвищення точності оцінювання якості металевої продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метод інденування пірамідою Берковича, стандартизований у ISO 14577-1:2015, забезпечує високу точність у мікро- та макродіапазонах [1]. Сучасні роботи 2023–2025 років суттєво поглибили розуміння розмірного ефекту (ISE) і довели, що він є не просто збільшенням твердості зі зменшенням глибини вдавнення, а складним багатофакторним явищем. У роботі [2] подано систематичне дослідження 19 чистих металів із різною кристалічною ґраткою, де автори доводять, що ефект розміру є універсальним явищем. Основну увагу приділено розходженню між класичним розрахунком твердості та її реальною залежністю від глибини інденування. Автори аналізують нелінійний зв'язок між навантаженням і розміром відбитка, що свідчить про необхідність корекції традиційних моделей твердості [2]. У дослідженні [3] застосовано той самий підхід для бінарних сплавів Ag–Cu, підтверджено існування ISE у немонотонному вигляді за малої глибини вдавнення. Автори роблять висновок, що класична модель Нікса–Гао не повністю відображає поведінку сплавів із високою різницею в атомному об'ємі, тож запропоновано доповнення з урахуванням структурного напруження на межі зерен [3]. Особливе місце посідає публікація [4], у якій наведено порівняльний аналіз різних моделей розмірного ефекту — від класичної

Нікса–Гао до модифікованих варіантів, які враховують початкову напруженість, геометрію індентора, дислокаційну щільність. Автори експериментально перевірили ці моделі на металах, плівках і структурах, надрукованих адитивними методами. Установлено, що жодна з моделей не є універсальною, тому пропонується комбінований підхід для різних масштабів [4]. У дослідженні [5] показано, що монокристалічний вольфрам демонструє анізотропну реакцію з індентуванням, що впливає на характер ISE. Із застосуванням технік *in-situ* автори фіксують еволюцію дислокацій і доводять, що основною причиною ISE є зростання густини геометрично необхідних дислокацій зі зменшенням глибини індентування [5]. Нарешті, в оглядовій роботі [6] систематизовано сучасні дослідження ISE для широкого класу кристалічних матеріалів, включаючи метали, кераміки, композити, покриття. Підкреслено значення обліку пружно-пластичної взаємодії для моделювання залишкового відбитка, а також запропоновано класифікацію ISE: прямий, зворотний і перехідний. У статті зроблено висновок про необхідність стандартизації методів індентування для забезпечення відтворюваності результатів [6]. Усі роботи однотайно вказують на те, що точне вимірювання твердості в мікро- і макродіапазонах неможливе без урахування розмірного ефекту, причому метод невідновленого відбитка (за залишковими параметрами) краще відображає пластичну поведінку матеріалу. Подальші роботи, узагальнені в монографіях [7], [8], [9], деталізували взаємозв'язок між мікроструктурою, геометрією індентора і режимом навантаження. Ці публікації розширили поняття класичної твердості, увівши три взаємопов'язані параметри – поверхневу [7], проєкційну [8] та об'ємну твердість [9]. Поверхнева твердість ( $H_s$ ) – відношення навантаження до площі поверхні впровадженої частини індентора. Проєкційна твердість ( $H_p$ ) – відношення

навантаження до площі проєкції впровадженої частини індентора. Об'ємна твердість ( $H_v$ ) – відношення навантаження до об'єму впровадженої частини індентора. Такий підхід дає змогу розглядати розмірний ефект не як окреме явище, а важливу закономірність, що визначає достовірність оцінювання твердості в мікро- та макромасштабах, а використання трьох видів твердості ( $H_M$ ,  $H_{Pr}$ ,  $H_{Vol}$ ) забезпечує повне розуміння пружно-пластичної поведінки матеріалу.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета роботи – встановити характер впливу розмірного ефекту на твердість металів і сплавів у мікро- та макродіапазонах за методом невідновленого відбитка та визначити особливості його прояву для різних видів твердості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: – дослідити залежність твердості від глибини індентування та навантаження; – порівняти поверхневу, проєкційну та об'ємну твердість і визначити їхній внесок у формування розмірного ефекту.

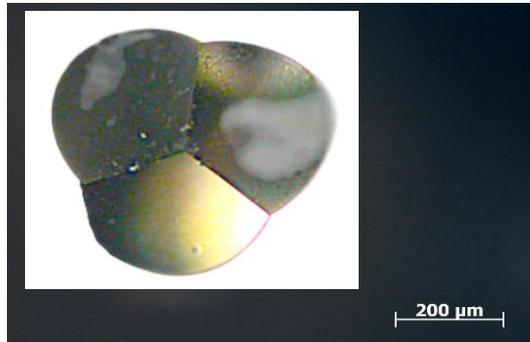
**Основна частина дослідження.** Експерименти проводили на зразках сталі У12А із твердістю 500 HV10 і 788 HV10 на приладі NanoTest (Micro Materials Ltd.) [10]. Випробування виконували за стандартом ISO 14577 із використанням алмазного індентора Берковича (рис. 1), який має форму тригранної піраміди та забезпечує точне відтворення умов локального контактного навантаження. На рис. 1, а показано загальний вигляд піраміди з тримачем, що демонструє конструктивні особливості індентора, а на рис. 1, б наведено мікрофотографію його вершини (x200), що підтверджує правильність геометрії та гостроту, необхідну для мінімізації похибок під час вимірювання глибини індентування. Перед кожною серією випробувань індентор перевіряли оптично на відповідність геометрії (відхилення кута не перевищувало  $0,2^\circ$ ). Поверхню зразків полірували до шорсткості

$Ra \leq 0,03$  мкм, що мінімізувало похибки у визначенні площі контакту на малих глибинах, згідно з ISO 14577-1:2015. Діапазон навантажень становив від 0,01 до

0,2 Н, що дало змогу охопити мікро- та макродіапазони твердості та дослідити вплив навантаження на значення твердості за Мартенсом.



*a*



*б*

Рис. 1. Алмазний індентор Берковича: *a* – загальний вигляд піраміди з тримачем; *б* – мікрофотографія вершини індентора (x 200 μm)

Розраховували значення НМ за допомогою спеціально розробленої авторської програми (рис. 2), яка автоматизує обробку експериментальних даних за ISO 14577. На рис. 2 зображено діалогове вікно програми, де наведено вхідні параметри (навантаження, глибина індентування), формулу розрахунку твердості НМ, приклад числового обчислення, а також схему кривої індентування «навантаження–глибина», що відображає цикл завантаження і розвантаження. Це вікно допомагає візуально контролювати весь процес аналізу та забезпечує точність визначення площі контактної поверхні  $A_s(h)$  відповідно до стандарту.

Твердість за Мартенсом, проєкційну та об’ємну розраховували за такими формулами:

- твердість за Мартенсом (НМ) [1, 7]

$$HM = \frac{F}{A_s(h)} = \frac{F}{26,44h^2}, \quad (1)$$

де  $F$  – навантаження;

$h$  – глибина проникнення індентора;

$A_s(h)$  – реальна площа контактної поверхні;

26,44 – коефіцієнт, який враховує геометрію впровадженої частини індентора з урахуванням кута  $65,27^\circ$  у піраміді Берковича.

Ця твердість враховує як пружну, так і пластичну деформацію поверхні;

- проєкційна твердість (HPr) [8]

$$H_{Pr} = \frac{F}{A_s(h)} = \frac{F}{23,962h^2}, \quad (2)$$

де  $A_s(h)$  – площа проєкції, визначена як площа впровадженої частини, перпендикулярна до напрямку навантаження;

23,962 – коефіцієнт, який відповідає площі проєкції правильної тригранної піраміди Берковича.

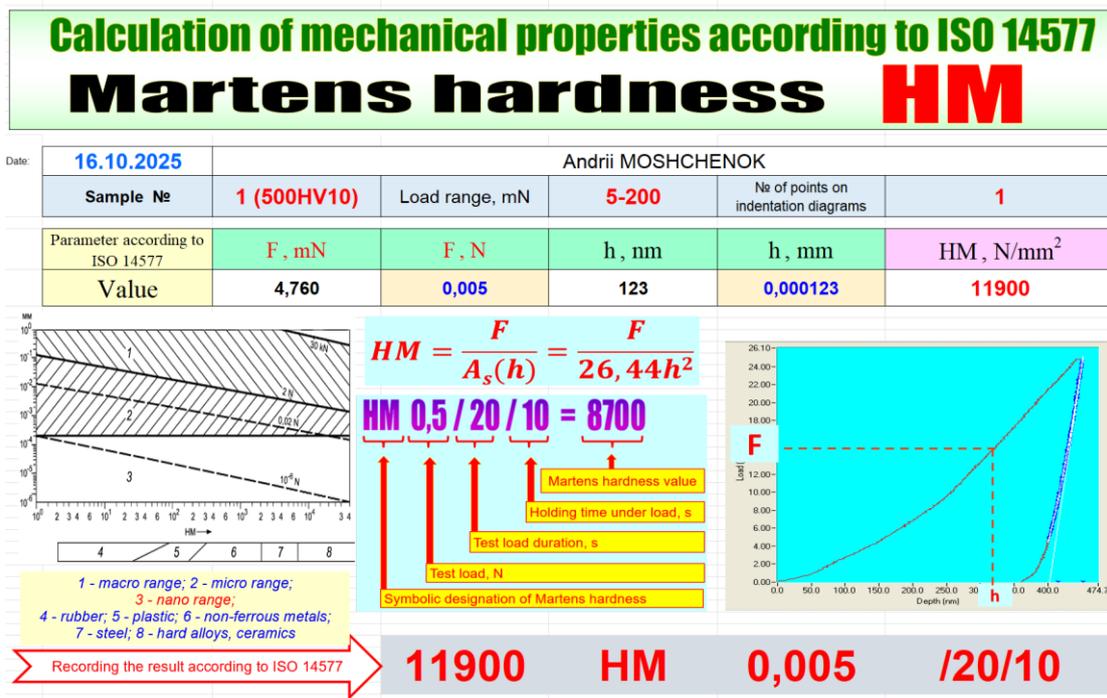


Рис. 2. Діалогове вікно авторської програми розрахунку твердості за Мартенсом, згідно з ISO 14577, на якому відображено всі вхідні параметри

Цей тип твердості також відображає як пружну, так і пластичну деформацію поверхні;

- об'ємна твердість (HV<sub>01</sub>) [9]

$$H_{Vol} = \frac{F}{V_s(h)} = \frac{F}{8,165h^3}, \quad (3)$$

де  $V_s(h)$  – об'єм впровадженої частини індентора, що розрахована для ідеального Берковича;

8,165 – коефіцієнт, який є функцією форми індентора та описує як пружну, так і пластичну деформацію у всьому об'ємі впровадженої в матеріал частини індентора.

На рис. 3 подано експериментальні залежності твердості за Мартенсом (тобто поверхневої) від навантаження для зразків різної початкової твердості. Криві 1 (500 HV10) і 2 (790 HV10) демонструють характерне зниження значень HM зі збільшенням навантаження, що підтверджує наявність розмірного ефекту (ISE): за

меншої глибини інденування твердість є більшою.

На рис. 4 показано, як проєкційна твердість HPr сталі У12А (аналогічно і твердість за Мартенсом на рис. 3) змінюється з навантаженням F для інденування пірамідою Берковича для двох станів твердості: 1 – ~500 HV10 (сині трикутники), 2 – ~790 HV10 (червоні трикутники). Обидві криві чудово описані степеневими законами  $HPr = A \cdot F^{-b}$  з високою узгодженістю: для м'якшої сталі 1 –  $HPr = 3116,4 \cdot F^{-0,259}$ ,  $R^2 = 0,9857$ ; для твердішої сталі 2 –  $HPr = 5382,5 \cdot F^{-0,202}$ ,  $R^2 = 0,9977$ . Фізично це класичний розмірний ефект: зі зростанням навантаження твердість за проєкцією падає та прагне до «полиці». Швидкість спаду більша у зразка 500 HV10 (показник -0,259 проти -0,202), тому на малих F криві ближчі, а на великих – розходяться. Кількісно спад твердості по всьому діапазону випробувань ( $\approx 4,8$  мН → 200 мН) становить: для сталі ~500 HV10 зниження з

≈12 400 до ≈4 730 Н/мм<sup>2</sup>, тобто ~61,9 %; для сталі ~790 HV10 – з ≈15 830 до ≈7 450 Н/мм<sup>2</sup>, тобто ~52,9 %. «Відстань» між кривими у відсотках, якщо рахувати як перевищення твердішої над м'якшою за однакового F, зростає з навантаженням: близько 27 % на 4,8 мН, ~44 % на 40 мН, ~50 % на 80 мН і до ~58 % на 200 мН; середнє по діапазону

≈46 %. Отже, твердіший зразок стабільно має вищу проєкційну твердість, причому відносний розрив між кривими збільшується з навантаженням, а експоненти -0,259 і -0,202 якісно фіксують: чим нижча початкова твердість, тим сильніше проявляється спад HPr зі зростанням F.

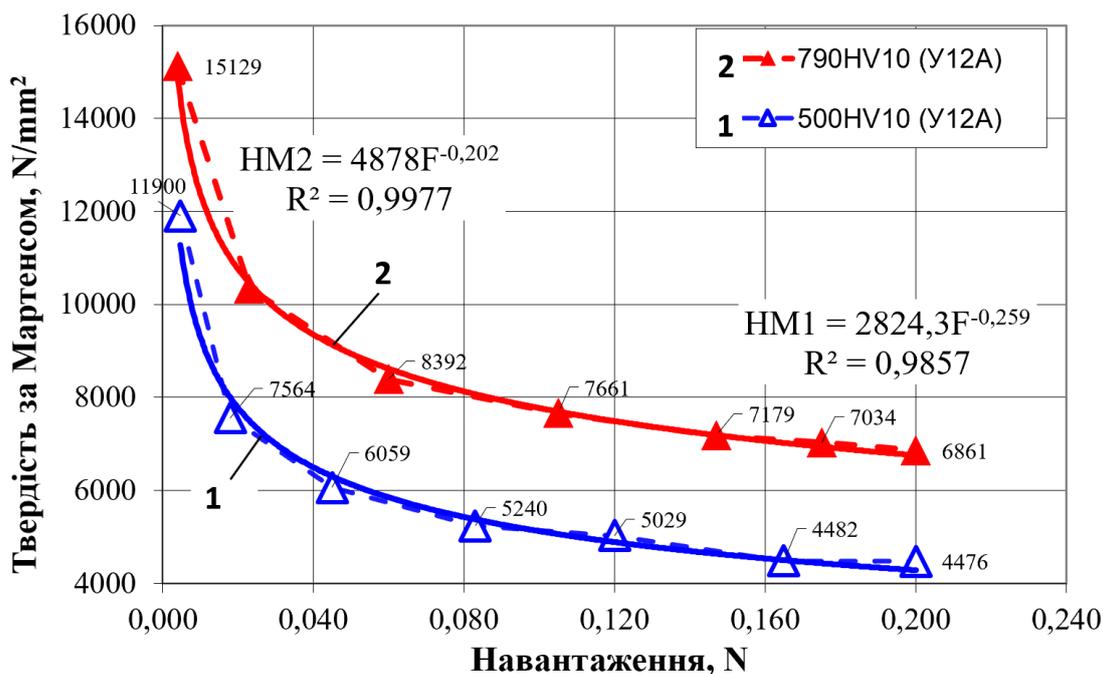


Рис. 3. Залежність твердості за Мартенсом (поверхневої) від навантаження для інденування пірамідою Берковича сталевих зразків із різною твердістю: 1 – 500HV10; 2 – 790HV10

На рис. 5 показано залежність об'ємної твердості HVol (N/мм<sup>3</sup>) від навантаження F для інденування пірамідою Берковича сталей У12А із різною твердістю: 1 – 500 HV10 (сині порожні трикутники), 2 – 790 HV10 (червоні заповнені трикутники). Обидві криві різко спадають за малих навантажень, після чого переходять у пологий ділянку, що є класичним проявом розмірного ефекту. Математично поведінка описана степеневими закономірностями з дуже високою точністю апроксимації: для сталі 500 HV10: 1 – HVol = 6 · 10<sup>6</sup> · F<sup>-0,803</sup>, R<sup>2</sup> = 0,9999; для сталі 790 HV10: 2 – HVol = 2 · 10<sup>6</sup> · F<sup>-0,888</sup>, R<sup>2</sup> = 0,9978. Важливо,

що твердіша сталь має більший показник степеня (-0,888 проти -0,803), тобто вона ще сильніше реагує на збільшення навантаження, хоча початкові значення твердості в неї вищі. Кількісний аналіз (дані таблиць) показує: для сталі 500 HV10 HVol падає з ≈313 281 990 до ≈11 149 201 N/мм<sup>3</sup>, тобто зменшується на 96,4 %; для сталі 790 HV10 HVol падає з ≈489 895 897 до ≈21 159 525 N/мм<sup>3</sup>, що відповідає зменшенню на 95,7 %. Отже, об'ємна твердість зменшується майже однаково сильно для обох зразків (≈96 %), але м'якший матеріал має трохи більший спад. «Відстань» між кривими у відсотках (як



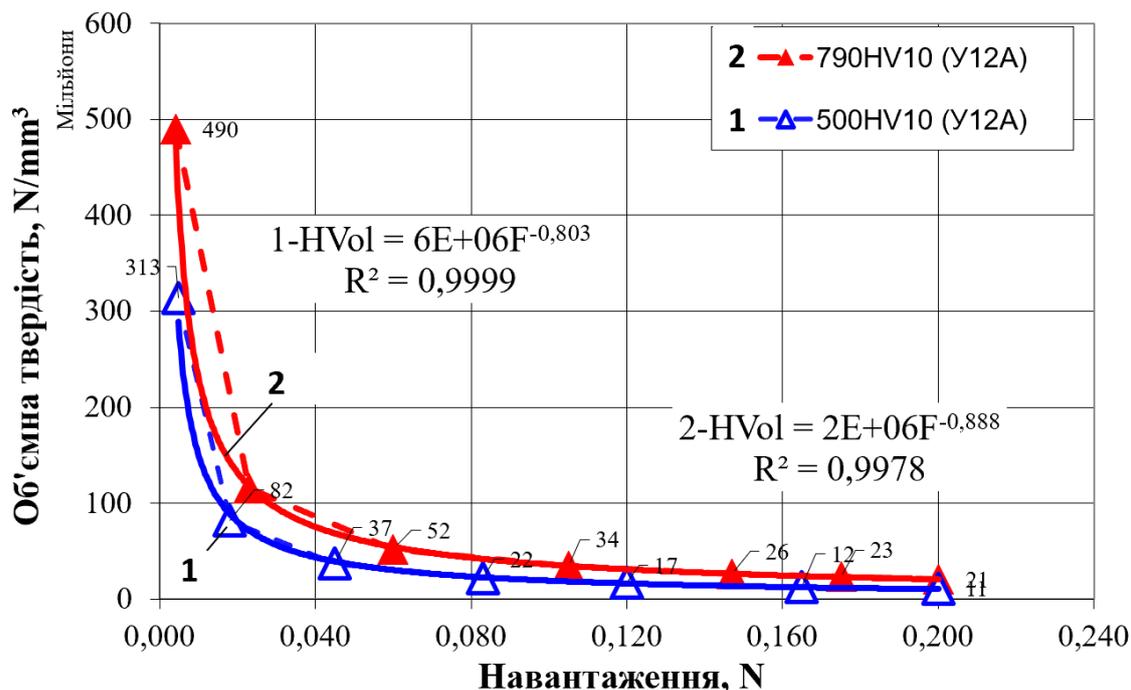


Рис. 5. Залежність об'ємної твердості від навантаження для інденування пірамідою Берковича сталевих зразків із різною твердістю: 1 – 500HV10; 2 – 790HV10

Таблиця

Експериментальні значення твердості для різних навантажень (N) із похибками

F (N)	HM (500 HV10), Н/мм² ±Δ	HM (790 HV10), Н/мм² ±Δ	HPr (500 HV10), Н/мм² ±Δ	HPr (790 HV10), Н/мм² ±Δ	HVol (500 HV10), Н/мм³ ±Δ	HVol (790 HV10), Н/мм³ ±Δ
0.01	12140 ± 250	15300 ± 310	12400 ± 270	15830 ± 280	313282000 ± 14500000	489896000 ± 17800000
0.02	9500 ± 200	12560 ± 240	10100 ± 220	13320 ± 250	118670000 ± 6100000	231310000 ± 9200000
0.05	6940 ± 190	10140 ± 200	7340 ± 210	10930 ± 220	33869000 ± 2400000	65980000 ± 3100000
0.1	5580 ± 160	8420 ± 180	5930 ± 180	9050 ± 200	17012000 ± 1400000	31966000 ± 1900000
0.2	4340 ± 140	6720 ± 160	4730 ± 160	7450 ± 180	11149000 ± 1250000	21159000 ± 1700000

Значення твердості в таблиці подано разом із середньоквадратичним відхиленням (±Δ), отриманим на основі п'яти повторних вимірювань. Таблиця демонструє характерну тенденцію зниження

твердості зі збільшенням навантаження, що підтверджує прояв прямого розмірного ефекту для інденування. Особливо різким є спад об'ємної твердості (понад 95 %), тоді як поверхнева та проєкційна зменшуються

плавніше (~55–65 %). Крім того, видно, що твердіший зразок стабільно демонструє вищі значення твердості для кожного виду за всіх навантажень. Наведені числові дані використовували для побудови графіків на рис. 3–5 і апроксимаційних степеневих залежностей  $H = A \cdot F^{-b}$  із високими коефіцієнтами кореляції.

Отримані дані підтверджують, що розмірний ефект є фундаментальною характеристикою процесу індентування, а метод невідновленого відбитка дає змогу враховувати пружну та пластичну деформації у твердості.

**Висновки.** Твердість, виміряна за методом невідновленого відбитка, відображає реакцію матеріалу за максимального навантаження і враховує як пружну, так і пластичну деформації. На відміну від класичних методів Брінелля, Роквелла, Віккерса, які не враховують пружну деформацію, інструментальне індентування забезпечує більш точні значення твердості і враховує не тільки пластичну, але і пружну деформації.

Усі три види твердості – твердість за Мартенсом (поверхнева), проєкційна та об’ємна – демонструють чітко виражений прямий розмірний ефект (ISE): зі збільшенням навантаження твердість закономірно зменшується, що добре описано степеневими залежностями  $H = A \cdot F^{-b}$  із високими коефіцієнтами детермінації ( $R^2 \approx 0,99$ ).

Твердість за Мартенсом (поверхнева) зменшується плавно: приблизно на 55–60 % для більш твердого зразка (790 HV10) і на 60–65 % для м’якшого (500 HV10). Криві поведінки подібно до класичного ISE, але спад не надто різкий, що вказує на помірну

чутливість поверхневої твердості до навантаження.

Проєкційна твердість спадає майже так само: для сталі 500 HV10 зменшення ~62 %, для 790 HV10 ~55 %. Відмінність між кривими зростає з навантаженням, тобто проєкційна твердість сильніше розділяє матеріали за їхньою реальною пластичною поведінкою, ніж поверхнева.

Об’ємна твердість демонструє найбільш різке падіння: для обох зразків зменшується приблизно на 95–96 %. Це найсильніший прояв розмірного ефекту серед усіх трьох видів. Порівняння: найменший ISE – для поверхневої твердості (HM), середній – для проєкційної (HPr), найбільший – для об’ємної (HVol). Чим більше врахована геометрія проникнення індентора, тим глибше розкрита справжня еластично–пластична взаємодія матеріалу і тим сильніше падає твердість.

Для матеріалознавства це принципово важливо: твердість – не стала величина, а функція масштабу навантаження/глибини. Тому класичні методи (Брінелля, Роквелла, Віккерса) не завжди відображають реальну поведінку матеріалу, особливо на мікро– і нанорівнях. Для оцінювання якості металевої продукції потрібно враховувати тип твердості та вплив навантаження: поверхнева твердість дає уявлення про початковий опір проникненню, проєкційна краще відображає пластичну деформацію, а об’ємна – найближча до реальної механічної відповіді матеріалу в умовах навантаження. Це дає змогу точніше прогнозувати зносостійкість, міцність поверхні, роботу покриттів, поведінку з контактним навантаженням та оптимізувати технології термообробки й зміцнення.

### Список використаних джерел

1. ISO 14577-1:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method. Geneva: International Organization for Standardization, 2021. 45 p.

2. Petřík J. The Indentation Size Effect (ISE) of Metals. *Crystals*. 2022. Vol. 12, Iss. 6. Article No. 795. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4352/12/6/795> (last access: 15.10.2025).
3. Šolc M., Petřík J., Matýsek D., Děcký M. The Indentation Size Effect (ISE) of Ag–Cu Alloys. *Crystals*. 2023. Vol. 13, Iss. 1. Article No. 91. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4352/13/1/91> (last access: 15.10.2025).
4. Wang P., Jiang Y., Zhou Y., Zhang X. A comparative study of indentation size effect models for ISE. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article No. 11151. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-71136-5> (last access: 15.10.2025).
5. Wang J., Zhang Y., Lu H. The indentation size effect of single-crystalline tungsten. *Journal of Materials Research*. 2021. Vol. 36. P. 4199–4209. URL: <https://link.springer.com/article/10.1557/s43578-021-00221-6> (last access: 15.10.2025).
6. Shen Z., Liang S., Tan J., Lin Y. Review of indentation size effect in crystalline materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. In Press. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424013826> (last access: 15.10.2025).
7. Moshchenok V. I., Pimonov I., Lukianenko N., Moshchenok A. V., Skrypnyk T., Moshchenok V. V. Martens Hardness Measurement Using a Berkovich Indenter on Steel. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2025. 124 p. ISBN 978-620-8-42500-5.
8. Moshchenok V. I., Pimonov I., Skrypnyk N., Moshchenok A., Skrypnyk T., Moshchenok V. V. Projection Hardness in Nano- and Micro ranges. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2025. 124 p. ISBN 978-620-8-42252-3.
9. Moshchenok V. I., Pimonov I., Vorobyova S., Moshchenok A. V., Kosolapov V., Moshchenok V. V. Nanoindentation to Determine Volume Hardness of Steel. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2025. 122 p. ISBN 978-620-8-43079-5.
10. Micro Materials Ltd. *NanoTest Platform*. UK: Micro Materials Ltd. URL: <https://www.micromaterials.co.uk/nanotest/> (last access: 15.10.2025).

---

Мощенок Андрій Васильович, аспірант кафедри технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0003-2477-6009.  
E-mail: amoshenok@gmail.com.

Moschenok Andrii, postgraduate student at the Department of Metal Technology and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0003-2477-6009. E-mail: amoshenok@gmail.com.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.

УДК 629.341

## ВПЛИВ НЕОДНОРІДНОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ НА ХАРАКТЕР ЗНОСУ РІЗЦІВ ІЗ РІЗНИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Кандидати техн. наук Н. О. Лалазарова, Г. Л. Комарова,  
О. В. Афанасьєва, О. Г. Попова

## INFLUENCE OF THE INHOMOGENEITY OF HIGH-STRENGTH CAST IRON ON THE WEAR CHARACTER OF CUTTERS MADE OF VARIOUS TOOL MATERIALS

PhD (Tech.) N. Lalazarova, PhD (Tech.) G. Komarova, PhD (Tech.) O. Afanasieva,  
PhD (Tech.) O. Popova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351810>

**Анотація.** Із високоміцного чавуну виготовляють важконавантажені деталі транспортних засобів, які повинні мати високий рівень експлуатаційних властивостей, що погіршує їх оброблюваність різанням. У роботі показано, що вирішальний вплив на стійкість інструментів із різних інструментальних матеріалів має неоднорідність чавуну, що підтверджено якісним аналізом поверхонь зносу і результатами стійкісних випробувань і розрахунками режиму різання.

**Ключові слова:** високоміцний чавун, неоднорідність, оброблюваність, твердий сплав, надтвердий інструментальний матеріал, мінералокераміка, знос інструменту, режим різання.

**Abstract.** High-strength spheroidal graphite cast iron is used to make heavily loaded vehicle parts that must have a high level of performance properties, which impairs their machinability. Research into the wear characteristics of tools made of hard alloy, superhard tool material and mineral ceramics and providing recommendations on cutting modes when turning products made of high-strength cast iron, taking into account its heterogeneity. The worn surfaces of the cutting inserts were examined using an EM-100BP electron microscope and a PEM-200 scanning electron microscope. Studies of the wear surfaces of tools made of hard alloy BK8, superhard tool material composite K10Д, mineral ceramics BOK71 showed that when machining high-strength cast iron, fatigue phenomena are characteristic of all materials, which are accompanied by the formation of microcracks, chipping, and tearing. Qualitative analysis of wear surfaces and developed recommendations on cutting modes showed that the decisive influence on tool wear and machinability of high-strength cast iron is the coefficient of heterogeneity, which takes into account the complex influence of the microstructure, chemical and structural heterogeneity of cast iron, which leads to instability of the cutting process, causes oscillatory loads on the tool and intensifies its wear. There is a good correlation between the nature of tool surface wear, durability (cutting speed) and the coefficient of cast iron heterogeneity: the highest cutting speed and the lowest degree of destruction of wear surfaces are observed when processing cast iron with the lowest degree of heterogeneity, which was subjected to double normalization. For tool materials BK8, K10Д, BOK71, recommendations on cutting modes (cutting speed) during turning have been developed, which take into account the heterogeneity of high-strength cast iron. The highest productivity in processing products from high-temperature carbon steel is achieved by the K10Д composite.

**Keywords:** high-strength cast iron, heterogeneity, machinability, hard alloy, superhard tool material, mineral ceramics, tool wear, cutting mode.

**Вступ.** На сьогодні в різних країнах широкого застосування як конструкційний матеріал знаходить високоміцний чавун із кулястим графітом (ВЧКГ) [1]. Із нього виготовляють відповідальні і важконавантажені деталі автомобілів, залізничного транспорту, тракторів, комбайнів, нафтогазового обладнання, які працюють в умовах циклічних і ударних навантажень, у корозійному середовищі, в умовах тертя: колінчасті і розподільні вали, шестірні, блоки циліндрів та ін. [2]. Тому високоміцний чавун повинен мати високий рівень експлуатаційних властивостей, що погіршує оброблюваність різанням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оброблюваність чавунів залежить від їхньої структури і властивостей, властивостей матеріалу інструменту, його геометрії, режимів обробки та інших факторів [3].

Для чорнової і напівчистої обробки високоміцних чавунів рекомендовано використовувати тверді сплави: ВК8, ВК6 без покриття і з покриттям, для чистої обробки – ВК6, ВК6ОМ [4]. Для чистої обробки також рекомендовані інструменти з мінералокераміки [4] і надтвердих інструментальних матеріалів (НТМ) [5]. Рекомендації з використання твердих сплавів, НТМ і мінералокераміки надані не диференційовано для чавунів певної твердості з певною структурою, а всієї групи чавунів. Загартовані чавуни рекомендовано обробляти інструментами з НТМ і мінералокерамікою. Аналіз рекомендацій показав, що вони мають несистематизований характер.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження особливостей зносу інструментів із твердого сплаву, надтвердого інструментального матеріалу і мінералокераміки та надання рекомендацій із режимів різання для точіння виробів із високоміцного чавуну з урахуванням його неоднорідності. Для того щоб забезпечити досягнення цієї мети, були поставлені та вирішені такі завдання:

1) дослідження особливостей зносу інструментів із різних інструментальних матеріалів для обробки ВЧКГ із різною мікроструктурою; 2) надання рекомендацій із режимів різання, що враховують неоднорідність чавуну.

#### **Основна частина дослідження.**

Дослідження проводили на високоміцному чавуні з кулястим графітом хімічного складу: 3,3-3,8 % С; 2,4-3,2 % Si;  $C+1/3 Si = 4,25-4,35$  %; 0,004-0,007 % S; 0,5-0,9 % Mn; 0,045-0,008 % P; 0,05-0,1 % Cr; 0,1-0,15 % Ni; 0,04-0,09 % Mg. Цей чавун використовують для виготовлення колінчастих і розподільних валів, блоків циліндрів, поршневих кілець. Чавун обробляли різцями з механічним кріпленням змінних пластин із твердого сплаву ВК8 (п'ятигранні пластини), надтвердого інструментального матеріалу – композит К10Д (гексаніт-Р на підкладці з твердого сплаву, пластини діаметром 9 мм), мінералокераміки ВОК71 (чотиригранні пластини). Зношені поверхні різальних пластин досліджували за допомогою біокулярного мікроскопа МБС-9, електронного мікроскопа ЕМ-100БР і растрового електронного мікроскопа РЕМ-200.

ВЧКГ має значну неоднорідність – хімічну і структурну [6].

Для ВЧКГ у литому стані характерна хімічна неоднорідність, що пов'язана з розвиненою ліквіацією ряду хімічних елементів: кремній схильний до значної зворотної ліквіації, марганець і фосфор – прямої. Хімічна ліквіація є причиною структурної неоднорідності – ферит розташований навкруги включень кулькового графіту.

Неоднорідність чавуну відіграє вирішальну роль у погіршенні його оброблюваності. Існують різні методики визначення неоднорідності чавуну, наприклад мультифрактальний аналіз [7]. У роботі використана методика оцінювання неоднорідності чавуну за миттєвими значеннями сили різання [8]. Сила різання – це результат комплексного впливу мікроструктури, хімічної та структурної неоднорідності чавуну на інструмент.

Інструментальні матеріали, які найчастіше використовують для обробки високоміцного чавуну, мають низькі границі міцності на згин. Тому для цих інструментів нестабільність процесу різання і коливальні навантаження, що викликані неоднорідністю чавуну, становлять певну небезпеку. Усе це сприяє інтенсифікації зносу інструменту і погіршенню оброблюваності чавуну. Коефіцієнт неоднорідності розраховували як відношення коефіцієнтів варіації миттєвих значень сили різання для ВЧКГ і сірого чавуну СЧ20, який був прийнятий за еталон [8].

У роботі досліджували вплив мікроструктури та властивостей чавуну, що комплексно враховано коефіцієнтом неоднорідності, на знос інструменту з різних матеріалів – твердого сплаву ВК8, надтвердого інструментального матеріалу композит К10Д, мінералокераміки ВОК71.

Ступінь неоднорідності чавуну змінювали термічною обробкою за режимами, що наведені в табл. 1.

Для практичного застосування на виробництві потрібне кількісне вираження оброблюваності високоміцного чавуну у вигляді режимів різання. Для цього на основі стійкісних випробувань були одержані експериментальні значення режимів різання (швидкість різання  $V_c$  за стійкості 60 хв) для різних інструментальних матеріалів (табл. 2).

Також розраховано швидкість різання ( $V_p$ ) з урахуванням коефіцієнта неоднорідності відносно швидкості різання для сірого чавуну (табл. 2) [7].

Аналіз експериментальних і розрахункових значень швидкості різання показав, що вони близькі за величиною (табл. 2). Також існує добра кореляція між стійкістю (швидкістю різання) і коефіцієнтом неоднорідності чавуну: найбільшу швидкість різання спостерігають із обробкою чавуну з найменшим ступенем неоднорідності – чавун № 2, який піддавали подвійній нормалізації (табл. 2).

Таблиця 1

Стан і властивості високоміцного чавуну

Стан чавун	Твердість чавуну HBW	Коефіцієнт неоднорідності $k_H$
1. Литий стан	210-220	1,70
2. Подвійна нормалізація: нагрівання до 890 °С, витримування 1,5 год, охолодження на повітрі, нагрівання до 860 °С, витримка 1,5 год, охолодження в струмені повітря	250-260	1,26
3. Нормалізація з МКІ: нагрівання до 860 °С, витримування 1,5 год, охолодження в струмені повітря	275-285	1,36
4. Гартування і відпуск: нагрівання до 860 °С, витримування 1,5 год, охолодження в маслі. Відпуск за температури 550 °С протягом 2 год, охолодження на повітрі	330-340	1,77
5. Гартування і відпуск: нагрів до 860 °С, витримування 1,5 год, охолодження в маслі. Відпуск за температури 220 °С протягом 2 год, охолодження на повітрі	470-480	1,90

Таблиця 2

Експериментальні і розрахункові значення швидкості різання для обробки ВЧКГ різними інструментальними матеріалами

Чавун	Твердість чавуну HBW	Матеріал різальної частини					
		BK8		K10Д		K11	ВОК71
		* $V_e / V_p$ , м/с	** $V_e / V_p$ , м/с	* $V_e / V_p$ , м/с	** $V_e / V_p$ , м/с	$V_e / V_p$ , м/с	$V_e / V_p$ , м/с
1	210-220	1,8/1,5	4,5/4,2	3,8/3,6	3,4/3,2		
2	260-270	2,8/2,6	5,6/5,4	5,0/4,7	4,2/3,9		
3	275-280	2,0/1,7	5,3/5,2	4,7/4,6	3,8/3,7		
4	330-340	1,2/0,9	4,3/3,9	3,7/3,4	3,5/3,4		
5	470-480	0,9/0,7	3,7/3,6	3,3/3,0	3,2/3,0		

Примітки:  $V_e^*$  – експериментальні значення швидкості різання для стійкості 60 хв;  
 $V_e^{**}$  – розрахункові значення швидкості різання для стійкості 60 хв.

Дослідження поверхонь зносу показали, що твердий сплав зношується як по задній, так і передній поверхні (рис. 1, а), а надтверді інструментальні матеріали (б) і мінералокераміка зношуються переважно по задній поверхні (в).

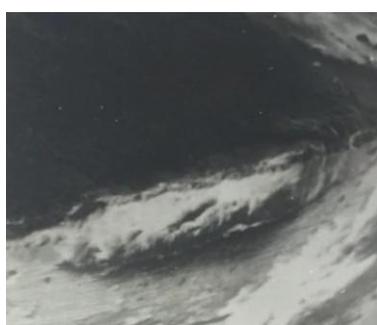
Обробка загартованого чавуну, який має найбільший ступінь неоднорідності ( $k_n = 1,9$ ), сприяє найбільш інтенсивному втомному зносу надтвердих інструментальних матеріалів, що проілюстровано зображеннями поверхонь зносу різця з

пластиною з K10Д, які після обробки загартованого чавуну носять сліди втомних явищ (рис. 2). На задній поверхні видні осередки руйнувань, виривання (а). Втомні явища призводять також до мікрОВикришувань різальної кромки (б).

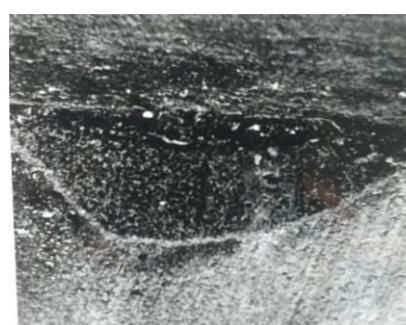
Аналіз зношених поверхонь мінералокераміки ВОК71 також підтверджує вирішальну роль неоднорідності у впливі на знос і оброблюваність чавуну (рис. 3).



а



б



в

Рис. 1. Знос різців: а – BK8; б – K10Д; в – ВОК71

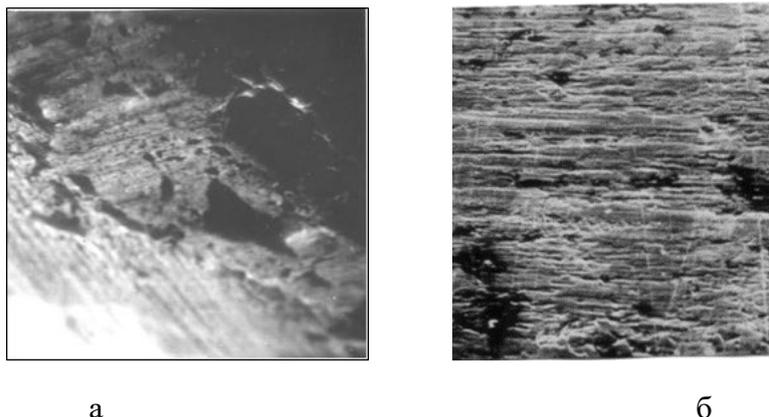


Рис. 2. Види зносу різців із К10Д після точіння загартованого чавуну: а – втомний і абразивний знос,  $\times 900$ ; б – мікротріщини,  $\times 150$ , режим різання  $S = 0,07$  мм/об,  $t = 0,4$  мм,  $V = 3,7$  м/с

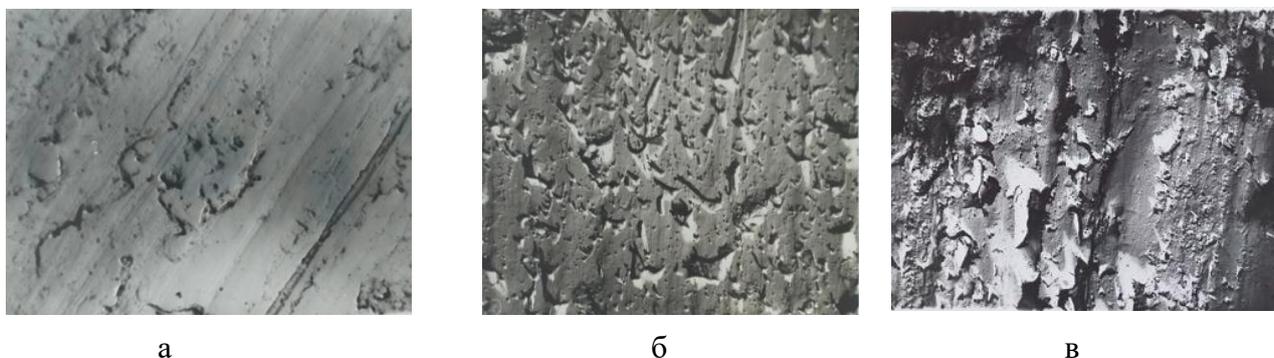


Рис. 3. Види зносу різців із керамічного сплаву ВOK71: а – незношена пластина; б – обробка чавуну після подвійної нормалізації, режим різання  $S = 0,07$  мм/об,  $t = 0,4$  мм,  $V = 2,6$  м/с; в – обробка чавуну після гартування і низького відпуску, режим різання  $S = 0,07$  мм/об,  $t = 0,4$  мм,  $V = 2,0$  м/с,  $\times 10000$

Мінералокераміка має підвищену крихкість, і для неї вплив циклічних ударних навантажень на різальну кромку є вирішальним – спостерігають інтенсивне викришування поверхонь різця і різальної кромки (рис. 3). Якісний аналіз поверхонь зносу показав, що це викришування більш інтенсивне під час обробки загартованого чавуну (в), ніж після подвійної нормалізації (б).

Ще одним підтвердженням значної ролі неоднорідності, як негативного фактора оброблюваності ВЧКГ, є аналіз

поверхонь зносу твердого сплаву ВК8 (рис. 4).

Зношені поверхні твердого сплаву ВК8 після точіння нормалізованого з МКІ чавуну ( $k_n = 1,36$ ) (рис. 4, б) мають вищий ступінь руйнування, ніж після подвійної нормалізації ( $k_n = 1,26$ ) (рис. 4, а). Поверхні зносу після точіння вкриті сіткою мікротріщин, розвиток яких призводить до сколів. Твердість чавунів при цьому не дуже відрізняється: 275-285 НВW після нормалізації з МКІ і 250-260 НВW після подвійної нормалізації.

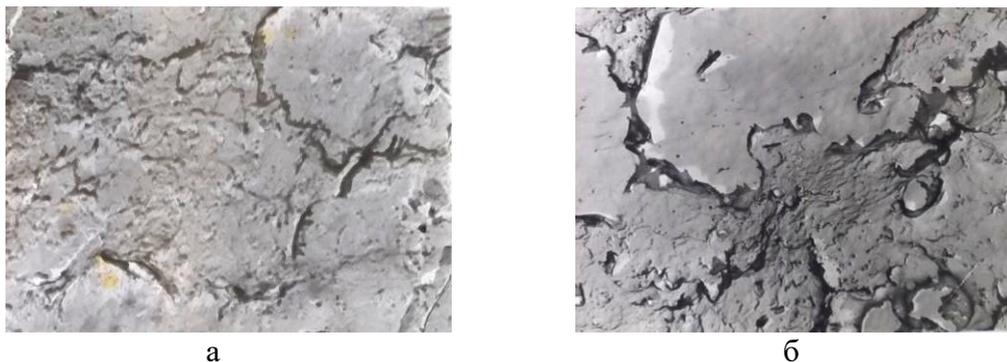


Рис. 4. Мікротріщини на поверхні зносу різців із твердого сплаву ВК8 після обробки чавуну: а – подвійна нормалізація; б – нормалізація з МКІ, режим різання  $S = 0,07$  мм/об,  $t = 0,4$  мм,  $V = 2,0$  м/с,  $\times 10000$

Аналіз зношених поверхонь твердого сплаву, надтвердого інструментального матеріалу, кераміки показав, що з обробкою висококомічного чавуну характерними для всіх матеріалів є втомні явища, які супроводжені утворенням мікротріщин, викришувань, виривів.

Збільшення ступеня неоднорідності чавуну сприяє інтенсифікації втомних руйнувань. Коефіцієнт неоднорідності більш об'єктивно відображає вплив мікроструктури і властивостей чавуну, ніж твердість, на стійкість інструменту (швидкість різання).

Аналіз зношених поверхонь інструментів після обробки висококомічного чавуну з різним ступенем неоднорідності є об'єктивним підтвердженням того, що неоднорідність чавуну має вирішальний вплив на характер зносу інструментів із різних інструментальних матеріалів і оброблюваність у цілому.

Якісні відмінності, які спостерігають у процесі зношування, добре узгоджені з розрахунковими та експериментальними значеннями швидкості різання, одержаними з проведенням стійкісних випробувань.

Проведений аналіз показав, що для визначення режиму різання (швидкості різання) необхідно враховувати не тільки твердість чавуну, а і мікроструктуру через коефіцієнт неоднорідності.

Проведений аналіз розрахованих значень режимів різання (швидкості різання) показав, що найбільшу продуктивність для обробки виробів із ВЧКГ мають різці з композиту К10Д – гексаніту-Р. Різці з кераміки ВОК71 також можна рекомендувати для напівчистої і чистої обробки висококомічного чавуну.

**Висновки.** Дослідження поверхонь зносу інструментів із твердого сплаву ВК8, надтвердого інструментального матеріалу композит К10Д, мінералокераміки ВОК71 показали, що з обробкою висококомічного чавуну характерними для всіх матеріалів є втомні явища, які супроводжені утворенням мікротріщин, викришувань, виривів.

Якісний аналіз поверхонь зносу і розроблені рекомендації з режимів різання показали, що вирішальний вплив на знос інструменту і оброблюваність висококомічного чавуну має коефіцієнт неоднорідності, який враховує комплексний вплив мікроструктури, хімічної та структурної неоднорідності чавуну, що призводить до нестабільності процесу різання, викликає коливальні навантаження на інструмент та інтенсифікує його знос.

Існує добра кореляція між стійкістю (швидкістю різання) і коефіцієнтом неоднорідності чавуну: найбільшу швидкість різання спостерігають із обробкою чавуну з найменшим ступенем

неоднорідності, який піддавали подвійній нормалізації.

Для інструментальних матеріалів ВК8, К10Д, ВОК71 розроблені рекомендації з режимів різання (швидкість різання) для

точіння з урахуванням неоднорідності високоміцного чавуну.

Найбільшу продуктивність для обробки виробів із ВЧКГ мають різці з пластинами К10Д – гексаніту-Р.

### Список використаних джерел

1. 50th Census of World Casting Production : Modern Casting, December 2016. P. 25–29.
2. Doru M. Stefanescu. ASM Handbook, Volume 1A: Cast Iron Science and Technology. ASM International, 2017. 772 p.
3. Chikali P. B., Shinde V. D. Analysis of machinability in ductile iron casting. Materialstoday: Proceedings. 2020. Vol. 27, Part 1. P. 584-588.
4. Залога В. О., Гончаров В. Д., Залога О. О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні: навч. посіб. / за заг. ред. В. О. Залого. Суми: Сумський державний університет, 2013. 371 с.
5. Радкевич С. І., Глембоцька, Л. Є., Мельничук П. П. Оброблюваність чавунів при фінішному торцевому фрезеруванні плоских поверхонь надтвердими матеріалами. *Технічна інженерія*. 2021. № 1 (87). С. 38-48.
6. До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні діаграм стану систем «Fe-Si», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg» / В. М. Кропівний, М. В. Босий, О. В. Кузик та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч. II. С. 34-42.
7. Глушкова Д. Б., Волчук В. М. Modern approach to determining the heterogeneity of cast iron. *Вісник ХНАДУ*. 2025. Вип. 108. С. 33-38.
8. Ways of increasing the machinability of high-strength cast iron / N. Lalazarova, G. Komarova, O. Afanasieva, O. Popova. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2024. Вип. 209. С. 18-24.

Лалазарова Наталія Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Тел.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Тел.: +38(067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Афанасьева Ольга Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Тел.: +38 (096) 525-62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Попова Олена Георгіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства, Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. Тел.: +38 (067) 570-12-17. E-mail: o.popova@khai.edu.

Lalazarova Nataliia, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Tel.: +38 (095) 390- 38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Komarova Hanna, PhD, Associate Professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Tel.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Afanasieva Olga, PhD, Associate Professor, Physical Foundations of Electronic Engineering Department, National University of Radio Electronics. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Tel.: +38(096)-525- 62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Popova Olena, PhD, Associate Professor, Department of Composite Structures and Aviation Materials, Kharkiv National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852>+38. Tel.: +38 (067) 570-12- 17. E-mail: o.popova@khai.edu.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.

УДК 621.9:678.742

## ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РЕМОНТУ ЗНОШЕНИХ ОТВОРІВ У КОРПУСНИХ ДЕТАЛЯХ АГРАРНИХ МАШИН ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Д-р техн. наук О. В. Сайчук, асп. О. М. Потоскаєв

## TECHNOLOGICAL ASPECTS OF REPAIRING WORN HOLES IN HOUSING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINES USING NANOCOMPOSITE MATERIALS

Dr.Sc. (Tech.) O. V. Saichuk, Postgraduate student O. M. Potoskaev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351813>

*Анотація.* Сільськогосподарська техніка під час експлуатації зазнає інтенсивних механічних навантажень, абразивного зносу, впливу агресивних середовищ і температурних коливань, що призводить до прискореного зношування корпусних деталей, зокрема зон сполучення елементів типу підшипників, валів і втулкових вузлів. Традиційні методи ремонту – наплавлення, механічна обробка зі збільшенням діаметра, втулкування – мають суттєві обмеження: потребують високотемпературних процесів, дорогого обладнання, а також можуть спричиняти деформації і тріщини в деталях із чавуну. Застосування полімерних навантажувачів відкриває нові можливості для відновлення зношених отворів без термічного впливу. Епоксидні та поліуретанові матриці, модифіковані нанонаповнювачами (графен, вуглецеві нанотрубки, нанодисперсний оксид алюмінію), демонструють високу адгезійну міцність, зносостійкість і стійкість до впливу агресивних середовищ. У статті подано результати досліджень властивостей навантажувачів, розроблено технологічний процес відновлення зношених отворів корпусних деталей із використанням цих матеріалів, проведено порівняння з традиційними методами. Встановлено, що застосування навантажувачів дає змогу підвищити адгезійну міцність до 25 %, зменшити коефіцієнт тертя на 15-20 %, збільшити зносостійкість на 28-32 %, знизити собівартість ремонту на 20-25 %. Запропонована технологія є економічно доцільною, технологічно простою, не потребує високотемпературної обробки та може бути впроваджена на ремонтних підприємствах аграрного сектору.

**Ключові слова:** навантажувачі, полімери, відновлення отворів, корпусні деталі, адгезія, зносостійкість, ремонт, аграрна техніка, епоксидна смола, графен.

**Abstract.** Agricultural machinery components are frequently exposed to intensive cyclic loads, abrasive wear, and aggressive environmental factors, which cause accelerated deterioration of housing parts, particularly bearing and shaft seats. Traditional repair methods such as welding, surfacing, or installing bushings rely on high-temperature processes that often lead to structural deformation, residual stresses, or cracking of cast iron elements, and additionally require expensive

equipment and significant labor costs. In contrast, the application of polymer nanocomposite materials provides a technological simple and energy-efficient alternative for the restoration of worn holes without thermal influence. Polymer matrices based on epoxy and polyurethane resins, modified with various nanofillers such as graphene, carbon nanotubes, and nano-aluminum oxide, demonstrate improved mechanical properties, enhanced adhesion to metal nano-aluminum oxide, demonstrate improved mechanical properties, enhanced adhesion to metal surfaces, increased wear resistance, and high chemical stability during operation.

The present study summarizes experiments investigations on the deformation-strength properties of selected nanocomposite, evaluates their tribological behavior under conditions typical for agricultural machinery operation, and proposes a practical restoration technology for worn housing holes. The methodology includes surface preparation, controlled application of the nanomodified polymer composition, and curing under optimized conditions. Comparative analysis with conventional repair approaches shows that the use of nanocomposites increases adhesion strength by up to 25 %, reduces the friction coefficient by 15-20 %, improves wear resistance by 28-32 %, and decreases overall repair costs by 20-25 %. The developed technology is cost-effective, reliable, and suitable for implementation in repair workshops without the need for specialized high-temperature processing equipment, which confirms its practical relevance for extending the service life of agricultural machinery components.

**Keywords:** nanocomposite materials, polymers, restoration of holes, housing parts, adhesion, wear resistance, agricultural machinery, epoxy resin, graphene, repair technology.

**Вступ.** В умовах сучасного аграрного виробництва зростає потреба в підвищенні ефективності ремонту та відновлення сільськогосподарської техніки. Значна частка відмов машин пов'язана з виходом із ладу корпусних деталей, зокрема зношуванням отворів під підшипники та вали. Традиційні методи ремонту, такі як наплавлення, зварювання, втулкування, не завжди забезпечують довготривалий результат і часто супроводжені високими витратами часу та ресурсів. Полімерні нанокompозитні матеріали відкривають нові перспективи завдяки поєднанню високих механічних властивостей, стійкості до зношування та корозії, низької густини і технологічної простоти застосування. Введення нанорозмірних частинок у полімерну матрицю дає змогу значно підвищити її експлуатаційні характеристики – забезпечити зростання адгезійних характеристик і міцності на стиск, теплопровідність, що сприяє більш рівномірному відведенню тепла з відремонтованої ділянки та зниженню ризику локальних температурних напружень під час роботи вузла, а також

зменшенню усадки та зниженню коефіцієнта тертя. Такий підхід особливо актуальний для ремонту чавунних і сталевих деталей, що працюють у жорстких умовах аграрного виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика підвищення ефективності ремонту корпусних деталей сільськогосподарської техніки є актуальною через інтенсивний знос посадкових отворів під час експлуатації машин. У роботах [3] досліджено традиційні методи ремонту – наплавлення, зварювання, втулкування, які, хоча і забезпечують відновлення геометричних параметрів, мають суттєві недоліки: високу трудомісткість, енергоємність і ризик виникнення термічних деформацій у чавунних корпусних деталях.

Автори роботи [7] звертають увагу на перспективність полімерних композитів як альтернативу металевим технологіям відновлення. Значну увагу приділено вивченню властивостей полімерних нанокompозитних матеріалів. У працях [2, 10] наведено результати впровадження нанокompозитів у машинобудуванні, які підтверджують покращення механічних і

трибологічних характеристик полімерних систем за рахунок введення нанонаповнювачів. Додавання графену або вуглецевих нанотрубок до епоксидної матриці суттєво підвищує зносостійкість і знижує коефіцієнт тертя [4, 6].

Вітчизняні дослідження [5, 9] також підтверджують позитивний вплив наночастинок на адгезійні властивості полімерних систем і їхню стійкість щодо механічних навантажень. Проте більшість робіт зосереджені на матеріалознавчих аспектах і не розглядають повний технологічний процес ремонту зношених отворів корпусних деталей із використанням нанокompозитів [1, 8].

Отже, незважаючи на наявність значної кількості публікацій, питання комплексного розроблення та практичної реалізації технології ремонту корпусних деталей із застосуванням полімерних нанокompозитів залишається недостатньо дослідженим, що визначає актуальність цього дослідження.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є обґрунтування та експериментальна перевірка ефективності технології ремонту зношених отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки з використанням полімерних нанокompозитних матеріалів.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- дослідити вплив типу полімерної матриці та нанонаповнювача на механічні, адгезійні, трибологічні властивості композицій;

- розробити технологічний процес відновлення зношених отворів корпусних деталей із застосуванням нанокompозитів;

- оцінити адгезійну міцність і зносостійкість отриманих покриттів;

- порівняти традиційні методи ремонту щодо якості, тривалості та собівартості процесу

В основі досліджень лежить застосування полімерних нанокompозитних матеріалів для відновлення зношених

отворів у корпусних деталях сільськогосподарських машин, які зазнають значних механічних навантажень і агресивного впливу експлуатаційних факторів [8]. Вибір саме полімерних нанокompозитів зумовлений їхніми унікальними властивостями, що поєднують високу механічну міцність, зносостійкість, покращену адгезію до металевих поверхонь, а також можливість нанесення без використання високотемпературних процесів, що є критичним для чавунних корпусних деталей.

Для формування нанокompозитних матеріалів використовували епоксидні та поліуретанові матриці, які модифіковані нанонаповнювачами: графеном, вуглецевими нанотрубками та нанодисперсним оксидом алюмінію [7]. Вибір цих наповнювачів обґрунтований їхньою високою механічною міцністю, термостійкістю і здатністю значно покращувати фізико-механічні властивості полімерних систем навіть за малих концентрацій.

Композиційні матеріали готували за допомогою ультразвукового диспергування нанонаповнювачів у полімерній матриці, що забезпечувало рівномірне розподілення частинок і запобігало агрегації. Концентрації наповнювачів були вибрані експериментально в межах 0,3-2 % за масою, що допомагало досягти оптимального балансу між механічними властивостями та технологічністю нанесення.

Технологія ремонту зношених отворів починалася з підготовки поверхні: очищення від мастильних матеріалів, іржі та бруду, механічної обробки для підвищення шорсткості та знежирення. Така підготовка забезпечувала необхідну адгезію полімерного нанокompозита до металу.

Наносили композит заливанням або шпателем із подальшим формуванням геометрії отвору за допомогою спеціальних оправок. Полімеризація відбувалася за кімнатної температури протягом 24 год, що виключало термічні деформації корпусних деталей.

Експериментальні дослідження з адгезійної міцності проводили за методом відриву, що показало збільшення міцності зчеплення відновленого шару з металом на 23-25 % порівняно з чистою полімерною матрицею. Це пояснюють як механічним зачепленням на шорсткій поверхні, так і хімічною взаємодією нанонаповнювачів із металом [8].

Випробування на зносостійкість проводили за стандартними методиками трибологічних тестів, які імітували робочі умови підшипникових вузлів. Результати свідчать про зниження коефіцієнта тертя на 15-20 %, що значно зменшує теплове навантаження та підвищує ресурс деталі.

Важливим фактором є також економічна ефективність запропонованої технології. Порівняння із традиційними методами наплавлення показало скорочення часу ремонту приблизно на 30 %, зниження енергоспоживання та собівартості на 20-25 %. Окрім того, відсутність нагрівання корпусних деталей знижує ризик появи термічних тріщин і деформацій, що позитивно впливає на надійність ремонту [9].

Додаткові експлуатаційні випробування показали збільшення ресурсу корпусних деталей після ремонту на основі нанокompозитів у середньому на 30 %, що свідчить про високий потенціал технології для використання в аграрному секторі.

**Основна частина дослідження.** Для досліджень використовували епоксидні та поліуретанові матриці, модифіковані нанонаповнювачами – графеном, вуглецевими нанотрубками та нанодисперсним оксидом алюмінію [4-6]. Композиції готували методом ультразвукового диспергування, що забезпечувало рівномірний розподіл частинок і запобігало їхній агрегації. Оптимальна концентрація наповнювачів становила 0,3-2 % за масою. Поверхню отворів очищували, шліфували та знежирювали, забезпечуючи шорсткість  $Ra = 5-10$  мкм [1, 5]. Наносили матеріал заливанням або шпателем із подальшим

формуванням отвору за допомогою оправки. Полімеризація відбувалася за температури 20-25 °C протягом 24 год. Випробування показали підвищення адгезійної міцності на 23-25 % і зниження коефіцієнта тертя на 15-20 % порівняно з базовими полімерними матеріалами. Зносостійкість збільшилася на 28-32 %, що забезпечує подовження ресурсу корпусних деталей у середньому на 30 %. Економічний аналіз підтвердив доцільність застосування нанокompозитів: скорочення часу ремонту до 30 %, зниження енергоспоживання і собівартості на 20-25 %. Запропонована технологія є простою, економічно вигідною та придатною для впровадження на ремонтних підприємствах аграрного сектору.

Отримані результати підтверджують, що полімерні нанокompозити є перспективним напрямом у сфері відновлення зношених посадкових місць, поєднуючи механічну ефективність із технологічною простотою та економічністю [6, 9].

Важливим етапом технології відновлення зношених отворів є вибір оптимальних параметрів підготовки поверхні корпусної деталі. Встановлено, що для досягнення максимальної адгезії полімерного нанокompозита необхідно забезпечити певний рівень шорсткості поверхні. Надмірно гладка поверхня призводить до зниження механічного зачеплення, тоді як надто груба може спричинити нерівномірний розподіл напружень і погіршення адгезії. Найкращі результати були отримані за шорсткості  $Ra$  5-10 мкм, чого досягають за допомогою механічного шліфування або піскоструминної обробки.

Перед нанесенням нанокompозита поверхню знежирювали ізопропіловим спиртом, що допомагає видалити пил, масла та інші забруднювачі, які можуть утворити бар'єр для міцного зчеплення. Цей простий, але важливий крок істотно підвищував якість ремонту і повторюваність результатів.

Приготування полімерних нанокомпозитів потребувало точного дотримання пропорцій і ретельного змішування компонентів. Ультразвукове диспергування забезпечувало рівномірний розподіл наночастинок і запобігало їхній агрегації, що критично для досягнення високих експлуатаційних характеристик матеріалу. Занадто велика концентрація нанонаповнювачів (>2 % мас.) призводила до зниження реологічних властивостей суміші, ускладнюючи її нанесення та формування рівної поверхні.

Як основні типи полімерних матриць були вибрані епоксидні смоли через їхню високу хімічну стійкість, міцність і добру адгезію, а також поліуретанові системи, які відрізняються більшою еластичністю і ударною міцністю. Комбінування типів матриць і нанонаповнювачів давало змогу адаптувати матеріал під конкретні умови експлуатації і типи навантажень.

Наносили нанокомпозитний матеріал на підготовлену поверхню вручну або за допомогою спеціальних оправок, що забезпечували потрібну форму і розміри відновленого отвору. Важливою перевагою запропонованої технології є відсутність необхідності застосування високотемпературних режимів полімеризації – процес проходив за кімнатної температури (20-25 °C), що допомагало уникнути термічних напружень і деформацій металевих деталей, характерних для традиційних методів наплавлення або зварювання.

Після полімеризації відновлені отвори проходили механічну обробку (шліфування, фрезерування) до номінального розміру з дотриманням необхідних допусків і шорсткості поверхні, що гарантувало коректну роботу вузла для монтажу підшипників або інших елементів.

Лабораторні дослідження міцності адгезії показали стабільне підвищення зчеплення на 23-25 % порівняно з базовими полімерними матеріалами без нанонаповнювачів. Це підтверджує важливу роль наночастинок у формуванні міцного

контакту між полімером і металом за рахунок підвищення площі контактної поверхні і взаємодії на молекулярному рівні.

Трибологічні випробування дали змогу виявити суттєве зниження коефіцієнта тертя (на 15-20 %), що позитивно впливає на довговічність посадкових місць і знижує енергетичні втрати роботи вузлів. Зносостійкість матеріалів за стандартними тестами підвищена на 28-32 %, що дає змогу очікувати значного подовження строку служби відновлених деталей.

Експлуатаційні випробування на реальних вузлах сільськогосподарської техніки підтвердили лабораторні дані: після ремонту нанокомпозитами знос корпусних деталей знижений, а ресурс збільшений у середньому на 30 %, що є вагомим аргументом для впровадження технології.

Економічний аспект також був детально проаналізований. Використання нанокомпозитів дало змогу знизити загальну собівартість ремонту на 20-25 %, що пов'язано з відсутністю дорогого термічного устаткування, меншими затратами часу на ремонт і більшою надійністю відновлених деталей, що зменшує кількість повторних ремонтів.

Отже, запропонована технологія поєднує науково обґрунтовані підходи для вибору матеріалів і методів нанесення, що допомагає отримати якісне і економічно вигідне рішення для ремонту зношених отворів у корпусних деталях аграрної техніки.

Одним із головних аспектів ефективності застосування полімерних нанокомпозитів у ремонті корпусних деталей є вибір оптимальних типів нанонаповнювачів, що значною мірою визначають кінцеві механічні, трибологічні та хімічні властивості матеріалу. Під час досліджень були проаналізовані три основні типи наповнювачів: графен, вуглецеві нанотрубки та нанодисперсний оксид алюмінію.

**Графен** має унікальну двовимірну структуру, що забезпечує високу механічну міцність і виняткові теплопровідні властивості. Введення графенових нанопластинок в епоксидну матрицю дало змогу значно покращити розподіл напружень у полімері та підвищити його зносостійкість. Крім того, графен знижував коефіцієнт тертя, що позитивно впливало на роботу посадкових місць.

**Вуглецеві нанотрубки (ВНТ)** мають високу міцність на розтяг, жорсткість і хімічну стійкість. Їх додавання до полімерних матриць підвищувало ударну міцність композиції і покращувало її адгезійні властивості за рахунок збільшення контактної площі та формування ефективної мережі взаємозв'язаних наноструктур [2].

**Нанодисперсний оксид алюмінію ( $Al_2O_3$ )** має високу твердість і термостійкість, тому використання цього наповнювача сприяло підвищенню жорсткості і зносостійкості полімерних композицій, особливо в умовах агресивного впливу абразивних частинок і температурних коливань, характерних для сільськогосподарських умов експлуатації.

Оптимальні концентрації нанонаповнювачів визначали експериментально, адже надлишок може призвести до агрегації, що знижує ефективність і ускладнює нанесення матеріалу [7]. Найкращі результати були отримані за концентрацій від 0,5 до 1,5 % масових для графену, 0,3-1 % – вуглецевих нанотрубок, 1-2 % – оксиду алюмінію.

Щодо полімерних матриць, то епоксидні смоли були вибрані через високу хімічну стійкість і твердість, що забезпечує міцне зчеплення з металом. Водночас поліуретанові матриці додавали гнучкості, підвищуючи ударну стійкість відновлених отворів і знижуючи крихкість покриття, що є важливим для деталей, які працюють в умовах вібраційних навантажень.

Під час експериментів було встановлено, що суміш епоксидної смоли з 1 % графену і 1 % вуглецевих нанотрубок

демонструє оптимальне поєднання механічних і трибологічних властивостей. Вона забезпечує високу адгезійну міцність (понад 25 МПа), знижений коефіцієнт тертя (0,15-0,18 порівняно зі стандартним 0,22-0,25) і значне підвищення зносостійкості.

Технологія нанесення композиції була випробувана на корпусних деталях із чавуну і сталі, що мають посадкові отвори діаметром від 20 до 60 мм, типові для сільськогосподарської техніки. Після нанесення та полімеризації матеріал легко обробляли механічно з дотриманням допусків, необхідних для встановлення підшипників і втулок [10].

Трибологічні випробування, що імітували умови роботи деталей в агресивному середовищі, підтвердили значне зниження зношування за рахунок ефективного зменшення тертя і підвищення міцності покриття. Ресурс деталей, відновлених із застосуванням полімерних наноконкомпозитів, збільшився в середньому на 30-35 % порівняно з традиційними ремонтними методами.

Економічний аналіз технології показав її конкурентоспроможність і перспективність для впровадження в ремонтних цехах агропідприємств. Основними перевагами є низька собівартість матеріалів, відсутність необхідності у спеціалізованому обладнанні для термічної обробки, а також скорочення часу ремонту [3].

Загалом результати досліджень підтверджують доцільність впровадження запропонованої технології відновлення отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки з використанням полімерних наноконкомпозитних матеріалів. Це дасть змогу значно підвищити надійність машин, знизити експлуатаційні витрати і підтримати сталий розвиток аграрного сектору.

**Висновки.** Застосування полімерних наноконкомпозитних матеріалів для ремонту зношених отворів у корпусних деталях аграрної техніки допомагає підвищити їхній ресурс, знизити собівартість і скоротити тривалість ремонту. Технологія є

універсальною та може бути впроваджена на більшості ремонтних підприємств без значних капіталовкладень.

Розроблена технологія відновлення зношених отворів у корпусних деталях сільськогосподарської техніки із застосуванням полімерних нанокомпозитних матеріалів показала високу ефективність. Запропонований метод допомагає значно підвищити адгезійну міцність зчеплення полімерного матеріалу з металом,

покращити зносостійкість і знизити коефіцієнт тертя. Відновлені деталі демонструють збільшений ресурс експлуатації, що позитивно впливає на надійність і економічність аграрної техніки. Технологія є економічно вигідною, технологічно простою і не потребує складного обладнання або високотемпературних процесів, що робить її перспективною для широкого впровадження в ремонтних цехах агропідприємств.

### Список використаних джерел

1. Дем'янчук А. В., Костенко М. І. (2022). Дослідження полімерних композиційних матеріалів для відновлення деталей машин. *Вісник машинобудування та транспорту*. (3). 45–52.
2. Horvath J. & Varga M. (2021). Nanocomposite polymers in machinery repair. *Journal of Materials Engineering*. 12(4). 215–223.
3. Іваненко С. П., Мельник Р. О. (2020). Технології ремонту посадкових місць корпусних деталей сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. (8). 85–91.
4. Li X. & Zhang Y. (2021). Graphene reinforced epoxy composites for wear resistance. *Composites Science and Technology*. 213. 108957.
5. Кравченко Ю. В., Григоренко О. М. (2023). Відновлення отворів у чавунних корпусних деталях із використанням полімерних матеріалів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства*. (4). 102–108.
6. Kim S. et al. (2020). Effect of nanofillers on tribological properties of polymer composites. *Tribology International*. 146. 106216.
7. Петров Д. О., Шевченко І. М. (2021). Використання епоксидних композитів для ремонту обладнання. *Машинобудування та інженерія*. (5). 60–66.
8. Zhang L. & Wu H. (2019). Mechanical properties of polymer composites with carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering A*. 753. 175–184.
9. Коваленко М. С., Лисенко В. П. (2022). Вплив наночастинок на адгезію полімерних композицій. *Сучасні матеріали в машинобудуванні*. (2). 33–39.
10. Singh R. & Sharma P. (2021). Advances in polymer nanocomposites for repair technologies. *Polymer Composites*. 42(5). 1687–1701.

---

Сайчук Олександр Васильович, доктор технічних наук, професор кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0001-5118-838X. Тел.: (0532) 56-96-87. E-mail: oleksandr.saichuk@pdaa.edu.ua.  
Потоскаєв Олексій Миколайович, аспірант кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет. ORCID iD: 0009-0005-3065-9652. Тел.: +380966902004. E-mail: alexei.alexei@ukr.net.

Saichuk Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University. ORCID iD: 0000-0001-5118-838X. Тел.: (0532) 56-96-87. E-mail: oleksandr.saichuk@pdaa.edu.ua.  
Potoskaev Oleksii, postgraduate student, Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University. ORCID iD: 0009-0005-3065-9652. Тел.: +380966902004. E-mail: alexei.alexei@ukr.net.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.

УДК 658.7:338.2

## ПЛАНУВАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ І БУДІВЕЛЬНО-ДОРОЖНІХ ПІДПРИЄМСТВ ПАЛЬНО-МАСТИЛЬНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

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

## PLANNING THE SUPPLY OF FUEL AND LUBRICANTS TO MOTOR TRANSPORT AND ROAD CONSTRUCTION ENTERPRISES

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

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351816>

***Анотація.** Завдання із гарантування працездатності транспортних засобів, машин і виробничого устаткування підприємства через безперерйне забезпечення цих технічних засобів необхідною кількістю пально-мастильних матеріалів покладено на пально-мастильні служби підприємств. Своєчасне виконання всіх завдань, що покладені на службу пально-мастильних матеріалів, неможливе без прогнозування і планування потреб підприємства в цих матеріалах.*

*Встановлено, що чинні нормативні документи передбачають два способи нормування: на одиницю пробігу і одну годину роботи машини. Також в Україні не існує єдиного загальнодержавного нормативного документа, який би встановлював норми витрат пально-мастильних матеріалів у розрахунку на одиницю пробігу, а деякі чинні нормативні документи з нормування витрат пально-мастильних матеріалів потребують заміни на такі, що відповідають сучасній нормативно-правовій базі України.*

*На базі чинних нормативних документів, а також документів рекомендаційного характеру запропоновано методику визначення потреб у пально-мастильних матеріалах для живлення автомобільної та будівельно-дорожньої техніки.*

***Ключові слова:** пальне, запас, нормування, планування, потреби, матеріальне забезпечення.*

***Abstract.** The task of ensuring the operational readiness of an enterprise's vehicles, machinery, and production equipment by continuously supplying these technical means with the necessary amount of fuel and lubricants is entrusted to the fuel and lubricant service of enterprises. Timely fulfillment of all duties assigned to the fuel and lubricant service is impossible without forecasting and planning the enterprise's demand for these materials.*

*The purpose of the study is to create a methodology for determining the needs of motor transport and road construction enterprises in fuel and lubricants, based on both current regulatory and recommendatory documents.*

*It has been determined that current regulatory documents provide two methods of standardization: per unit of mileage and per hour of machine operation. In addition, there is no single national regulatory document in Ukraine establishing consumption norms for fuel and lubricants per unit of mileage, and some of the existing regulatory documents on fuel and lubricant consumption require replacement to align with Ukraine's current legal framework.*

*Any automobile or special equipment can perform two types of useful work: the first type is to move under its own power, both with cargo and empty, for a certain distance outside the production*

site. That is, to perform transport work, which is traditionally measured in ton-kilometers. The second type is to perform certain technological operations within the production site (for example, earthmoving, loading and unloading operations, etc.). That is, to perform technological operations - work that is traditionally measured in machine hours. Calculations of fuel requirements for various types of work are illustrated with examples.

Based on current regulatory documents, as well as documents of a recommendatory nature, a methodology has been proposed for determining the fuel and lubricant requirements for powering automotive and construction and road equipment.

**Keywords:** fuel, stock, rationing, planning, needs, material support.

**Вступ.** Завдання із гарантування працездатності транспортних засобів, машин і виробничого устаткування підприємства через безперебійне забезпечення цих технічних засобів необхідною кількістю пально-мастильних матеріалів покладено на пально-мастильні служби (служби ПММ) підприємств. До основних завдань служби ПММ відносять закупівлю, доставлення, зберігання, заправку виробничої техніки і обладнання паливом, облік і контроль якості ПММ, обслуговування і ремонт технологічного обладнання служби ПММ підприємства. Своєчасне виконання всіх завдань, що покладені на службу ПММ, неможливе без прогнозування і планування потреб підприємства в ПММ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У світі використовують багато сучасних методів нормування пально-мастильних матеріалів для машин, які експлуатовані в різних галузях економіки. Українським є нормування пального для машин, які працюють на віддаленому об'єкті або в полі, куди пальне постачають автомобільними паливозаправниками. Нормування здебільшого спирається на ручне ухвалення рішень із низьким рівнем цифровізації. Запропоновано стратегію нормування пального в польових умовах із використанням інтелектуальної платформи управління [1]. Створено математичну модель нормування пального з використанням даних реального часу і теорії надійності. Використання моделі дає змогу скоротити загальні витрати на розподіл у декілька разів.

Витрати пального кожного кар'єрного самоскида варіюються залежно від різних умов, тому їх важко оцінити, виходячи виключно з інструкцій виробника. Для прогнозування споживання пального використовують штучну нейронну мережу зворотного поширення (BPNN), прогностична здатність якої залежить від типу алгоритму її навчання. У дослідженні [2] застосовано та протестовано три алгоритми навчання і рекомендовано для використання алгоритм Levenberg Marquardt (LMA), що допомагає прогнозувати витрати пального з точністю до 96 %.

Розроблено модель оцінювання споживання пального будівельними вантажівками залежно від перевезеного вантажу, нахилу, відстані та типу покриття. Модель побудована за допомогою алгоритмів машинного навчання з використанням даних, зібраних за допомогою кількох датчиків у спеціально розробленому реєстраторі даних із бездротовим зв'язком [3].

Подано новий підхід для прогнозування споживання пального транспортними засобами за допомогою рекурентної нейронної мережі (RNN), яка використовує лише швидкість, прискорення та нахил дороги як вхідні дані [4]. Модель розроблена для моніторингу транспортних засобів у режимі реального часу, оптимізації планування маршрутів і скорочення витрат, прийнятна для цілей управління автопарком.

Визначено вплив різних параметрів на споживання пального на одиницю тягової сили трактора під час оброблення ґрунту. Зокрема, такими параметрами є потужність

двигуна, індекс текстури, вологість і щільність ґрунту, глибина копання [5]. Побудовано модель штучної нейронної мережі, яка дає змогу оптимізувати витрати пального трактора на тягову силу шляхом підбирання параметрів робочого органа.

Для того щоб визначити, яку модель вантажівки доцільно використовувати на заданому маршруті щодо мінімальних витрат пального, запропоновано використовувати реальні дані з телематичних систем і моделі машинного навчання [6].

Сучасні моделі прогнозування витрат пального важкими вантажівками рідко використовують на практиці, бо демонструють низьку продуктивність через обмеженість точними характеристиками, безпосередньо пов'язаними зі споживанням пального вантажівкою. Використання системи керування двигуном вантажівки (EMS), миттєвий лічильник пального (IFM) для збирання тримісячного набору даних і підхід AutoML, що базований на навчанні, покращує коефіцієнт детермінації традиційних лінійних/поліноміальних моделей до 0,99 [7].

Що стосується України, то тепер актуальним є питання забезпечення стратегічних запасів пально-мастильних матеріалів у структурі державного резерву. Необхідно створити спеціальну модель державного управління запасами нафтопродуктів. Запропоновані напрями вдосконалення державної політики в Україні щодо формування стратегічного резерву нафти і нафтопродуктів на прикладі зарубіжних країн [8].

У загальному випадку потребу підприємства в матеріальних ресурсах, у т. ч. ПММ, часто подають як функцію [9, 10]

$$Q = f(H_v, Q_{\text{вип}}), \quad (1)$$

де  $H_v$  – норма витрат ПММ для випуску одиниці продукції;

$Q_{\text{вип}}$  – об'єм випуску продукції підприємства в плановий період (місяць, рік тощо).

На автотранспортних підприємствах обсяг випуску продукції традиційно називають обсягом транспортної роботи  $Q_{\text{тр}}$ . Із плануванням об'єму транспортної роботи часто виникає певна проблема, сутність якої полягає в тому, що для кожного типу машин обсяг транспортної роботи має різні одиниці вимірювання. Наприклад, для вантажних автомобілів, що перевозять вантажі від складу вантажовідправника до складу вантажоодержувача, обсяг транспортної роботи традиційно вимірюють у тоннокілометрах [11], а для землерийних машин (бульдозери, екскаватори тощо) обсяг транспортної роботи можуть вимірювати і в тоннах, і метрах кубічних [12].

Із нормуванням витрат ПММ ситуація є ще складнішою, адже існують не тільки загальнодержавні та відомчі нормативні документи (НД), а і документи рекомендаційного характеру, є і такі НД, чинність яких слід поставити під сумнів. Для прикладу в табл. 1 наведені найбільш відомі в Україні НД із нормування витрат пального за період з 1996 по 2025 роки.

Таблиця 1

Нормативні документи з нормування витрат пального

Нормативний документ	Державний статус, походження	Дата початку дії	Поточний статус
1	2	3	4
1. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних та спеціальних машин Н218. «Укравтодор» 043-96 [13]	відомчий самостійний документ	01.09.1996	втратив чинність 01.03.2013

Продовження табл. 1

1	2	3	4
2. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних та спеціальних машин (доповнення до норм Н218. «Укравтодор» 043-96) [14]	відомчий доповнення до Норм [13]	01.10.1997	втратив чинність 01.03.2013
3. ДБН В.2.8-12-2000. Типові норми витрат пального і змащувальних матеріалів для експлуатації техніки в будівництві [15]	загальнодержавний самостійний документ	01.07.2000	втратив чинність 01.02.2015
4. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних машин (доповнення 2 до норм Н218. «Укравтодор» 043-96) [16]	відомчий доповнення до Норм [13], похідний від [15]	02.01.2001	чинний
5. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних машин (доповнення 3 до норм Н218. «Укравтодор» 043-96) [17]	відомчий доповнення до Норм [13], похідний від ДБН [15]	01.10.2002	чинний
6. Норми витрат палива і мастильних матеріалів на автомобільному транспорті [18]	відомчий самостійний документ	01.03.2012	втратив чинність 02.11.2023
7. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів для спеціального рухомого складу [19]	відомчий похідний від ДБН [15]	01.06.2008	чинний
8. ДСТУ Б Д.2.7-1:2012. Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів [20]	загальнодержавний самостійний документ	01.01.2014	втратив чинність 28.12.2021
9. BN01:3190-5987-6197-2889. Кошторисні норми України. Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів [21]	загальнодержавний складова частина BN01:5010-8744-9592- 7634. Кошторисні норми України. Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи [22]	28.12.2022	чинний
10. Методичні рекомендації з нормування витрат палива, електричної енергії, мастильних, інших експлуатаційних матеріалів автомобілями та технікою [23]	документ рекомендаційного характеру самостійний документ	17.11.2023	чинний
11. Базові норми витрат (доповнення до Методичних рекомендацій з нормування витрат палива, електричної енергії, мастильних, інших експлуатаційних матеріалів автомобілями та технікою) [24]	документ рекомендаційного характеру доповнення до Методичних рекомендацій [23]	17.11.2023	чинний

Проаналізувавши наведені в табл. 1 нормативні документи, можна дійти таких висновків.

1. У НД з нормування витрат пального є два види норм:

а) норми витрат, встановлені в розрахунку на одиницю пробігу, що є характерним для автомобільної техніки;

б) норми витрат, встановлені в розрахунку на одну годину (або мотогодину) роботи, що є характерним для будівельно-дорожньої (спеціальної) техніки.

2. В Україні не існує єдиного загальнодержавного нормативного документа, який би встановлював норми витрат ПММ у розрахунку на одиницю пробігу (л/100 км, кг/100 км тощо) або транспортної роботи (л/ткм, кг/ткм тощо). Для розрахунку цих норм є лише рекомендації державного підприємства, що належить до сфери управління Міністерства розвитку громад та територій України [23, 24]. Отже, підприємства змушені встановлювати ці норми або покладаючись на власний досвід, або керуючись згаданими вище Методичними рекомендаціями [23, 24]. Це може призвести до суперечок як між підприємствами, так і між суб'єктами господарської діяльності та державними органами, що реалізують державну фінансову політику.

3. В Україні існує загальнодержавний нормативний документ [21], що встановлює норми витрат ПММ автомобільною і спеціальною технікою в розрахунку на одну машино-годину, але його сфера застосування обмежена виробничими майданчиками, у межах яких застосована ця техніка [22].

4. Деякі чинні НД із нормування витрат ПММ є похідними від НД, що втратили чинність [16, 17]. Тому ми вважаємо логічним замінити ці НД на такі, що відповідають сучасній нормативно-правовій базі.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою цієї роботи є

створення методики визначення потреб у ПММ автотранспортного та будівельно-дорожнього підприємства, в основі якої б знаходилися як чинні нормативні, так і рекомендаційні документи.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати види транспортної роботи, що виконує автомобільна чи спеціальна техніка, а на базі цього аналізу розробити порядок визначення витрат пального для парку машин підприємства на розрахунковий період.

**Основна частина дослідження.** На підставі проведеного вище аналізу можна дійти такого висновку: теоретично будь-яка автомобільна чи спеціальна техніка може виконувати два види корисної роботи:

1. Переміщуватися власним ходом як із вантажем, так і порожньою на певну відстань поза межами виробничого майданчика (наприклад перевезення вантажу з Харкова до Полтави), тобто виконувати транспортну роботу, яку традиційно вимірюють у тоннокілометрах.

2. У межах виробничого майданчика здійснювати певні технологічні операції (наприклад земляні, вантажно-розвантажувальні роботи тощо), тобто виконувати технологічні операції – роботу, яку традиційно вимірюють у машино-годинах.

Вочевидь, загальна потреба в пальному для всього парку машин підприємства за розрахунковий період  $j$  (наприклад календарний місяць) буде складатись із загальних потреб у пальному кожної окремої машини  $i$  парку, т,

$$Q_j^\Sigma = \sum_{i=1}^m Q_j^i, \quad (2)$$

де  $m$  – кількість машин у парку підприємства, од.;

$Q_j^i$  – загальна потреба в пальному машини  $i$  парку машин підприємства за період  $j$ , т.

Загальна потреба в пальному машини  $i$  парку машин підприємства за період  $j$ , т,

$$Q_j^i = Q_j^{Ai} + Q_j^{Ci}, \quad (3)$$

де  $Q_j^{Ai}$  – потреба в пальному машини  $i$  на розрахунковий період  $j$  для виконання транспортної роботи поза межами виробничого майданчика, т;

$Q_j^{Ci}$  – потреба в пальному машини  $i$  на розрахунковий період  $j$  для виконання технологічних операцій у межах виробничого майданчика.

Логіку формули (3) можна проілюструвати на таких прикладах.

*Приклад 1.* Автомобільний тягач із напівпричепом завантажують на складі А, після чого вантаж транспортований до складу Б, де  $i$  розвантажений. На транспортування вантажу між складами А і Б слід передбачити пальне в кількості  $Q_j^{Ai}$ , а для виконання технологічних операцій на території складів в кількості  $Q_j^{Ci}$ .

*Приклад 2.* Екскаватор  $i$  привезли на трейлері та запустили в роботу на будівельному майданчику. У такому випадку транспортна складова для екскаватора  $i$  буде відсутня ( $Q_j^{Ai} = 0$ ), а формула (3) набуде вигляду, т,

$$Q_j^i = Q_j^{Ci}. \quad (4)$$

Потребу в пальному машини  $i$  на розрахунковий період  $j$  для виконання транспортної роботи поза межами виробничого майданчика можна визначити за формулою, т,

$$Q_j^{Ai} = Q_{6j}^{Ai} \cdot \left(1 + \frac{k_{j\Sigma}^{Ai}}{100}\right), \quad (5)$$

де  $Q_{6j}^{Ai}$  – базова потреба в пальному машини  $i$  впродовж розрахункового періоду  $j$  для виконання транспортної роботи поза межами виробничого майданчика, т;

$k_{j\Sigma}^{Ai}$  – сумарний коефіцієнт корегування витрат пального під час виконання транспортної роботи машиною  $i$  впродовж розрахункового періоду  $j$ , %.

Потреба в пальному машини  $i$  на розрахунковий період  $j$  для виконання

технологічних операцій у межах виробничого майданчика, т,

$$Q_j^{Ci} = Q_{6j}^{Ci} \cdot \left(1 + \frac{k_{j\Sigma}^{Ci}}{100}\right), \quad (6)$$

де  $Q_{6j}^{Ci}$  – базова потреба в пальному машини  $i$  впродовж розрахункового періоду  $j$  для виконання технологічних операцій у межах виробничого майданчика, т;

$k_{j\Sigma}^{Ci}$  – сумарний коефіцієнт корегування витрат пального під час виконання машиною  $i$  технологічних операцій у межах виробничого майданчика впродовж розрахункового періоду  $j$ , %.

Сумарні коефіцієнти корегування витрат пального  $k_{j\Sigma}^{Ai}$  і  $k_{j\Sigma}^{Ci}$  ураховують фактичні умови роботи машини залежно від погодних умов, рельєфу та плану місцевості, стану дорожнього покриття, режимів роботи машини (вимушені простої з увімкненим двигуном, робота з частими зупинками, робота на зменшених швидкостях і т. ін.) тощо. Для розрахунку значень коефіцієнтів корегування витрат пального  $k_{j\Sigma}^{Ai}$  і  $k_{j\Sigma}^{Ci}$  можна рекомендувати скористатися пунктом 3 Методичних вказівок [23]. Слід розуміти, що в розрахунку сумарного коефіцієнта корегування витрат пального під час виконання машиною технологічних операцій у межах виробничого майданчика  $k_{j\Sigma}^{Ci}$  роботу в холодну пору року враховувати не потрібно, адже ці витрати пального вже враховані в Кошторисних нормах [21].

Для розрахунку базових потреб в пальному машин на базі автомобілів поза межами виробничого майданчика  $Q_{6j}^{Ai}$  можна рекомендувати використання формул із пункту 4 Методичних рекомендацій [23], а для розрахунку базових потреб у пальному машин, що працюють у межах виробничого майданчика (у т. ч. машин на базі автомобілів), краще скористатися формулою, т,

$$Q_j^{Ci} = \frac{T_j^i \cdot H_j^{MGi}}{1000}, \quad (7)$$

де  $T_j^i$  – фонд робочого часу машини моделі  $i$  впродовж розрахункового періоду  $j$ , год;

$H_j^{MGi}$  – норма витрат пального на одну машино-годину роботи машини моделі  $i$ , кг.

Норму витрат пального на одну машино-годину роботи машини моделі  $H_j^{MGi}$  рекомендовано призначити відповідно до вимог загальнодержавного нормативного документа [21].

Фонд робочого часу кожної машини  $i$  впродовж розрахункового періоду можна визначити, наприклад, за формулою, год,

$$T_j^i = t_{jзм}^i \cdot n_{jзм}^i \cdot D_{jр}^i \cdot k_{jв}^i, \quad (8)$$

де  $t_{jзм}^i$  – тривалість робочої зміни машини  $i$  впродовж розрахункового періоду  $j$ , год;

$n_{jзм}^i$  – кількість робочих змін протягом доби машини  $i$  впродовж розрахункового періоду  $j$ ;

$D_{jр}^i$  – кількість робочих діб машини  $i$  впродовж розрахункового періоду  $j$ ;

$k_{jв}^i$  – коефіцієнт використання робочого часу протягом робочої зміни машини  $i$  впродовж розрахункового періоду  $j$ .

Усі складові формули (8), за винятком останньої, встановлені розпорядчими документами підприємства. Використання робочого часу протягом робочої зміни законодавство України не регламентує [25], тому його значення рекомендовано встановлювати розрахунковим методом, що наведений у літературі з нормування праці [26].

За результатами проведеного дослідження можна рекомендувати порядок визначення витрат пального для машини парку підприємства на розрахунковий період, що наведений у табл. 2.

Таблиця 2

Рекомендований порядок визначення витрат пального для машини  $i$  парку підприємства на розрахунковий період  $j$

Номер кроку	Операція	Позначення	Джерело
1	2	3	4
1	Призначення показників режиму роботи машини	$t_{jзм}^i, n_{jзм}^i, D_{jр}^i$	розпорядчі документи підприємства
2	Визначення коефіцієнта використання робочого часу протягом робочої зміни машини	$k_{jв}^i$	[26]
3	Розрахунок фонду робочого часу машини	$T_j^i$	(8)
4	Призначення норми витрат пального на одну машино-годину роботи машини	$H_j^{MGi}$	[21]
5	Призначення норми витрат пального на одну машино-годину роботи машини	$H_j^{MGi}$	[21]
6	Розрахунок базової потреби в пальному машини під час її роботи в межах виробничого майданчика	$Q_j^{Ci}$	(7)
7	Розрахунок сумарного коефіцієнта корегування витрат пального для роботи машини в межах виробничого майданчика	$k_{j\Sigma}^{Ci}$	[23]

Продовження табл. 2

1	2	3	4
8	Розрахунок потреби в пальному для роботи машини в межах виробничого майданчика	$Q_j^{Ci}$	(6)
9	Розрахунок базової потреби в пальному машини для роботи поза межами виробничого майданчика	$Q_{6j}^{Ai}$	[23]
10	Розрахунок сумарного коефіцієнта корегування витрат пального для роботи машини поза межами виробничого майданчика	$k_{j\Sigma}^{Ai}$	[23]
11	Розрахунок потреби в пальному для роботи машини поза межами виробничого майданчика	$Q_j^{Ai}$	(5)
12	Розрахунок загальної потреби в пальному для живлення машини	$Q_j^i$	(3)

Наприкінці цього дослідження слід зазначити, що останній доданок формули (3) – потреба в пальному для живлення машини на розрахунковий період для роботи в межах виробничого майданчика  $Q_j^{Ci}$  – для будівельних машин на базі автомобільних шасі може бути визначений не тільки за допомогою Кошторисних норм [21], але і Методичних вказівок [23]. Натомість, у випадках, коли до фінансування будівельних робіт залучені кошти державного бюджету, то використання в розрахунку Кошторисних норм є обов'язковим [22].

#### Висновки

1. Проаналізовано нормативні документи щодо нормування витрат пального для будівельно-дорожніх робіт, на базі чого встановлено таке:

- чинними нормативними документами передбачено два способи нормування: на одиницю пробігу і одну годину роботи машини;

- в Україні не існує загальнодержавних нормативів, які встановлюють норми витрат пально-мастильних матеріалів у розрахунку на одиницю пробігу, існують лише документи рекомендаційного характеру;

- в Україні існує загальнодержавний нормативний документ, що встановлює норми витрат пально-мастильних матеріалів автомобільною і спеціальною технікою в розрахунку на одну машино-годину;

- деякі чинні нормативні документи з нормування витрат пально-мастильних матеріалів є похідними від нормативних документів, що втратили чинність, тому ці нормативні документи потрібно замінити на такі, що відповідають сучасній нормативно-правовій базі України.

2. Проаналізовано види транспортної роботи, що виконує автомобільна чи спеціальна техніка, на базі якого запропонований порядок визначення витрат пального для парку машин підприємства на розрахунковий період.

#### Список використаних джерел

1. Ma L., Jiang D., Xin M., Lin J., Wang Y. Fuel rationing strategy in farmland based on intelligent management platform for agricultural machinery. *Nongye Gongcheng Xuebao Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2024. 40 (15). P. 22–33. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202401027>.

2. Arhinful K. O., Agyei G. Fuel Consumption Prediction in Shovel-Truck System of Surface Mine Using Artificial Neural Network. *Nipes Journal of Science and Technology Research*. 2023. 5 (2). P. 344–358. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8075149>.
3. Gonçalo Pereira, Manuel Parente, João Moutinho, Manuel Sampaio. Fuel Consumption Prediction for Construction Trucks: A Noninvasive Approach Using Dedicated Sensors and Machine Learning. *Infrastructures*. 2021. 6 (11). 157. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110157>.
4. Pandolfi A., Adinolfi E. A., Polverino P., Pianese C. Real-Time Prediction of Fuel Consumption via Recurrent Neural Network (RNN) for Monitoring, Route Planning Optimization and CO<sub>2</sub> Reduction of Heavy-Duty Vehicles. *SAE Technical Papers*. 2023. <https://doi.org/10.4271/2023-24-0175>.
5. Saleh M. Al-Sager, Saad S. Almady, Samy A. Marey, Saad A. Al-Hamed, Abdulwahed M. Aboukarima. Prediction of Specific Fuel Consumption of a Tractor during the Tillage Process Using an Artificial Neural Network Method. *Agronomy*. 2024. 14 (3). 492. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030492>.
6. Thomas Bousonville, David Cheubou Kamga, Thilo Krüger, Martin Dirichs. Data driven analysis and forecasting of medium and heavy truck fuel consumption. *Enterprise Information Systems*. 2022. Vol. 16, Iss. 6. <https://doi.org/10.1080/17517575.2020.1856417>.
7. Liangkai Liu, Wei Li, Dawei Wang, Yi Wu, Ruigang Yang, Weisong Shi. Fuel rate prediction for heavy-duty trucks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023. Vol. 24, No. 8. P. 8222-8235. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3265007>.
8. Chechel O., Bashuk A. State policy on provision of strategic stocks of petroleum products in the structure of the state reserve. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. 5 (4). P. 42–48. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.314545>.
9. Дикань В. Л., Маслово В. О. Організація виробництва : підручник. Харків: УкрДАЗТ, 2013. 422 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/2456> (дата звернення: 04.09.2025).
10. Турченко М. О., Швець М. Д., Кірічок О. Г., Кристопчук М. Є. Планування діяльності автотранспортного підприємства : підручник. Вид. 2-ге, перероб. та доп. Рівне: НУВГП, 2017. 367 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/297133058.pdf> (дата звернення: 04.09.2025).
11. Вовк Ю. Я., Вовк І. П. Основи теорії транспортних процесів і систем: навч. посіб. (курс лекцій). Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2021. 104 с. URL: <https://surl.li/vmbfjk> (дата звернення: 04.09.2025).
12. Романович Є. В., Козар Л. М., Бабенко А. О., Євтушенко А. В. Механізація вантажно-розвантажувальних робіт на прирейкових складах : навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2024. 247 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/24043> (дата звернення: 04.09.2025).
13. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних та спеціальних машин Н218. «Укравтодор» 043-96 : затв. Українською державною корпорацією по будівництву, ремонту та утриманню автомобільних доріг «Укравтодор» Міністерства транспорту України 14.08.1996 р. Норми / Нормативні акти / Аналітично-правова система Zakononline. URL: [https://zakononline.ua/documents/show/94119\\_\\_94119](https://zakononline.ua/documents/show/94119__94119) (дата звернення: 06.09.2025). (Втратили чинність в Україні.)
14. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних та спеціальних машин (доповнення до норм Н218. «Укравтодор» 043-96): затв. Українською державною корпорацією по будівництву, ремонту та утриманню автомобільних доріг «Укравтодор» Міністерства транспорту України 01.10.1997 р. Норми / Нормативні акти / Аналітично-правова система Zakononline. URL: [https://zakononline.ua/documents/show/142363\\_\\_142363](https://zakononline.ua/documents/show/142363__142363) (дата звернення: 06.09.2025). (Втратили чинність в Україні.)

15. ДБН В.2.8-12-2000. Типові норми витрат пального і змащувальних матеріалів для експлуатації техніки в будівництві : чинні від 01.07.2000 р. ДБН / НД України / Файли / Портал Державних Будівельних Норм України. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-214> (дата звернення: 06.09.2025). (Втратили чинність в Україні.)

16. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних та спеціальних машин (доповнення 2 до норм Н218. «Укравтодор» 043-96) : затв. Українською державною корпорацією по будівництву, ремонту та утриманню автомобільних доріг «Укравтодор» Міністерства транспорту України 29.12.2000 р. Норми / Нормативні акти / Аналітично-правова система Zakononline. URL: [https://zakononline.ua/documents/show/50885\\_\\_50885](https://zakononline.ua/documents/show/50885__50885) (дата звернення: 06.09.2025).

17. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних машин (доповнення 3 до норм Н218. «Укравтодор» 043-96): затв. Державною службою автомобільних доріг України «Укравтодор» Міністерства транспорту України 19.09.2002 р. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0435466-02#top> (дата звернення: 06.09.2025).

18. Норми витрат палива і мастильних матеріалів на автомобільному транспорті : затв. Міністерством транспорту України 10.02.1998 р. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0043361-98#Text> (дата звернення: 06.09.2025). (Втратили чинність в Україні.)

19. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів для спеціального рухомого складу: затв. Міністерством транспорту України 03.03.2008 р. Норми / Нормативні акти / Аналітично-правова система Zakononline. URL: [https://zakononline.ua/documents/show/87747\\_\\_87747](https://zakononline.ua/documents/show/87747__87747) (дата звернення: 06.09.2025).

20. ДСТУ Б Д.2.7-1:2012. Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів: чинний від 01.01.2014. ДСТУ / НД України / Файли / Портал Державних Будівельних Норм України. URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_b\\_d\\_2\\_7\\_1\\_2012\\_resursni\\_koshtorisni\\_normi\\_eksploatacii\\_budivelnikh\\_mashin\\_ta\\_mekhanizmiv/5-1-0-1202](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_d_2_7_1_2012_resursni_koshtorisni_normi_eksploatacii_budivelnikh_mashin_ta_mekhanizmiv/5-1-0-1202) (дата звернення: 06.09.2025). (Втратив чинність в Україні.)

21. Кошторисні норми України. Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів : BN01:3190-5987-6197-2889: затв. Міністерством розвитку громад та територій України 15.06.2021 р. Нормативні документи технічного характеру / Реєстри / Головна / Портал Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва. URL: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3003183069977904982?doc\\_type=6](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3003183069977904982?doc_type=6) (дата звернення: 06.09.2025).

22. BN01:5010-8744-9592-7634. Кошторисні норми України. Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи : затв. Міністерством розвитку громад та територій України 31.12.2021 р. Нормативні документи технічного характеру / Реєстри / Головна / Портал Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва. URL: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3043786250923279794?doc\\_type=1](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3043786250923279794?doc_type=1) (дата звернення: 07.09.2025).

23. Методичні рекомендації з нормування витрат палива, електричної енергії, мастильних, інших експлуатаційних матеріалів автомобілями та технікою: затв. ДП «ДержавтотрансНДІпроект» 17.11.2023 р. Розроблення тимчасових лінійних норм витрат палива / Напрями діяльності / ДП «ДержавтотрансНДІпроект». URL: <https://insat.org.ua/files/services/ldvpe/6/metod.pdf> (дата звернення: 06.09.2025).

24. Базові норми витрат (доповнення до Методичних рекомендацій з нормування витрат палива, електричної енергії, мастильних, інших експлуатаційних матеріалів автомобілями та технікою): затв. ДП «ДержавтотрансНДІпроект» 17.11.2023 р. Розроблення тимчасових лінійних норм витрат палива / Напрями діяльності / ДП «ДержавтотрансНДІпроект». URL: <https://insat.org.ua/files/services/ldvpe/6/baz.pdf> (дата звернення: 06.09.2025).

25. Щодо норми тривалості робочого часу: роз'яснює Держпраці. Блог / М.Е.Дос.  
URL: <https://surl.luh.gov.ua/gevehs>. (дата звернення: 09.09.2025).

26. Нормування праці і організація робочого місця: навч. посіб. / за ред. С. М. Погорелова. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. 394 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/9cbf9adf-7f4f-4caf-9d5c-d150e4930114/content> (дата звернення: 09.09.2025).

---

Романович Євгеній Валентинович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2555-5849. Тел.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: [0674274770@ukr.net](mailto:0674274770@ukr.net).

Бабенко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Тел.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: [babenko\\_spprm@ukr.net](mailto:babenko_spprm@ukr.net).

Козар Леонід Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3740-6966. Тел.: +38 (050) 302-42-75. E-mail: [leokozar@gmail.com](mailto:leokozar@gmail.com).

Козар Микита Леонідович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-8560-5910. Тел.: +38 (050) 402-65-70. E-mail: [nikita.kozar@gmail.com](mailto:nikita.kozar@gmail.com).

Romanovych Yevhenii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2555-5849. Tel.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: [0674274770@ukr.net](mailto:0674274770@ukr.net).

Babenko Andrii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Tel.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: [babenko\\_spprm@ukr.net](mailto:babenko_spprm@ukr.net).

Kozar Leonid, PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3740-6966. Tel.: +38 (050) 302-42-75. E-mail: [leokozar@gmail.com](mailto:leokozar@gmail.com).

Kozar Mykyta, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-8560-5910. Tel.: +38 (050) 402-65-70. E-mail: [nikita.kozar@gmail.com](mailto:nikita.kozar@gmail.com).

Статтю прийнято 01.12.2025 р.

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 624.04:72.01:528.4

**ІНТЕГРАЦІЯ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ У BIM  
ЗА ДОПОМОГОЮ COBie: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ**

Канд. техн. наук В. В. Виноградов, старш. викл. Т. М. Альошечкіна

**INTEGRATION OF FACILITY MANAGEMENT INFORMATION INTO BIM USING  
COBie: CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS**

PhD (Tech.) V. Vynohradov, Sr. lecturer T. Aloshechkina

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351818>

***Анотація.** Потенціал BIM залишається недостатньо реалізованим на етапі експлуатації та обслуговування будівлі. Після завершення будівництва власники досі змушені отримувати паперові документи для заповнення інформації, необхідної для ефективного управління об'єктом. Щоб вирішити цю проблему, у дослідженні запропоновано модель процесу, яка дає змогу збирати потрібні дані для управління об'єктом та інтегрувати їх у BIM. Для цього використовують підхід Construction Operations Building Information Exchange (COBie), який передбачає збір і структурування інформації, що створювана на етапах проєктування та будівництва. Це дає змогу власникам безпосередньо імпортувати зібрані дані в системи управління обслуговуванням для підтримки функціонування будівлі. Також у роботі розглянуто перспективи подальшого розвитку цього підходу.*

***Ключові слова:** інформаційне моделювання будівель, управління об'єктами, COBie, життєвий цикл будівлі, інтеграція даних, цифрові процеси, експлуатація будівель, оптимізація робочих процесів.*

***Abstract.** Building Information Modeling (BIM) has become an essential tool for architectural, engineering, and construction (AEC) companies, enabling efficient data management and integration throughout all stages of a building's lifecycle. It provides significant advantages over traditional methods. BIM models serve as a critical link between design and construction, being applied to detail geometry, address constructability issues, track materials, describe functional characteristics, and implement workflows. However, BIM's potential remains underutilized during the operation and maintenance phase of buildings. After construction is completed, building owners are often forced to rely on paper-based documentation to gather the necessary information for effective facility management. The Construction Operations Building Information Exchange (COBie) offers a simplified and efficient framework for gathering and sharing data during the design and construction stages, specifically catering to the needs of facility operators. By replacing traditional paper-based documentation workflows with digital processes, COBie eliminates the burdensome task of managing large volumes of paperwork post-construction. It also removes the necessity for retrospective data collection, thus significantly reducing operational costs and enhancing data reliability. This study proposes a process model designed to collect the required data for facility management and integrate it into BIM. The Construction Operations Building Information Exchange (COBie) approach is employed to structure and gather information generated during the design and construction phases.*

*This enables building owners to directly import collected data into facility management systems, supporting the building's operation. Additionally, the paper explores prospects for the further development of this approach.*

**Keywords:** *Building Information Modeling (BIM), facility management, COBie, building lifecycle, data integration, digital processes, building operation, workflow optimization.*

**Вступ.** Архітектори, підрядники, консультанти і оператори з різних дисциплін генерують значну кількість інформації в різних форматах протягом проектування та будівництва об'єкта [1]. Після завершення будівництва цю інформацію, необхідну для експлуатації, обслуговування та ухвалення управлінських рішень, передають власнику у вигляді виконавчих документів.

Для ефективного управління об'єктом потрібен процес збору та інтеграції даних, створених на етапах проєктування і будівництва. Один із підходів передбачає використання систем електронного документо-обігу (EDMS), що забезпечують систематизацію та управління великим обсягом документації [2, 3]. Інший підхід базований на моделюванні даних, яке використовує стандарти CADD/GIS, базову модель будівель і класи промисловості. Він передбачає автоматизацію створення документів і передавання інформації між учасниками АЕС.

BIM (Building Information Modeling) є потужним інструментом для створення цифрового подання фізичних і функціональних характеристик об'єкта. Він забезпечує спільний доступ до інформації про об'єкт і підтримує ухвалення рішень на всіх етапах його життєвого циклу [4]. У BIM реальні елементи будівель відображено як тривимірні об'єкти, що містять не лише геометричні дані, але і додаткову інформацію, таку як вартість, виробники, вогнестійкість, графіки обслуговування тощо [2-4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні практичні зміни демонструють активне впровадження BIM для передавання даних управління об'єктами. Наприклад, ініціативи FMie від building SMART [5], технології CAD [6] і системи автоматизації будівель (BAS) [7]. У

деяких країнах, як у Великій Британії, використання BIM є обов'язковим [8]. Впровадження BIM рівня три потребує створення єдиного джерела даних у відкритому середовищі. У США цей підхід не є уніфікованим і базований на кількох форматах, визначених Адміністрацією загального обслуговування (GSA) [6].

Проте в сучасних процесах інтеграції інформації бракує інструментів для впорядкування знань, необхідних для ухвалення обґрунтованих рішень про подовження життєвого циклу будівлі. Для розв'язання цієї проблеми в дослідженні запропоновано модель процесу інтеграції інформації в рамках BIM, що базована на підході Construction Operations Building Information Exchange (COBie).

Ця модель описує процедуру збору даних і впровадження наборів COBie у системи управління обслуговуванням (CMMS). Вона відстежує інформацію від її створення під час проєктування і будівництва до інтеграції в експлуатаційні системи та передавання власнику. З огляду на поширення інтелектуальних технологій у будівлях, виникає потреба у трансформації FM-даних для інтеграції з розумними пристроями. Для цього потрібні зміни у схемі COBie і способах передавання даних, щоб забезпечити обмін через мережу замість використання електронних таблиць або файлів IFC.

У цьому документі описано модель процесу збору та інтеграції даних COBie і обговорено перспективи її подальшого розвитку.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Етап управління та експлуатації об'єкта забезпечує контроль і підтримку функціонування будівлі, зберігаючи її продуктивність на початковому рівні [8]. Основні цілі цього

етапу – подовження терміну експлуатації активів, забезпечення умов для персоналу, підвищення задоволеності користувачів і створення здорового середовища [2, 9, 10].

Для досягнення цих цілей менеджери об'єктів повинні використовувати дані, створені на етапах проектування та будівництва. Зокрема, на етапі проектування інформація охоплює типи матеріалів, характеристики будівлі, плани поверхів і системи. Під час будівництва додають списки обладнання, технічні характеристики, гарантії, графіки обслуговування тощо [2, 10].

Сучасні директиви зосереджені на зменшенні споживання ресурсів і досягненні цілей сталого розвитку для нових та існуючих об'єктів [1, 6, 11]. Ці вимоги впливають не лише на проектування та будівництво, але і подальшу експлуатацію будівель. Наприклад, операції з обслуговування спрямовані на мінімізацію витрат, покращення енергоефективності, зниження споживання води, поліпшення якості повітря та управління матеріалами [12].

Крім того, менеджерам необхідно враховувати дані з додаткових джерел, такі як програми з управління стічними водами, переробки, зовнішнього обслуговування та системних оновлень. Інформація про сталий розвиток і управління об'єктами доступна в таких джерелах, як Whole Building Design Guide [10] і рейтингових системах, зокрема LEED-EBOM для існуючих будівель [12].

Попри зростаючий обсяг і різноманітність даних, менеджери об'єктів часто не мають належних інструментів для систематизації та використання цієї інформації. Інтеграція даних передбачає створення єдиної бази даних, яка містить усі документи, згенеровані на етапах проектування та будівництва [2, 3]. Ця база даних стандартизує дані, даючи змогу різним сторонам отримувати доступ до необхідної інформації у зручному форматі, використовувати її в різних програмних середовищах [10].

Інформаційні технології, зокрема BIM, стали важливим інструментом для

впорядкування та інтеграції даних. Вони дають змогу відстежувати, стандартизувати і надавати інформацію про будівлі протягом усього життєвого циклу. Приклади успішного застосування BIM для управління об'єктами свідчать про його ефективність у досягненні цих цілей [1].

BIM-моделі широко використовуються для розв'язання проблем конструктивності, аналізу перешкод і планування на етапах перед будівництвом [1, 4]. Вони також є інструментом зв'язку між фазами планування та проектування. Однак застосування BIM на етапі експлуатації та обслуговування залишається обмеженим [2, 4]. Інформацію, необхідну для управління об'єктом, зазвичай передають у традиційному паперовому форматі, що створює труднощі для її інтеграції в цифрові моделі.

Для розв'язання цієї проблеми використовують підхід COBie (Construction Operations Building Information Exchange), який спрямований на введення необхідних даних безпосередньо на етапах проектування, будівництва та введення в експлуатацію (Cx). COBie не потребує нової інформації, а структуровано збирає вже створені дані, які надають підрядники та проєктувальники за контрактами [10].

**Основна частина дослідження.** Формати COBie підтримують сумісність між різними програмними продуктами, що дає змогу користувачам налаштовувати модель відповідно до конкретних вимог власника або закладу. Це забезпечує створення єдиного набору даних із різними виглядами для будь-яких цілей, підвищуючи корисність інформації та її доступність для обміну [10].

Дані COBie включають:

- приміщення та зони об'єкта;
- обладнання та його розташування;
- документацію (інструкції, сертифікати, протоколи);
- процедури обслуговування, безпеки, запуску та зупинки;
- ресурси для відповідної діяльності [11].

Переваги COBie:

- зменшення витрат на відтворення паперової документації;
- електронне доставлення інформації про передавання;
- підвищення співпраці між учасниками проекту;
- покращення якості та повноти документації, необхідної для експлуатації об'єкта [4, 10, 13].

Отже, COBie є ефективним рішенням для інтеграції даних управління об'єктами у BIM, сприяючи підвищенню продуктивності, якості обслуговування та довговічності будівель [14, 15].

Підхід COBie охоплює весь життєвий цикл об'єкта: від початкового формулювання вимог до введення в експлуатацію. Він забезпечує ефективний збір, інтеграцію та передавання даних між усіма етапами проекту, підтримуючи ухвалення рішень і подальше управління об'єктом [16].

Етапи документування

1. Початкові цілі та вимоги. Процес COBie починається з визначення власником цілей і вимог об'єкта, що стає основою для створення бази даних.

2. Етап проектування. Ранній дизайн:

- формують найменування об'єктів, визначають вертикальні та горизонтальні простори;
- планують системи для забезпечення функцій приміщень: вентиляційні, механічні, сантехнічні, електричні;
- створюють список об'єктів, кількість поверхів, приміщень, їхніх функцій і типів обладнання.

Скоординований проект включає деталізацію назв обладнання, систем, зонування та планування простору.

Фінальне проектування – додають реєстр проектної документації, графіки продуктів, дані про властивості обладнання і моделі підключення.

3. Етап будівництва:

- забезпечено передавання затверджених документів;

- збирають дані про компоненти обладнання: виробник, модель, серійний номер, номери тегів.

4. Етап введення в експлуатацію:

- додають робочі плани, гарантійні документи і документи щодо ресурсів для експлуатації;
- інформацію оновлюють відповідно до функцій, площ, експлуатаційних вимог.

Інтеграція й передавання даних. Інформацію накопичують на кожному етапі, зберігаючи в єдиній базі COBie. Для передавання даних використовують формат XML, який відповідає специфікаціям контракту.

Специфікації можуть бути:

- традиційними: забезпечують передавання статичних даних;
- на основі ефективності: включають динамічні дані для оцінювання продуктивності будівлі.

*Інтеграційний підхід.* Для створення даних COBie рішення ухвалюють на основі програмного забезпечення, яке використовує компанія, і часто для цього укладають контракти з іншими організаціями. COBie можна створити за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що підтримує COBie, через перетворення існуючих даних у формат COBie або ж використовуючи електронні таблиці COBie безпосередньо (рис. 1) [17, 18].

Через різноманітність учасників процесу для створення COBie зазвичай комбінують ці методи. Якщо використовують перший метод, програмне забезпечення має бути інтегроване з ручним налаштуванням програм BIM [18]. Такий процес може бути виконаний у два способи. Перший варіант полягає у створенні COBie файлу, який відповідає специфікаціям моделі передавання управління об'єктами (MVD) компанії building SMART International для файлів інформаційної моделі будівлі (IFC) [20, 21]. Хоча файли COBie не мають технічних відмінностей від MVD, для дотримання контрактних вимог проектних сторін потрібно подавати у форматі COBie. Тому необхідний передавання між IFC і COBie файлами (рис. 2).

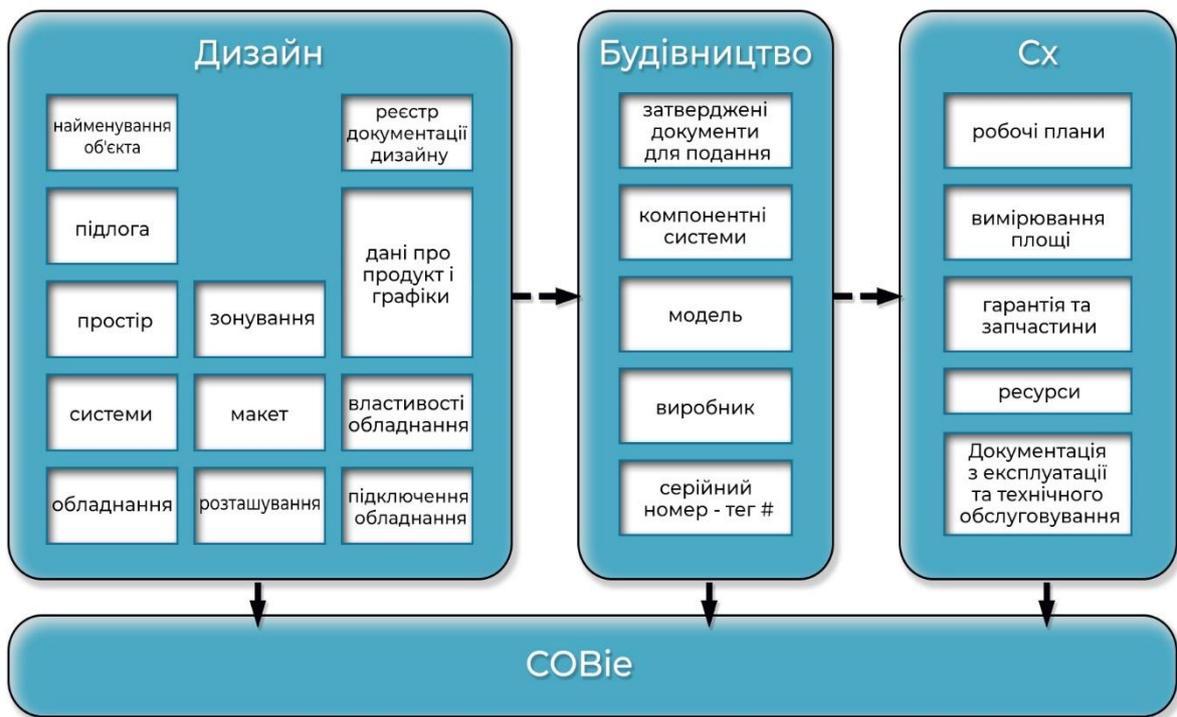


Рис. 1. Підхід COBie (адаптовано з WBDG, 2018)

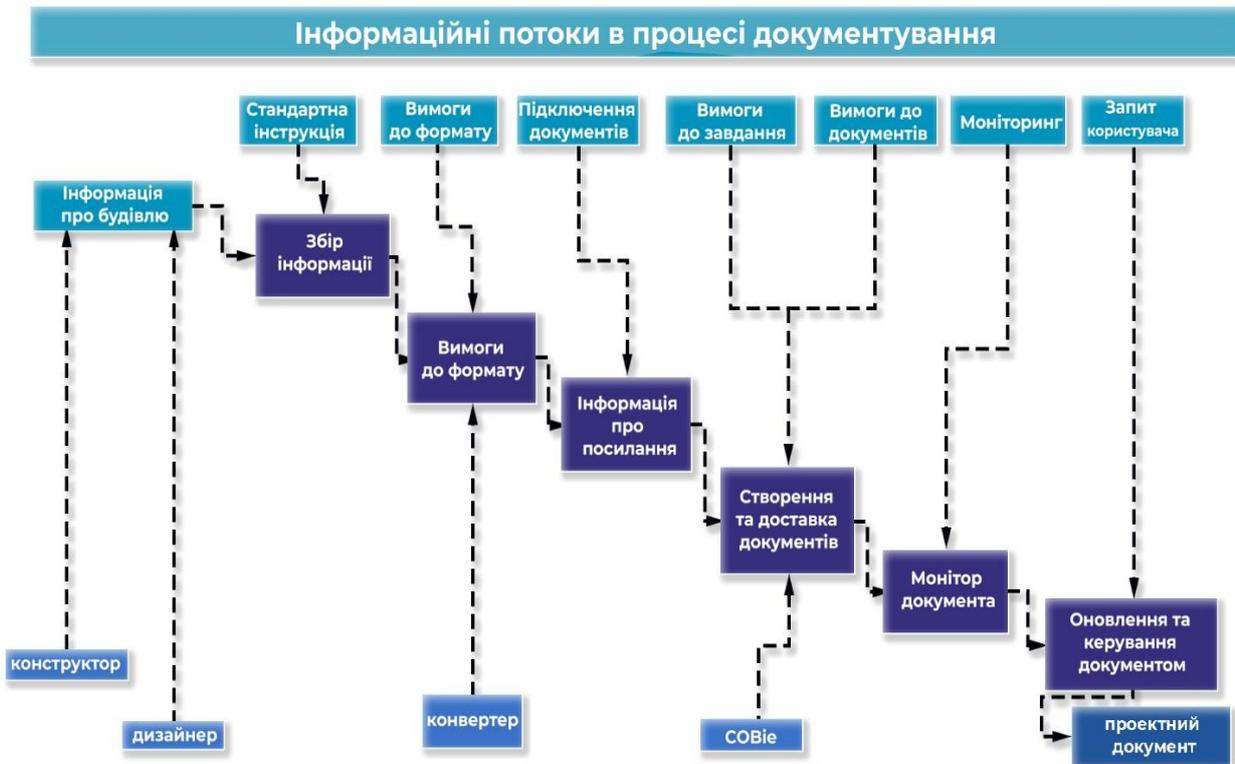


Рис. 2. Інформаційні потоки в процесі документування (адаптовано з Song et. al 2002)

Інший підхід передбачає використання програмного забезпечення, яке безпосередньо генерує файли у форматі SOBie, що є модифікованою версією електронних таблиць Excel з підтримкою XML. У грудні 2014 року для більшості програм, створених за допомогою MVD, було потрібно лише мінімальне ручне налаштування для відповідності стандартам SOBie [21, 22].

Другий метод створення SOBie базований на зборі інформації безпосередньо з програм, де вона була створена, а також з існуючих документів, які вже містять потрібну інформацію для SOBie. Наприклад, програми, що містять дані про обладнання та приміщення, можуть автоматично генерувати більшість необхідної інформації для SOBie. У такому випадку створюють електронні таблиці в специфічному форматі, інформація в них може бути упорядкована вручну або за допомогою іншого програмного забезпечення [23].

Третій метод полягає в ручному введенні інформації безпосередньо в таблицю SOBie, де учасники проекту можуть перевірити точність даних перед передаванням результатів.

Коли всі дані інтегровані в SOBie, вони стають готовими до використання в процесах управління об'єктом.

*Обмеження та переваги.* Успішне впровадження описаної моделі процесу можливе за умови, що всі учасники будівництва переосмислять і реорганізують процес на всіх етапах життєвого циклу будівлі. Збір і зберігання інформації в мінімально необхідному форматі для подальшої інтеграції в SOBie може потребувати додаткових витрат і нових обов'язків. Це включає потребу в додатковому персоналі та навчанні, а також узгодженні процедур між власником і сторонами, залученими до будівництва.

ВІМ має великий потенціал для зміни способу виконання та документування будівельних робіт, однак цей перехід

потребує змін на всіх етапах життєвого циклу будівлі. ВІМ може стати важливим джерелом інформації, включаючи управління об'єктами. Однією з основних переваг ВІМ є підвищення продуктивності порівняно з традиційними методами. Проте на сьогодні не існує надійних методів для вимірювання переваг ВІМ або кількісної оцінки результатів нових практик. З цієї причини деякі учасники будівництва можуть відмовитися від використання ВІМ-моделей та інтеграції інформації для покращення процесу будівництва [1].

Описана модель процесу продемонструвала дані SOBie як ефективне рішення для розв'язання актуальних проблем будівельної документації, сприяючи підтримці управління об'єктом. Переваги цього підходу включають надання необхідної та стислої інформації, легкий доступ до пов'язаної інформації, покращену співпрацю між учасниками проекту і забезпечення надійності даних.

**Висновки.** У дослідженнях інтеграції інформації в будівництві акцентовано на необхідності впровадження систематичних підходів щодо управління і документування експлуатації та технічного обслуговування. Однак при цьому власник, як кінцевий користувач форматів, часто не врахований у цих процесах. Власники продовжують отримувати інформацію у вигляді різних документів і повинні витратити час на їх збирання та реорганізацію, оскільки ці дані часто створюють різні сторони за допомогою численного програмного забезпечення. До того ж часто документи погано структуровані, неповні або недоступні, що ускладнює їх використання.

Збір цієї інформації зазвичай є дорогим і не завжди надійним, оскільки вона не завжди відповідає фактичному стану будівлі. Тому необхідно розробити інтеграційний підхід, що дасть змогу власникам працювати з надійними даними для ефективного управління об'єктами. Набір даних SOBie був розроблений саме для того, щоб дати точну інформацію



допомогою електронних таблиць чи файлів IFC. Це, зокрема, сприятиме задоволенню потреб у будівництві і полегшить роботу

будівельного сектору, забезпечуючи практику, яка залишатиметься ефективною та корисною.

### Список використаних джерел

1. Виноградов В. В., Альошечкіна Т. М. Розкриття потужності COBie: революція в управлінні інформацією про будівлі. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. Т. 3. № 3. (2024). С. 1-8. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240303.01>. <https://isg-journal.com/isjea/article/view/704>.
2. Song Y., Clayton M. J. and Johnson R. E. Anticipating reuse: documenting buildings for operations using web technologies. *Automation in Construction*. 2002. 28(11). 185-197. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00097-2](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00097-2). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580500000972?via%3DIihub>.
3. Caldas C. H., Soibelman L. and Gasser L. Methodology for the integration of project documents in model-based information systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2005. 19(1). 25-33. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2005\)19%3A1\(25\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0887-3801(2005)19%3A1(25)).
4. Goedert J. D. and Meadati P. Integrating construction process documentation into Building Information Modeling. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2008. 134(7). 509-517.
5. Nisbet N., Liebich T. ifc XML Implementation
6. Shen W., Hao Q., Mak H., Neelamkavil J., Xie H., Dickinson J., Thomas R., Pardasani A. and Xue H. Systems integration and collaboration in architecture, engineering, construction, and facilities management: A review. *Advanced Engineering Informatics*. 2010. 24(2). 196-207.
7. Kassem M., Kelly G., Dawood N., Serginson M. and Lockley S. BIM in facilities management applications: a case study of a large university complex. *Built Environment Project and Asset Management*. 2015. (5)3. 261-277.
8. BS EN ISO 19650-5:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling. <https://www.iso.org/standard/74206.html>.
9. Korka J. W., Oloufa A. A. and Thomas R. Facilities computerized maintenance management systems. *Journal of Architectural Engineering*. 1997. 3 (3). 118-123.
10. WBDG (Whole Building Design Guide). Construction Operations Building Information Exchange (COBie)). <https://www.wbdg.org/Accessed 18/01/2018>.
11. Becerik-Gerber B., Jazizadeh F., Li N. and Calis G. Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management. *Journal of construction engineering and management*. 2011. 138(3). 431-442.
12. USGBC (United States Green Building Council). LEED for existing buildings operations & maintenance (Reference Guide Version 2.0). Washington, D.C. 2008.
13. Lavy S. and Jawadekar S. A Case Study of Using BIM and COBie for Facility Management. *International Journal of Facility Management*. 2014. 5(2).
14. Howard R. and Bjork B. C. Building information modeling – Expert’s views on standardization and industry deployment. *Advanced Engineering Informatics*. 2008. 22(4). 271-280.
15. NIBS (National Institute of Building Sciences). Construction Operations Building Information Exchange (COBie): Means and Methods. Building SMART alliance. <https://www.nibs.org/Accessed 18/01/2018>.
16. Vanlande R., Nicolle C. and Cruz C. IFC and building lifecycle management. *Automation in Construction*. 2008. 18(3). 70-78.

17. Yalcinkaya M. and Singh V. Building Information Modeling (BIM) for Facilities Management – Literature Review and Future Needs. In: Fukuda S., Bernard A., Gurumoorthy B., Bouras A. (eds) *35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2018) Product Lifecycle Management for a Global Market. PLM. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, Berlin, Heidelberg*. 2014. Vol. 442.
  18. Wetzel E. M. and Thabet W. Y. The use of a BIM-based framework to support safe facility management processes. *Automation in Construction*. 2015. 60(4). 12-24.
  19. Suprabhas K. and Dib H. N. Integration of BIM and Utility Sensor Data for Facilities Management ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering, 2017.
  20. Liu R. and Issa R. R. A. Issues in BIM for facility management from industry practitioners perspectives, in: I. Brilakis, L. Sang Hyun, B. Becerik-Gerber (Eds.). *ASCE Computing in Civil Engineering*. 2013. P. 411–418.
  21. Cavka H. B., Staub-French S. and Pottinger R. Evaluating the alignment of organizational and project contexts for BIM adoption: a case study of a large owner organization. *Buildings*. 2015. 5(4). 1265–1300.
  22. Terreno S., Anumba C. J., Gannon E. and Dubler C. The benefits of BIM integration with facilities management: a preliminary case study. *Computing in Civil Engineering*. 2015. 675-683.
  23. Afsari K., Eastman C. and Shelden D. Cloudbased BIM Data Transmission: Current Status and Challenges. *33rd International Association for Automation and Robotics in Construction*. 2016. 1099-1106.
  24. (BIM3A) BIM's third age. <http://www.fmworld.co.uk/features/feature-articles/bims-thirdage/> Accessed 03/08/2018.
- 

Виноградов Віталій Володимирович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри теоретичної та будівельної механіки, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0003-4492-3862. Тел.: +38 (066) 890-16-48. E-mail: vitalii.vynohradov@kname.edu.ua.

Альошечкіна Тетяна Миколаївна, старший викладач кафедри теоретичної та будівельної механіки, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0001-7234-1558. Тел.: +38 (097) 461-20-75. E-mail: Tetiana.Aloshechkina@kname.edu.ua.

Vynohradov Vitalii, PhD (Tech). Senior lecturer of the Department of Theoretical and Structural Mechanics, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0003-4492-3862. Tel.: +38 (066) 890-16-48. E-mail: vitalii.vynohradov@kname.edu.ua.

Alyoshechkina Tetyana, Senior lecturer of the Department of Theoretical and Structural Mechanics, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0001-7234-1558. Tel.: +38 (097) 461-20-75. E-mail: Tetiana.Aloshechkina@kname.edu.ua.

Статтю прийнято 25.10.2025 р.

УДК 69.059.4:625.84

## ВПЛИВ ПОВІТРОВТЯГНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТОБЕТОНУ

Канд. техн. наук Г. В. Бражник

## INFLUENCE OF AIR CONTENT OF CONCRETE MIXTURE ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT CONCRETE

PhD (Tech.) H. Brazhnyk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351822>

***Анотація.** У статті розглянуті питання про підвищення морозостійкості бетонів за рахунок введення в бетонну суміш повітровтягувальних добавок. Розглянуті гіпотези руйнування цементобетонів за дії від'ємних температур. Показано, що поровий простір у бетоні, як і тверда фаза, має кілька параметрів – розміри, обсяг і форма пор, розподіл пор за розмірами, що значно важливо задля загального оцінювання процесів структуроутворення бетону і впливає на фізико-механічні характеристики бетону. Наведено приклади суцільності дослідження мікроструктури дорожнього бетону, оскільки саме з характером і особливостями мікроструктури пов'язані основні властивості цементного каменю та бетону. Показано, що немає єдиної теорії «морозної» деструкції цементних бетонів, а розглянуті в статті гіпотези неспроможні пояснити деякі явища, які спостерігають із дією негативних температур на бетон. Експериментально доведено, що з введенням повітровтягувальної добавки кожен додатковий відсоток повітря викликає зниження міцності бетону. Встановлено існування трьох областей зниження міцності бетонів на кожен відсоток залученого повітря. Також зі збільшенням залученого повітря більше 4 % зростає водопоглинання і водонасичення. Дослідження морозостійкості бетону за різної кількості залученого повітря показали, що без повітровтягувальної добавки і надмірному вмісті повітря морозостійкість різко знижується. Бетони з повітровтягненням у діапазоні від 3,2 до 6 % мають максимальну морозостійкість F400. Показано, що зниження міцності бетону призводить до зниження його експлуатаційних показників і збільшення вартості готової продукції через необхідність збільшення витрат цементу.*

***Ключові слова:** цементобетон, повітровтягнення, пористість, бетонна суміш, пори, міцність, морозостійкість, коефіцієнт морозостійкості, водопоглинання, водонасичення.*

***Abstract.** The article examines the benefits of increasing the frost resistance of concrete due to the introduction of water-strengthening additives into the concrete mix. Hypotheses for the degradation of cement concrete under varying temperatures are considered. It has been shown that the pore space in concrete as well as the solid phase is characterized by a number of parameters - size, size and shape of pores, distribution of pores by size, which is important for the overall assessment of the processes of structure formation of concrete and pouring on the physical and mechanical characteristics of concrete. An application has been made to investigate the microstructure of road concrete, since the very nature and characteristics of the microstructure are related to the main properties of cement stone and concrete - ductility, gas impermeability, chemical properties durability, frost resistance, resistance to aggressive media. It is shown that there is no single theory of «frosty» destruction of cement concrete, and the hypotheses considered in the statistics are impossible to explain a number of phenomena that can be avoided when negative*

*temperatures affect concrete (with increased fluidity The frozen ruin will speed up, because the pressure on the ice will not grow, and the frost will ruin the concrete, which is sometimes less than 90 % filled with water. It has been experimentally proven that when a water-strengthening additive is introduced, the leather additive again causes a decrease in the value of concrete. It has been established that there are three areas of decreased value of concretes on the skin of the resulting surface: in the first – the value decreases by 8...10%, in the other – by 7...8 %, in the third – by 5 %. Also, with an increase in the received air of more than 4 %, the water content increases by 19 %, which also characterizes the open porosity, and the water saturation increases by 24 %, which also characterizes the openness and, in part, intellectual property. closed porosity. Studies of the frost resistance of concrete with varying amounts of wind received have shown that without a water-tempering additive and above-ground air, the frost resistance sharply decreases. Cured concrete in the range of 3.2 to 6 % has a maximum frost resistance of F400. It has been shown that the value of concrete is reduced, leading to a decrease in its performance indicators and to an increase in the quality of the finished product through the need for increased waste of cement. Therefore, the most important point in the technology of road concrete is the correct selection and optimization of the number of additives that can be cured, primarily the water-strengthening ones.*

**Keywords:** cement concrete, hardening, porosity, concrete mix, pores, softness, frost resistance, frost resistance coefficient, water-claying, water saturation.

**Вступ.** Основним показником довговічності дорожніх цементних бетонів є їхня здатність чинити опір впливу змінного заморожування-відтавання в насиченому водою (розчином солі) стані, тобто морозостійкість. Із часом за такого циклічного впливу можливе руйнування бетону, ступінь та інтенсивність якого визначає власне його морозостійкість.

На сьогодні відомо, що підвищити морозостійкість бетонів можна за рахунок використання повітровтягувальних добавок. Із перемішуванням у бетонну суміш потрапляє повітря, яке розподілено у вигляді пор різного діаметра у всіх типах структури дорожніх цементних бетонів (мікро- (цементний камінь), мезо- (цементний розчин) і макроструктури (безпосередньо бетон)).

Поровий простір у бетоні, як і тверда фаза, має кілька параметрів – розміри, обсяг і форма пор, розподіл пор за розмірами, що значно важливо задля загального оцінювання процесів структуроутворення бетону і впливає на фізико-механічні характеристики бетону.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Якщо розглянути цементний камінь, що твердіє, із позицій поверхневих

явищ з урахуванням специфіки взаємодії твердої та рідкої фаз, то, за П. А. Ребіндером, у цементному камені є кілька видів води, які обумовлені різним ступенем взаємодії з поверхнею твердого тіла. Відповідно, розрізняють хімічно та фізично пов'язану, порову та об'ємну вологу.

Хімічно зв'язана вода є частиною гідратних новоутворень цементного каменю. Фізично зв'язана вода – адсорбована поверхнею твердого тіла рідина, не бере участі в хімічних реакціях цементу з водою. Структурна вода відрізняється від вільної внаслідок спотворення її структури зі взаємодією з поверхнею стінок пор. Як результат, зміна густини, в'язкості, температури кристалізації. Чим менший розмір пор, тим сильніше змінюються властивості порової рідини.

Отже, між розмірами пор і температурою кристалізації порової води цементного каменю може бути встановлена характерна залежність.

Н. Стокхаузен провів відповідність між розміром пор і водою, що знаходиться в них:

- у капілярах радіусом понад 100 нм спостерігають вільну воду;

- вода, конденсована в капілярах із радіусом 10...100 нм, має знижений хімічний потенціал, унаслідок чого знижена її точка кристалізації, а пори заповнені водою за відносної вологості 90...100 %;

- у порах, радіусом 2...10 нм вода сильно структурована і присутня в них за вологості 60 %.

Четверта модифікація є адсорбованою водою.

Дослідження мікроструктури суттєво важливе, оскільки саме з характером та особливостями мікроструктури пов'язані основні властивості цементного каменю та бетону – міцність, газо- та водонепроникність, хімічна стійкість, морозостійкість, стійкість до дії агресивних середовищ (таблиця).

Таблиця

Класифікація пор за їхнім впливом на властивості цементобетону

Розмір	Тип	Властивість бетону	Автор
10 <sup>6</sup> ...15000 нм	Великі сферичні порожнини	Міцність, проникність	І. Ароусміт
15000...50 нм	Великі капіляри		
50...10 нм	Капіляри середнього розміру. Пори між частинками	Міцність, проникність	
10...2,5 нм	Малі (гелеподібні) капіляри	Усадка	
2,5...0,5 нм	Мікропори, пори гелю, пори між кристалами	Усадка, повзучість	
0,5 нм	Міжшарові мікропори. Пори в кристалах		
>2000 нм і <100 нм	Великі капіляри	Морозостійкість	Х. Ушкава
10...100 нм	Капіляри середнього розміру. Пори між частинками	Газо- та водонепроникність	
< 10 нм	Малі (гелеподібні) капіляри	Корозія (дифузія та перенесення іонів)	
1 нм < d < 5 нм	Гелеві пори	-	Г. Добролюбов, В. Б. Ратінов, Т. І. Розенберг
5 нм < d < 100 нм	Капілярні пори	Газо- та водонепроникність	
100 нм < d < 10 <sup>5</sup> нм	Макрокапіляри	Корозія бетону, усадка	
d > 10 <sup>5</sup> нм	Великі сферичні порожнини, каверни і раковини в бетоні	Міцність	

Існує кілька основних гіпотез, які пояснюють механізм морозного руйнування бетону. За гіпотезою Р. Коллінза, руйнація відбувається в результаті безпосереднього тиску льоду, що кристалізується (обсяг якого більше від обсягу води на 9 %) на стінки пор. Критикуючи цю гіпотезу,

Г. І. Горчаков і В. М. Москвин показали, що кристалізаційний тиск не є основною причиною руйнування бетону, а можливий як окремих випадок.

Гіпотеза гідростатичного тиску води, запропонована Н. А. Житкевичем, передбачає, що морозна руйнація

відбувається через те, що на стінки пор тисне не сам лід, а вода, на яку передається тиск льоду, що утворюється. На користь більшої коректності другої гіпотези можна віднести той факт, що вода, яка заповнює капілярні пори, не може зазвичай повністю перетворитися на кригу через відсутність необхідного місця, а також через неможливість її перетворення на кригу в капілярах із радіусом менше  $10^{-4}$  м за звичайних температур випробування

Цікавою є гіпотеза руйнування бетонів через різницю в коефіцієнтах лінійного термічного розширення його компонентів. За від'ємних температур термічна несумісність компонентів різко посилюється, оскільки коефіцієнт термічного розширення льоду в три-сім разів більше, ніж бетону. Ця гіпотеза набула розвитку в роботах В. М. Москвіна, М. М. Капкина, Б. М. Мазура, А. М. Підвального та інших учених. Проте температурні напруги відіграють значну роль у руйнуванні бетону, не насиченого вологою, що нехарактерно для дорожнього бетону, особливо в зимовий період. У цьому випадку може йтися швидше про термостійкість, а не морозостійкість бетону.

Водночас розглянуті вище гіпотези неспроможні пояснити ряд явищ, які спостерігають за дії від'ємних температур на бетон. Наприклад, зі збільшенням швидкості заморожування руйнація прискорюється, тоді як тиск льоду при цьому не зростає. Більш того, мороз руйнує бетони, пори яких заповнені водою менш як на 90 % [1-4].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Аналіз показує, що немає єдиної теорії «морозної» деструкції цементних бетонів. Якщо виходити з того, що головним фактором, який визначає морозостійкість бетону, є будова порового простору, то метою досліджень було встановлення взаємозв'язку міцності та морозостійкості бетонів від характеру пористості.

### **Основна частина дослідження.**

Відомо, що залучення повітря бетону є важливим фактором, що визначає морозостійкість бетону. Яка має бути кількість залученого повітря для забезпечення необхідної морозостійкості за мінімального впливу на міцність? У різних країнах прийнято, що морозостійкість забезпечена з повітровтягненням 4 ... 7 %. Додаткове залучення повітря в бетонну суміш призводить до зниження міцності (за різними даними) на 1 % повітря – 3 ... 5 % міцності. Суперечливі дані про вплив повітровтягнення на міцність і морозостійкість бетонів потребують уточнення.

Наші дослідження показали (рис. 1), що з введенням повітровтягувальної добавки кожен додатковий відсоток повітря викликає зниження міцності бетону. На графіку можна виділити три області, у яких зниження міцності бетону відбувається по-різному.

В області I (із повітровтягненням бетонної суміші 1,6 – 6,0 %) спостерігають найбільше зниження міцності. Кожен додатковий відсоток повітря в бетонній суміші призводить до зниження міцності від 8 до 10 %.

В області II (повітровтягнення бетонної суміші 6,0 – 9,5 %) зниження міцності бетону відбувається більш плавно. На цій ділянці збільшення вмісту повітря на один відсоток призводить до зниження міцності бетону від 7 до 8 %.

В області III (повітровтягнення бетонної суміші 9,5 – 12,0 %) на кожний додатковий відсоток повітровтягнення бетонної суміші міцність знижується на 5 %.

Зниження міцності бетону веде до зниження його експлуатаційних показників і збільшення вартості готової продукції через необхідність збільшення витрат цементу. Тому найважливішим моментом технології дорожніх бетонів є правильний вибір і оптимізація кількості застосовуваних добавок, насамперед повітровтягувальних.

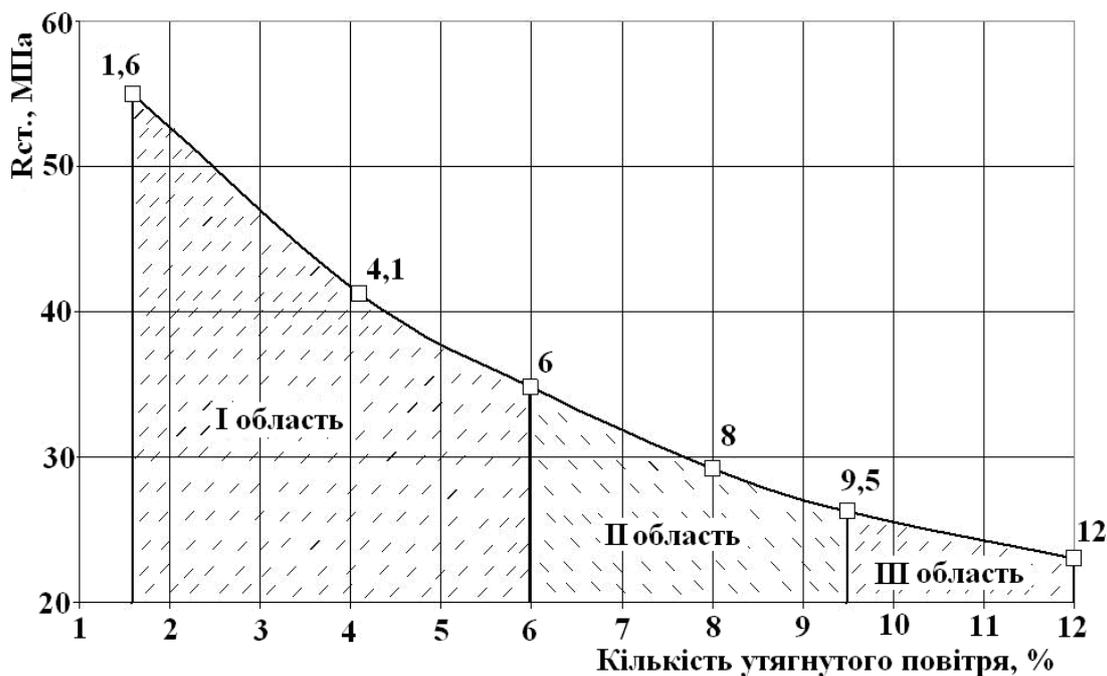


Рис. 1. Залежність міцності бетонів зі стиском від кількості залученого повітря в бетонну суміш

Критерієм морозостійкості є коефіцієнт морозостійкості ( $K_{мрз}$ ), який є відношенням міцності бетону після певної кількості циклів випробування до міцності бетону перед початком випробувань. Дослідження морозостійкості бетону за різної кількості залученого повітря показали (рис. 2), що без повітровтягувальної добавки (склад 1) і надмірного вмісту повітря (склад 7) морозостійкість різко знижується. Бетони з повітровтягненням у діапазоні від 3,2 до 6 % мають максимальну морозостійкість F400. Однак у складі 2 (із повітровтягненням 3,2 %) міцність вище, ніж у складів 3 і 4 на 14 і 34 % відповідно. Це, за інших рівних умов, дає змогу економити до 10 – 12 % цементу.

Також зі збільшенням залученого повітря більше 4 % зростає водопоглинання на 19 %, що опосередковано характеризує відкриту пористість, і водонасичення на

24 %, що опосередковано характеризує відкриту і частково умовно замкнену пористість.

**Висновки.** За проведеними дослідженнями можна зробити такі висновки:

1. Встановлено, що нині відсутня єдина теорія морозного і морозно-сольового руйнування бетонів, що була б підтверджена практично. Сучасні теорії базовані на основоположному впливі морозостійкості та характеру пористості.

2. Встановлено існування трьох областей зниження міцності бетонів на кожен відсоток залученого повітря: у першій міцність знижується на 8...10 %, у другій – на 7...8 %, у третій – на 5 %.

3. Обсяг залученого повітря в бетонній суміш може бути зменшений до 3,2 – 3,5 % без зниження морозостійкості.

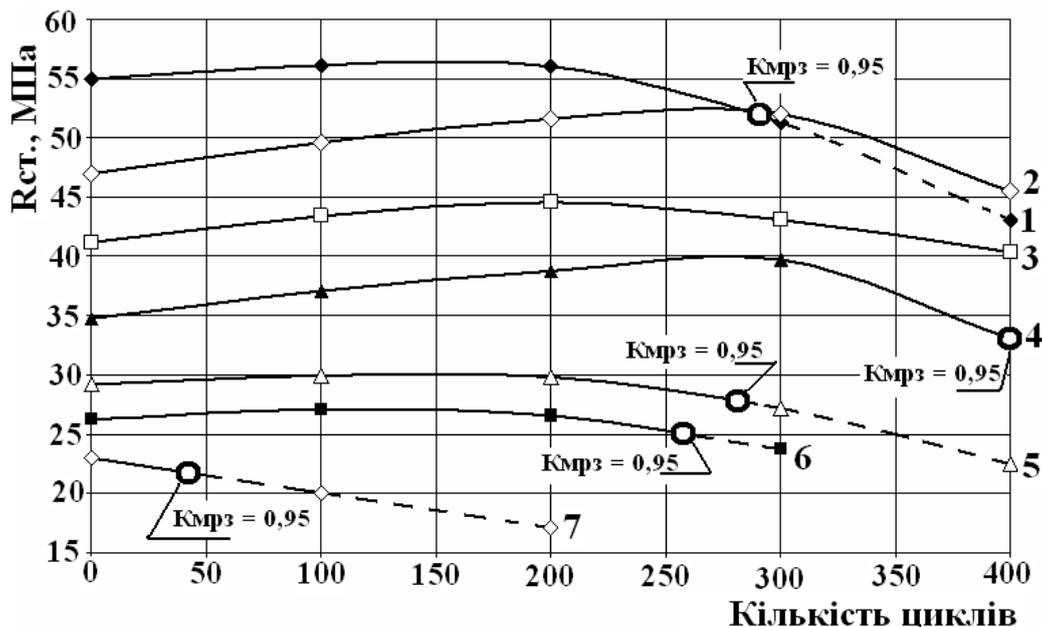


Рис. 2. Морозостійкість бетонів із різним повітровоутягненням:  
 1 – 1,6 %; 2 – 3,2 %; 3 – 4,1 %; 4 – 6,0 %;  
 5 – 8,0 %; 6 – 9,5 %; 7 – 12,0 %

### Список використаних джерел

1. Толмачев С. Н. Развитие теории разрушения и стойкости дорожных цементных бетонов при действии агрессивных факторов: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. Харьков, 2013. 421 с.
2. Бражник Г. В. Вплив повітровоутягнення бетонної суміші на фізико-механічні властивості цементобетону. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2025. Вип. 212. С. 54 - 60.
3. Морозостійкі дорожні бетони з оптимізованим повітровоутягненням / С. М. Толмачов, І. Г. Кондратьєва, О. А. Беліченко, Г. В. Матяш. *Будівельні конструкції. Матеріали VII наук.-техн. семінару «Структура, властивості та склад бетону» «Бетони і розчини з використанням ефективних добавок та відходів промисловості.* Київ: НДІБК, 2009. Вип. 72. С. 553–560.
4. Взаємозв'язь вмісту повітря в бетонній суміші та морозостійкості бетону / А. В. Матяш, С. Н. Толмачев, І. Г. Кондратьєва, А. Ю. Вялых. *Науковий вісник будівництва.* Харків: ХДТУБА, 2010. № 57. С. 195-202.

Бражник Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів ім. М. І. Волкова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ). ORCID iD: 0009-0004-6630-1209. Тел.: +38(050)90-98-190. E-mail: anna.matyash@ukr.net.

Brazhnyk Hanna, PhD (Tech.), Senior Lecturer, Department of Technology of Road Construction Materials named after M.I. Volkov, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID ID: 0009-0004-6630-1209. Tel.: +38(050)90-98-190. E-mail: anna.matyash@ukr.net.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.

УДК 692.23

**УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ  
ДОСЛІДЖЕННЯ БЕТОНУ В ПОШКОДЖЕНИХ ВОЄННИМИ ДІЯМИ  
БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТАХ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХНЬОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ  
ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ**

Кандидати техн. наук Я. О. Сєріков, К. В. Данова, В. В. Малишева,  
д-р техн. наук В. Г. Брусенцов, канд. техн. наук В. А. Герасименко,  
магістрант О. В. Сіренко

**IMPROVEMENT OF THE ULTRASOUND PULSE METHOD IN THE RESEARCH OF  
CONCRETE IN CONSTRUCTION FACILITIES DAMAGED BY MILITARY ACTIONS  
TO ENSURE THEIR OPERATIONAL TECHNOLOGICAL SAFETY**

PhD (Tech.) Ya. Serikov, PhD (Tech.) K. Danova, PhD (Tech.) V. Malysheva,  
Dr. Sc. (Tech.) V. G. Brusentsov, PhD (Tech.) V. Gerasimenko, Master's Student O. Sirenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351823>

***Анотація.** Розроблено класифікацію і аналіз методів, потенційно придатних для дослідження бетону в пошкоджених будівельних об'єктах. Визначено, що ультразвуковий імпульсний метод забезпечує потрібну точність вимірювань. Удосконалено цей метод для підвищення надійності результатів із дослідженням у виробничих умовах. Розроблено прилади для реалізації досліджень у виробничих умовах. Наведено приклад обстеження пошкодженої залізобетонної конструкції.*

***Ключові слова:** пошкоджені будівельні об'єкти, бетон, дослідження, ультразвуковий імпульсний метод, вплив вібрації.*

***Abstract.** During the war, more than 160,000 buildings were damaged as a result of military operations in Ukraine, including 125 railway stations. This determines the importance of the task of restoring damaged construction sites. The primary important stage of restoration work is the inspection of such sites. At the same time, the necessary volume of work is established, as well as capital costs for its restoration. In most such sites, reinforced concrete structures are important components, the reliability of the structure as a whole depends on the condition of the concrete. Therefore, the quality of restoration, economic costs for restoration also depend on the accuracy and reliability of the results of the concrete inspection. In Ukraine, a methodological basis has been developed for the System for Ensuring the Reliability and Safety of Construction Sites. According to the provisions of the System, suitability, in our case, for restoration work is established through compliance with the technical condition of the structures. The conditions of compliance are also determined by regulatory documents. For the examination and study of the characteristics of concrete in structures, the ultrasonic pulse method is determined, along with others. The main advantages of this method are: the possibility of studying the characteristics of concrete in almost any part of the structure, the necessary accuracy and reliability of the measurement results. The main disadvantage of devices that implement this method is the impossibility of conducting measurements in the case of operating construction machines, during the operation of which elastic vibrations are excited in the concrete under study. This is due to the fact that by their physical nature such extraneous vibrations are similar to ultrasonic ones. As a result of superimposing extraneous vibrations on ultrasonic ones, both the reliability and accuracy of the measurement results may decrease. Based on the need to*

*adhere to the schedule of restoration work carried out under the current state of war, it is undesirable to stop them for the duration of the study of concrete. Existing ultrasonic measuring devices produced both in Ukraine and in foreign countries do not have protection against extraneous elastic vibrations. In order to ensure the conduct of concrete research using the ultrasonic method in conditions of operating construction equipment, an improved device has been developed that is free from such a drawback.*

**Keywords:** *damaged construction sites, concrete, research, ultrasonic pulse method, vibration impact.*

**Вступ.** Для відновлення пошкоджених воєнними діями будівельних об'єктів важливим етапом є їх обстеження [1], за якого визначають надійність їхньої подальшої експлуатації, потрібні обсяги робіт, а отже, формують необхідні капітальні вкладення. У будівельних об'єктах бетонні, залізобетонні вироби, конструкції є їхніми важливими складовими, фізико-механічні, структурні характеристики бетону яких також підлягають визначенню на цьому етапі. Очевидно, що від точності, достовірності результатів обстеження бетону безпосередньо залежать якість відновлення, що впливає на надійність подальшої експлуатації, та економічні затрати на відновлення.

Особливо актуальним є таке завдання зараз в Україні, коли наявна надзвичайна ситуація воєнного характеру. Так, в Україні внаслідок воєнних дій пошкоджено більш ніж 213 000 об'єктів, із них близько 160 000 будівель і споруд [2]. За даними Київської школи економіки, станом на січень 2024 р. було пошкоджено також більше 125 залізничних вокзалів і станцій [3]. За оцінками Світового банку, на відбудову потрібно близько 486 млрд дол., зокрема на відновлення будівель і споруд більше 16 млрд грн.

В Україні створена методологічна основа для Системи забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів (ДБН В.1.2-14:2018) [3]. Положеннями ДБН В.1.2-14:2018 встановлена класифікація будівельних об'єктів за класами наслідків у разі аварійної ситуації та категорії відповідальності конструкційних

елементів за рівнем можливих матеріальних збитків і соціальних втрат. У ДБН В.1.2-14:2018 визначені також орієнтовні терміни експлуатації будівель та інженерних споруд. При цьому продовження терміну експлуатації (життєвого циклу) понад встановлений допускають лише після проведення обстеження і оцінювання технічного стану конструкційних елементів, об'єкта в цілому (ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016) [4]. Відповідно до положень ДБН В.1.2-14:2018, для гарантування надійної й безпечної експлуатації будівельного об'єкта рівень придатності технічного стану його конструкційних елементів і об'єкта в цілому визначають через ступінь відповідності їхніх характеристик нормативним вимогам. Обстежуючи об'єкт, встановлюють фактичні значення фізико-механічних характеристик відповідальних конструктивних елементів, виявляють і встановлюють розміри, параметри дефектів і пошкоджень, які знижують їхню несучу здатність, довговічність тощо. Співставляючи визначені фактичні експлуатаційні характеристики із проектними і нормативними вимогами і враховуючи граничні стани конструкційних елементів, що викладені в ДБН В.1.2-14:2018, встановлюють ступінь придатності експлуатації конструкційних елементів і об'єкта в цілому за допомогою показника «категорія технічного стану». Технічний стан будівельної конструкції, об'єкта, за ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016, характеризують однією з чотирьох категорій: «1» – нормальний; «2» – задовільний; «3» – непридатний до нормальної експлуатації; «4» – аварійний. Виходячи з цього, точність,

достовірність результатів визначення фізико-механічних характеристик, порушень структури матеріалів, їхніх геометричних параметрів тощо безпосередньо буде впливати на кінцеві результати обстеження будівельного об'єкта, тобто фактично буде обумовлювати його ступінь надійності, безпеки експлуатації після відновлення.

Для дослідження стану бетону в розглянутих та експлуатованих будівельних об'єктах офіційно визначений для застосування національним стандартом України неруйнівний ультразвуковий імпульсний метод [5]. До переваг цього методу належать забезпечення необхідних точності й надійності результатів вимірювань, простота вимірювального процесу, оперативність одержання результату, можливість дослідження бетону практично на будь-яких ділянках [6]. На додачу до цього, на основі ультразвукового методу можливе не тільки визначення фізико-механічних характеристик бетону, а і виявлення зон із мікротріщинами (як поверхневими, так і внутрішніми), площин розшарування бетону конструкції [6], що також є завданням обстеження пошкоджених будівельних об'єктів.

При цьому, як показують відповідні публікації, спостерігають активний розвиток цього напрямку не тільки в Україні, а і за кордоном.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ультразвуковий імпульсний метод застосовували з метою періодичного контролю властивостей бетону в експлуатованій багатоповерховій будівлі [7]. Для проведення досліджень використовували ультразвуковий прилад Novotest ПСМ. За допомогою цього приладу вимірювали час поширення ультразвукових коливань із наступним вимірюванням відстані між приймальним і випромінювальним перетворювачами та обчисленням швидкості поширення ультразвукових коливань у бетоні будівлі. Із постановки експерименту випливає, що з

вимірюваннями на такому об'єкті не проводили будівельні роботи, за яких у бетоні генеровані пружні хвилі від працюючої будівельної техніки. Такі хвилі можуть накладатися на ультразвукові інформаційні пружні коливання, що використовують для досліджень, і тим самим викликати появу хибних результатів вимірювання [8]. Тобто за умови використання приладу Novotest ПСМ, у якому не передбачена система захисту від сторонніх пружних хвиль, не забезпечена потрібна надійність і точність результатів обстеження бетону у виробничих умовах.

Розглянутий метод застосовували також для визначення якості бетону балок, циліндрів, анкерних балок і плит перекриття офісної експлуатованої будівлі [9]. Із випробуваннями використовували методи наскрізного й поверхового введення ультразвукових коливань. Для визначення стану бетону застосовували класифікацію «імпульсна швидкість ультразвукових коливань – критерій якості бетону». Дослідження виконували за допомогою ультразвукового приладу PUNDIT. Як зазначено в статті, визначали якість бетону в конструкціях експлуатованої будівлі, тобто не за умов проведення будівельних робіт. Недоліком приладу PUNDIT є відсутність системи захисту від впливу сторонніх пружних хвиль, що викликані вібрацією від роботи більшості типів будівельних машин і механізмів. Це призводить до низької надійності й точності результатів вимірювання у виробничих умовах, тобто за умови одночасного проведення будівельних робіт на досліджуваному об'єкті.

Опубліковано також результати експериментальних досліджень використання ультразвукового імпульсного методу для організації безперервного моніторингу стану бетону в конструкціях експлуатованих будівельних об'єктів [10]. Як фактори, що впливають на точність результатів вимірювань, вибрані експлуатаційні фактори, тобто час

експлуатації. У статті зазначено, що досліджували характеристики бетону в експлуатованих об'єктах. Із цього випливає, що на таких об'єктах відсутнє проведення будівельних робіт, за яких генеровані сторонні пружні хвилі в досліджуваному бетоні.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою досліджень є виключення необхідності призупинення відновлювальних робіт під час дослідження стану бетону обстежуваного будівельного об'єкта ультразвуковим імпульсним методом. Завданням дослідження є вдосконалення вимірювального приладу, що реалізує ультразвуковий імпульсний метод, з метою забезпечення надійності вимірювань у виробничих умовах, тобто за наявності працюючих будівельних машин, обладнання чи механізмів.

**Основна частина дослідження.** Досліджували фізико-механічні характеристики, виявляли місця бетону конструкцій пошкодженого будівельного об'єкта з тріщинами в багатьох випадках в умовах проведення безпосередньо на ньому будівельних робіт. Це обумовлено необхідністю додержання графіка процесу відновлення будівельного об'єкта, а також досить частими повітряними нальотами. Для цього може бути задіяне технологічне обладнання, робота якого супроводжена вібрацією: бетонозмішувачі, відбійні молотки, трамбувальне вібраційне обладнання тощо. Унаслідок функціонування такого обладнання в бетоні конструкцій будівельного об'єкта генеровані та поширювані пружні хвилі. За своїми фізичними властивостями такі хвилі є аналогічними до тих, що збуджуються в бетоні ультразвуковими випромінювальними перетворювачами із проведенням досліджень. У результаті цього такі сторонні пружні хвилі вимірювальні прилади сприймають як інформаційний сигнал. При цьому прилад може зафіксувати хибний результат вимірювання. Це призводить до зниження точності й

достовірності результатів обстеження бетону.

В ультразвукових приладах промислового виробництва, що випускають як у нашій, так і зарубіжних країнах, цей недолік не усунений [8]. Тобто з використанням таких приладів важливою умовою одержання достовірних даних вимірювання є відсутність працюючого будівельного обладнання.

Для забезпечення потрібних точності й достовірності результатів вимірювання за умови працюючого будівельного технологічного обладнання авторами розроблений ультразвуковий вимірювач швидкості ультразвукових коливань, у якому цей недолік відсутній (рис. 1).

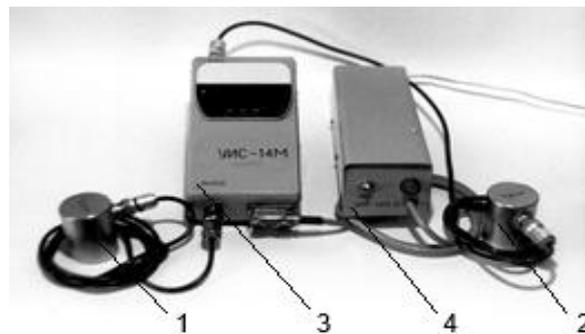


Рис. 1. Портативний ультразвуковий вимірювач швидкості ультразвукових коливань:

- 1 – випромінювальний перетворювач;
- 2 – приймальний перетворювач;
- 3 – вимірювальний прилад;
- 4 – блок живлення

Удосконалили прилад за рахунок застосування принципу фільтрування сторонніх пружних хвиль [11]. У результаті цього, досліджуючи бетон у конструкціях, прилад фіксує тільки параметри ультразвукових пружних хвиль (інформаційного сигналу), що надходять від випромінювального до приймального перетворювача.

Із застосуванням приладу досліджують стан бетону в конструкціях

пошкоджених будівельних об'єктів у більшості випадків поверховим введенням пружних хвиль [6]. При цьому є ефективним вимірювання часу поширення пружних хвиль у бетоні на постійній (зафіксованій) відстані між п'єзоелектричними перетворювачами [6]. Це дає змогу спростити процес дослідження бетону за рахунок виключення операції з обчислення

швидкості поширення ультразвукових коливань.

За результатами вимірювань визначають ділянки бетону, на яких зафіксовані підвищені значення вимірюваної величини (рис. 2). Це свідчить про наявність на таких ділянках порушень структури бетону – внутрішніх і (чи) поверхових мікротріщин.

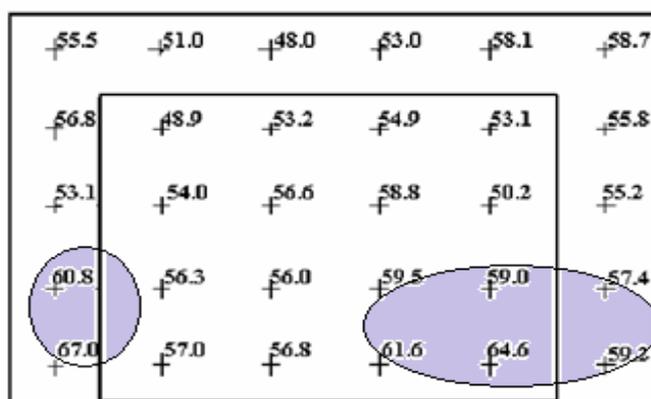


Рис. 2. Результати дослідження стану бетону залізобетонної панелі:

○ – зони панелі з порушенням структури бетону через наявність внутрішніх і поверхових мікротріщин

**Висновки.** Проведені дослідження ультразвукових імпульсних методів виявили, що для вирішення завдання обстеження бетону в конструкціях пошкоджених воєнними діями будівельних об'єктів найбільш ефективним є ультразвуковий імпульсний метод. Ураховуючи виробничі умови обстежень, розроблено удосконалений прилад, який дає змогу здійснювати вимірювання з використанням виробничого будівельного обладнання, робота якого супроводжена

вібрацією (генеруванням пружних хвиль у досліджуваному бетоні), тобто без зупинки процесу відновлення.

У результаті досліджень вдосконалено метод і вимірювальний прилад, застосування яких допомагає забезпечити необхідну достовірність і точність результатів обстеження, а отже, і підвищення техногенної безпеки будівельних об'єктів у процесі експлуатації після відновлення.

### Список використаних джерел

1. LIGA.net. URL: <https://www.liga.net/ua/infographic-of-the-day/articles/ruinuvannia-v-tsyfrakh-skilky-rosiia-znyshchyla-obiektiv-ta-skilky-vydilyly-na-vidbudovu>.
2. Новини. Залізниця України під час війни. URL: <https://vsviti.com.ua/news/163497>.

3. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд (зі змінами). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=78683](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78683).
4. ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016. Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=65024](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65024).
5. ДСТУ Б В.2.7-226:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності бетону. URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://concrete-group.com.ua/wp-content/uploads/2018/04/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-%D0%91-%D0%92.2.7-226\\_2009-%D1%83%D0%B7-%D0%B2%D0%B8%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%BC%D1%96%D1%86%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://concrete-group.com.ua/wp-content/uploads/2018/04/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-%D0%91-%D0%92.2.7-226_2009-%D1%83%D0%B7-%D0%B2%D0%B8%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%BC%D1%96%D1%86%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96.pdf).
6. Дослідження будівельних матеріалів, конструкційних елементів будинків і споруд та механічних систем неруйнівними методами на основі пружних хвиль: монографія / Я. О. Серіков, М. С. Золотов та ін. Харків : ІОЦ ХНАМГ, 2009. 260 с.
7. Колохов В. В., Білик В. В., Ткач Т. В. Періодичний контроль властивостей бетону в системі оцінки технічного стану багатоповерхової будівлі. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 1(019). С. 82-88. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.82.1027>.
8. Серіков Я. О. Проблеми розвитку і впровадження ультразвукового імпульсного методу в завданні вимірювання параметрів і контролю фізико-механічних характеристик бетону експлуатованих будинків і споруд. *Наук-вироб. журнал «Метрологія та прилади»*. Харків: ХНУРЕ, 2019. № 5. С. 56-61. URL: [https://nure.ua/wp-content/uploads/2019/Scinetific\\_editions/mp-5-2019.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/2019/Scinetific_editions/mp-5-2019.pdf).
9. Zel Citra1, Paksi Dwiyanto Wibowo, Yosie Malinda, Anom Wibisono, Risma Apdeni, Herol «Testing of Concrete Structures with Non-Destructive Test Method (NDT) Using Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) at the Building on the Ancol Beach». *Journal of Civil Engineering and Vocational Education*. March 2024. Vol. 11, No.1. P. 217-225. DOI:10.24036/cived.v11i1.530.
10. Lorenzi Alexandre, Stein Kássio, Reginatto Lucas Alexandre. Concrete structures monitoring using ultrasonic tests. *Revista de la construcción*. 2020. Vol. 19, No. 3. P. 246–257. Santiago dic. <https://doi.org/10.7764/rdlc.19.3.246-257>.
11. Пристрій для контролю якості матеріалів: пат. 70786, Україна, G01N33/38. № 20031212763; заявл. 29.12.2003; опубл. 15.10.2004, Бюл. №10. 3 с.

---

Серіков Яків Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3463-2079. Тел.: 0509088828. E-mail: [s0509088828@gmail.com](mailto:s0509088828@gmail.com).

Данова Карина Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-1994-703X. Тел.: 0995288266. E-mail: [bgd204@yahoo.com](mailto:bgd204@yahoo.com).

Брусенцов Віталій Гаврилович, доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7003-9889. Тел.: 0662955229. E-mail: [brusencov.vitaly@gmail.com](mailto:brusencov.vitaly@gmail.com).

Малишева Вікторія Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5849-8206>. Тел.: 0976199662. E-mail: [vikkttoriyam@yahoo.com](mailto:vikkttoriyam@yahoo.com).

Герасименко Віталій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри світлотехніки та джерел світла, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-0390-289X. Тел.: 0993883028. E-mail: [Twixvi@gmail.com](mailto:Twixvi@gmail.com).

Сіренко Олена Володимирівна, магістрант, група МОПР2024-1, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел.: 06788838101. E-mail: [sirenkoolena86@gmail.com](mailto:sirenkoolena86@gmail.com).

---

Serikov Yakiv Oleksandrovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labor Protection and Life Safety, Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov.

ORCID iD: 0000-0002-3463-2079. Tel.: +38(050)-908-88-28. E-mail: s0509088828@gmail.com.

Danova Karina Valeriivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Occupational Health and Safety, Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov.

ORCID iD: 0000-0002-1994-703X. Tel.: +38(099)528-82-66. E-mail: bgd204@yahoo.com.

Malysheva Victoria Valeriyevna, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Occupational Health and Safety, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5849-8206>. Tel.: +38(097)-619-96-62. E-mail: vikktoriyam@yahoo.com.

Brusentsov Vitaly Havrylovich, technical of Science, Assoc. Department of Labor and Environmental Protection, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 0662955229. E-mail: brusencov.vitaly@gmail.com.

Herasymenko Vitalii Anatoliiovych, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Lighting Engineering and Light Sources, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

ORCID iD: 0000-0002-0390-289X. Tel.: +38(099)-388-30-28.

Sirenko Olena Volodymyrivna, master's student, group MOPR2024-1, Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov. Tel.: 06788838101. E-mail: sirenkoolena86@gmail.com.

Статтю прийнято 01.12.2025 р.

УДК 624.21

## **ВИЗНАЧЕННЯ МІРИ ПОШКОДЖЕННЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НА ЗАЛІЗОБЕТОННІЙ ПЛИТІ ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ**

**Д-р техн. наук А. М. Онищенко, кандидати техн. наук. М. В. Гаркуша, С. Ю. Аксьонов, асп. Б. О. Вишнівський**

## **DETERMINATION OF DAMAGE LEVEL IN CEMENT CONCRETE PAVEMENT ON REINFORCED CONCRETE SLAB OF ROADWAY ON HIGHWAY BRIDGES**

**Dr. Tech. Sc. A. M. Onyshchenko, PhD in Tech. Sc. M. V. Harkusha, PhD in Tech. Sc. S. Yu. Aksonov, PhD Student B. O. Vyshnivskyi**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351829>

***Анотація.** На сьогодні відсутні підходи щодо визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів, що є нагальною проблемою з проектування цементобетонного покриття.*

*Проблема безпечної експлуатації мостів стала нагальною в останнє десятиріччя через низку несприятливих причин. Система експлуатації не відповідає сучасним технічним нормам і не має потрібних ресурсів для правильного та своєчасного догляду за спорудами; система фінансування дорожньої мережі України не дає змоги застосовувати сучасні та інноваційні технології з експлуатації і будівництва мостів. В Україні немає чіткого стратегічного плану вдосконалення, підтримання та експлуатації автодорожніх мостів. У зв'язку зі зростанням параметрів транспортних навантажень і через аномально високі літні температури значного розповсюдження набули дефекти асфальтобетонного покриття залізобетонних автодорожніх мостів, що перешкоджають безпечній експлуатації споруди. Актуальною залишається проблема, пов'язана зі станом покриття автодорожніх мостів і мостів у цілому, що є невід'ємною складовою мережі автомобільних доріг.*

Основною проблемою для експлуатації цементобетонного покриття на автодорожніх залізобетонних мостах є зменшення довговічності внаслідок тріщиноутворення. Світова тенденція та напрям сучасних досліджень указує на стрімкий розвиток будівництва доріг жорсткого типу та цементобетонного покриття на залізобетонних мостах. Тому постає нагальна необхідність вивчення і дослідження влаштування та експлуатації такого покриття на мостах України.

У статті розглянуто визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від розтягувальних напружень, що виникають внаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, а також визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від температурних напружень, що виникають внаслідок добових і річних температурних коливань.

**Ключові слова:** автодорожній міст, міра пошкоженості, проїзна частина, цементобетонне покриття.

**Abstract.** At present, there are no established approaches for determining the extent of damage to cement concrete pavement on reinforced concrete slabs of highway bridge roadways, which poses an urgent issue in the design of cement concrete pavement.

The problem of safe operation of bridges has become critical in the past decade due to a number of unfavorable factors. The current maintenance system does not comply with modern technical standards and lacks the necessary resources for proper and timely maintenance of structures. Additionally, the funding system for Ukraine's road network does not allow the use of modern and innovative technologies in bridge operation and construction. Ukraine lacks a clear strategic plan for the improvement, maintenance, and operation of highway bridges.

With increasing transport load parameters and abnormally high summer temperatures, defects in the asphalt concrete pavement of reinforced concrete highway bridges have become widespread, hindering the safe operation of these structures. The condition of pavement on highway bridges—and of the bridges as a whole—remains a pressing issue, as they are an integral part of the national road network.

The main challenge in the operation of cement concrete pavement on reinforced concrete highway bridges is the reduction of service life due to crack formation. Global trends and the direction of current research indicate a rapid development in the construction of rigid-type roads and cement concrete pavement on reinforced concrete bridges. Therefore, there is an urgent need to study and investigate the construction and maintenance of such pavement on bridges in Ukraine.

This article addresses the determination of the extent of damage to cement concrete pavement on the reinforced concrete slab of a highway bridge roadway caused by tensile stresses resulting from the action of vehicle pneumatic wheels. It also examines damage caused by thermal stresses due to daily and seasonal temperature fluctuations.

**Keywords:** highway bridge, degree of damage, roadway, cement concrete pavement.

**Вступ.** Автодорожні мости є невід’ємною складовою мережі автомобільних доріг транспортної інфраструктури України. Технічний стан переважної більшості автодорожніх мостів не відповідає сучасним вимогам щодо забезпечення дорожнього руху та конструктивної надійності елементів споруд

[1, 2]. Застосування цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів має низку переваг порівняно з асфальтобетонним: більш стійке до деформацій, наприклад колієутворення; більша довговічність; забезпечує кращий рівень дорожньої безпеки, наприклад менший гальмівний

шлях, кращі світловідбивальні властивості; менша мінімальна товщина покриття; більш екологічний матеріал, що краще придатний для переробки; протягом життєвого циклу потребують меншої кількості експлуатаційних втручань [1, 2]. Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів є важливим завданням для розрахунку цементобетонного покриття.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Слід зазначити, що відповідно до ДБН В.2.3-22 [3] можна застосовувати два види автодорожніх покриттів на мостах: конструкція з гідроізоляцією (асфальтобетонне покриття) і конструкція без гідроізоляції (цементобетонне покриття). Не встановлено статистичних даних, у яких надано інформацію про відсоткове співвідношення мостів за типом автодорожнього покриття, але аналіз типових проєктів підтверджує, що переважна більшість експлуатованих автодорожніх залізобетонних мостів України мають саме асфальтобетонне покриття [3].

Над вирішенням наукових питань про довговічність цементобетонних доріг і жорстких покриттів працюють такі вітчизняні вчені, як Белятинський А. А. [4], Гамеляк І. П. [5], Коваль П. М. [2], Солодкий С. Й. [6], Чистяков В. В. [7]. Очевидно, що в Україні жорсткі типи покриття менш досліджені та розповсюджені порівняно з асфальтобетонним, у той час як цементобетонне покриття на залізобетонних автодорожніх мостах України є маловивченою науковою проблемою.

На сьогодні актуальним залишається питання про впровадження в Україні цементобетонного покриття на залізобетонних автодорожніх мостах, що потребує розроблення методик розрахунку таких покриттів.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою виконання цієї роботи є визначення міри пошкодження

цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від розтягувальних напружень, що виникають унаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, і температурних напружень, що виникають унаслідок добових і річних температурних коливань.

Науковою новизною отриманих результатів дослідження є встановлення підходів для розрахунку розтягувальних напружень, що виникають унаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, і температурних напружень, що виникають унаслідок добових і річних температурних коливань.

**Основна частина дослідження.** Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від розтягувальних напружень, що виникають унаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, полягає в тому, що від дії пневматичних коліс транспортних засобів у цементобетонному покритті виникають розтягувальні напруження і з часом відбуваються втомні пошкодження в покритті.

На цементобетонне покриття діє колісне навантаження, яке викликає розтягувальне напруження, тому міру пошкодження  $M_{Tp}(t)$  цементобетонного дорожнього покриття автомобільної дороги від зміни напружень, що викликані дією пневматичних коліс транспортних засобів [8], визначають за формулою

$$M_{Tp}(t) = \frac{N_p \times n_c \times \frac{(q^t - 1)}{(q - 1)}}{\left( \frac{K_p \times B_{ib} \times K_M \times K_y \times K_{морз}}{\sigma_p} \right)^{1/b_t}}, \quad (1)$$

Визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від температурних

напружень, що виникають унаслідок добових і річних температурних коливань, полягає в тому, що для прогнозування температурних напружень необхідно знати режим зміни температури цементобетонного дорожнього покриття. Відомі результати теоретичних та експериментальних досліджень свідчать, що на температурний режим цементобетонного дорожнього покриття впливають дві основні гармоніки [8, 9]: зміна температури в річному та добовому циклі коливань.

Цей температурний фактор певним чином впливає на формування фізичних властивостей цементобетону і напружено-деформований стан покриття на

залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів у період експлуатації. За відомих функцій зміни температури поверхні і товщиною цементобетонного покриття можна розрахувати величину і повторність температурних напружень у плитах різної довжини.

Розраховують температурні поля в цементобетонному покритті за рахунок зміни температури на поверхні і товщини покриття, що обумовлено процесами радіаційної, конвективної і кондуктивної теплопередачі. Направлення теплових потоків, що складаються з теплового балансу на поверхні покриття, схематично наведено на схемі рисунка.

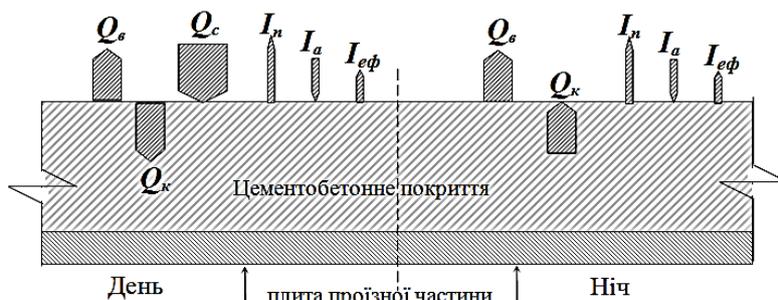


Рис. Схема складових теплового балансу на поверхні напівпростору цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів (удень і вночі):

$Q_c$  — короткохвильова сумарна радіація (пряма і розсіяна);  $Q_e$  — конвективна теплопередача;  $Q_k$  — кондуктивна теплопередача;  $I_a$  — довгохвильове випромінювання покриття;  $I_n$  — довгохвильове випромінювання атмосфери;  $I_{ef}$ ,  $I_n$ ,  $I_a$  — ефективне випромінювання покриття

Радіаційна теплопередача  $R$  виражена радіаційним балансом і є мірою припливу променевої енергії до поверхні покриття:

$$R = (Q_n + Q_p) \times (1 - A) - I_{ef}, \quad (2)$$

де  $Q_n$ ,  $Q_p$  — потоки тепла відповідно від прямої розсіяної радіації;

$A$  — величина, що характеризує відображення тепла залежно від кольору поверхні покриття, так званий коефіцієнт альbedo поверхні.

Конвективна теплопередача  $Q_e$  між поверхнею покриття і повітрям описана законом Ньютона

$$Q_e = \alpha_k \times (T_n - T_e), \quad (3)$$

де  $T_n$ ,  $T_e$  — температура відповідно поверхні покриття і повітря, °C;

$\alpha_k$  — коефіцієнт конвективної теплопередачі, що залежить від швидкості вітру і перепаду температури  $\Delta T = T_n - T_e$ .

Кондуктивну теплопередачу  $Q_k$  від поверхні до плити проїзної частини або від плити до поверхні цементобетонного покриття визначають (у цьому випадку) наближено за законом Фур'є

$$Q_k = \pm \lambda \int_{t_1}^{t_2} \frac{dT(y,t)}{dy} dt, \quad (4)$$

де  $T(y,t)$  — функція розподілу температури за товщиною покриття з часом;

$\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності цементобетону.

Розрахунок температури поверхні покриття полягає в розв'язанні теплотехнічних задач за відомих граничних і початкових умов. Граничними умовами є функція зміни температури на поверхні покриття і певній глибині, початковою умовою — функція розподілу температури за товщиною в початковий час.

Максимальна і мінімальна температури поверхні покриття впродовж доби можуть бути граничною умовою або виявитися допоміжною граничною величиною температури за заданих граничних умов, наприклад гармонічною функцією. За відсутності кондукційної теплопередачі в покритті (через 2-3 год після сходу сонця) температура на поверхні покриття може бути прийнята за початкову умову в задачах, наприклад розподіл температури за товщиною.

Максимальна температура поверхні покриття  $T_{n \max}$  удень відповідає максимальній температурі повітря  $T_e$ :

$$T_{n \max} = T_e + \frac{(Q_n + Q_p) \times (1 - A) - I_{\text{еф}} - Q_k}{\alpha}, \quad (5)$$

де  $Q_n, Q_p$  — потоки відповідно від прямої і розсіяної радіації;

$A$  — величина, що характеризує відбиття тепла залежно від кольору поверхні, так званий коефіцієнт альbedo поверхні;

$I_{\text{еф}}$  — ефективне випромінювання покриття;

$T_n, T_e$  — температура відповідно поверхні покриття і повітря;

$\alpha$  — коефіцієнт конвективної тепловіддачі, залежить від швидкості вітру і перепаду температури.

Тепловий потік  $Q_k$  від поверхні покриття товщиною  $h$  наближається в цей час до стаціонарного [8]:

$$Q_k = 5 \times \lambda \times \text{град} T_1 \times h, \quad (6)$$

де  $T_1$  — максимальний градієнт температури в цементобетонному покритті,  $60^\circ\text{C}/\text{м}$  в умовах помірному і  $85^\circ\text{C}/\text{м}$  континентального клімату;

$\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності цементобетону.

Мінімальну температуру поверхні покриття  $T_{n \min}$  уночі, що відповідає мінімальній температурі повітря  $T_e$ , розраховують за формулою

$$T_{n \min} = T_e + \frac{Q_k - I_{\text{еф}}}{\alpha}, \quad (7)$$

де  $Q_k$  — тепловий потік до поверхні покриття,  $Q_k = 5 \cdot \lambda \cdot \text{град} T_2 \cdot h$ , де  $\text{град} T_2$  — максимальний градієнт температури в покритті,  $40^\circ\text{C}/\text{м}$  в умовах помірному та  $57^\circ\text{C}/\text{м}$  континентального клімату.

Тепловий потік  $Q_k$  до поверхні покриття в формулі (7) [8] наближається в цей час до стаціонарного:

$$Q_k = 5 \times \lambda \times \text{град} T_2 \times h, \quad (8)$$

де  $T_2$  — максимальний градієнт температури в цементобетонному покритті,  $40^\circ\text{C}/\text{м}$  в умовах помірному і  $57^\circ\text{C}/\text{м}$  континентального клімату.

Для безградієнтного температурного поля в покритті, що спостерігають через 2-3 год після сходу сонця, температуру поверхні  $T_n$  за товщиною  $T(y)$  розраховують за формулою, за умови  $Q_k = 0$ ,

$$T_n = T(y) = T_{\theta} + \frac{(Q_n + Q_p) \times (1 - A) - I_{сф}}{\alpha} \quad (9)$$

Для практичних розрахунків добова зміна температури  $T(\theta, t)$  поверхні покриття

з періодом  $T_0$ , рівним, наприклад, 24 год, виражена простою гармонічною функцією

$$T(\theta, t) = T_c + A_0 \times \sin(\omega \times t - f_0) = T_c + A_0 \times \cos(\omega \times t - f_0 - \frac{\pi}{2}), \quad (10)$$

де  $A_0 = \frac{T_n(max) - T_n(min)}{2}$ ;  $T_c = T_n(max) - A_0$ ;  $\omega = \frac{2 \times \pi}{24} = \frac{2 \times \pi}{T_0}$ .

У цьому випадку початкова фаза  $f_0 = \frac{2 \times \pi}{T_0} \times t_0$  виражає розрахункове відхилення температури в частках періоду

$T_0$  від положення рівноваги — середньої температури  $T_c$ .

Зміна добової температури поверхні  $T(\theta, t)$  покриття з урахуванням коливання температури в річному циклі – сума добових і річних коливань:

$$T(\theta, t) = T_1 + A_1 \times \sin \omega_1 \times t_1 + A_0 \times \sin(\omega \times t - f_0), \quad (11)$$

де  $A_1$  — середньорічна амплітуда коливань температури на поверхні покриття,

$$A_1 = \frac{[T_n(max, червень) - A_0(червень)] - [T_n(min, січень) - A_0(січень)]}{2},$$

$T_1$  — середньорічна температура поверхні покриття,

$$T_1 = \frac{T_n(max, червень) + T_n(min, січень)}{2}; \quad \omega_1 = \frac{2 \times \pi}{T_{12}},$$

де  $T_n(max, червень)$  — максимальна температура поверхні покриття середньорічна в червні;

$T_n(min, січень)$  — мінімальна температура поверхні покриття середньорічна в січні;

$A_0(червень), A_0(січень)$  — максимальні добові амплітуди коливань температури на поверхні покриття відповідно в червні і січні;

$T_{12}$  — період коливань річної температури, 12 місяців;

$t_1$  — кількість місяців, від 1 до 12.

Розрахунок розподілу температури  $T(y, t)$  за товщиною цементобетонного дорожнього покриття за стаціонарного кондуктивного теплообміну в покритті [8]:

$$T(y) = T_1 \left(1 - \frac{y}{h}\right) \text{ при } T_1 = T_n - T_{ng} \text{ и } T_n > T_{ng}; \quad (12)$$

$$T(y) = T_2 \times \frac{y}{h} \text{ при } T_2 = T_{ng} - T_n \text{ и } T_n < T_{ng}; \quad (13)$$

$$T(y) = T_n - (T_n - T_{ng}) \times \frac{y}{h} \text{ при } T_n > T_{ng}; \quad (14)$$

$$T(y) = T_n - (T_{ng} - T_n) \times \frac{y}{h} \text{ при } T_n < T_{ng}; \quad (15)$$

де  $T_{ng}$  – температура на підшві покриття (контакт покриття з монолітною плитою).

При цьому в середній площині плити температура, задана функціями (12) – (15) відповідно [8],

$$T_1\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{T_1}{2}; T_2\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{T_2}{2}; T\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{T_n + T_{ng}}{2}. \quad (16)$$

Зміна температури  $T(y, t)$  в будь-яку годину доби за товщиною покриття за гармонічної умови на поверхні у вигляді

гармонічної функції може бути наближено знайдена за формулами розподілу температурних хвиль у напівпросторі [8]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \times \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, 0 \leq y < \infty, T_{y=0} = A_0 \cos \omega \times t,$$

$$T(y, t) = A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \times \cos\left(\omega \times t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right); \quad (17)$$

$$T(y, t) = A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \times \sin\left(\omega \times t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}} + \frac{\pi}{2}\right),$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності цементобетону,  $m^2/\Gamma$ .

У формулі (17) експонента  $\exp\left(-y \times \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$  дає коефіцієнт зниження амплітуди  $A_0$  за товщиною покриття, а

$\cos\left(\omega \times t - y \times \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$  — зміна амплітуди в часі із зсувом фаз на величину  $y \times \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$ .

Відповідно до формули (17) і початкових умов про нульовий градієнт у покритті через 2-3 год після сходу сонця отримують розрахункову формулу [8]

$$T(y, t) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \cos\left(\omega \times t - y \sqrt{\frac{\omega}{2a}} - f_0\right), \quad (18)$$

де  $f_0$  – зсув фаз температури поверхні покриття від  $T_{n \max}$  до  $T_{ніч}$ , якщо  $t = 0$ , град.

Величину коефіцієнта  $b_0$  у формулі (18) знайдено з рівності  $T(0, 0) = T(y, 0)$  або

$$T_c + A_0 \cos(-f_0) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \times a}}\right) \times \cos\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \times a}} - f_0\right), \quad (19)$$

Звідки

$$b_0 = \frac{y \times T_c}{A_0 \times \left[ \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \times a}}\right) \times \cos\left(-y \sqrt{\frac{\omega}{2 \times a}} - f_0\right) - \cos f_0 \right]}. \quad (20)$$

З урахуванням залежності (20) записують вираз для розрахунку температурного режиму цементобетонного

покриття у вигляді бігармонічного закону вигляду

$$T(y, t) = T_c \left(1 - \frac{y}{b_0}\right) + A_0 \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega_0}{2 \times a}}\right) \cos(\omega_0 \times t - y \sqrt{\frac{\omega_0}{2 \times a}} - f_0) + A_p \exp\left(-y \sqrt{\frac{\omega_p}{2 \times a}}\right) \cos(\omega_p \times t - y \sqrt{\frac{\omega_p}{2 \times a}} - f_p), \quad (21)$$

де  $T_c$  – середня температура покриття;

$\bar{A}_p$  – середня за товщиною амплітуда коливань температури покриття в річному циклі;

$\bar{A}_0$  – середня за товщиною амплітуда коливань температури покриття в добовому циклі.

Вираз (21) використано для визначення температури за товщиною цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів.

Параметри формули (21) знаходять із джерел [8, 10], а амплітуду річних коливань ( $A_{np}$ ) за формулою

$$A_{np} = \left( \frac{T_{n,max} - T_{n,min}}{2} \right), \quad (22)$$

де  $T_{n,max}$ ,  $T_{n,min}$  – середньомісячна температура поверхні покриття відповідно найтеплішого і найхолоднішого місяців.

Температуру покриття в найтеплішому місяці  $T_{n,max}$  з урахуванням впливу сонячного нагрівання розраховують за формулою [8, 10]

$$T_{n,max} = \frac{4(\pi + 1)t_{нов,max}}{3\pi}. \quad (23)$$

Середньомісячну температуру найхолоднішого місяця для цементобетонного покриття доцільно порівнювати до відповідної температури повітря:

$$T_{n,min} = t_{нов,min}, \quad (24)$$

де  $t_{нов,min}$  – розрахункові значення середньомісячної температури повітря відповідно для найхолоднішого місяця (січень) і найтеплішого місяця (липень).

З урахуванням статистичного розкиду розрахункові значення  $t_{нов,min}$ ,  $t_{нов,max}$  визначають за формулами [10]

$$t_{nos,min} = \bar{t}_{nos,min} - \sigma_t t, \quad (25)$$

$$t_{nos,max} = \bar{t}_{nos,max} - \sigma_t t, \quad (26)$$

де  $\bar{t}_{nos,min}, \bar{t}_{nos,max}$  – середні багаторічні значення середньомісячної температури повітря відповідно для найхолоднішого місяця та найтеплішого місяця, встановлюють за кліматичними даними;

$\sigma_t$  – середнє квадратичне відхилення середньомісячної температури повітря, що визначають залежно від проєктної надійності за методикою [10];

$t$  – коефіцієнт нормованого відхилення.

Отже, відповідно до формули (21) з урахуванням виразів (22) — (26) є можливість описати зміну температури цементобетонного покриття для різних регіональних кліматичних умов.

Крім бігармонічного закону зміни температури цементобетонного покриття, практичний інтерес має швидкість його охолодження. У цьому випадку, використовуючи параметри формули (21), записують:

– за добових коливань температури

$$k_d = \frac{2A_d}{0,5t_d} = \frac{4A_d}{t_d}, \quad (27)$$

$$\sigma_T(T(y,t)) = k \times E(t) \times \alpha_{\text{цб}} \times T(y) - \frac{k \times E(t) \times \alpha_{\text{цб}}}{h} \int_0^h T(y,t) dy - \frac{12 \times k \times E(t) \times \alpha_{\text{цб}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y,t) \times (\frac{h}{2} - y) dy, \quad (29)$$

де  $T(y,t)$  – гармонічна функція температури за товщиною цементобетонного покриття;

$E(t)$  – модуль пружності цементобетону, який залежить від часу дії навантаження, МПа;

$\alpha_{\text{цб}}$  – коефіцієнт лінійного температурного розширення цементобетону;

де  $t_d$  – період добових коливань температури;

– річних коливань температури

$$k_p = \frac{2A_p}{0,5t_p} = \frac{4A_p}{t_p}, \quad (28)$$

де  $t_p$  – період річних коливань температури.

Такий гармонійний характер зміни температури цементобетонного покриття викликає циклічну зміну температурних напружень у цементобетонному покритті.

За відсутності в покритті поздовжніх деформацій і короблення температурні напруження визначають за формулою  $\sigma_{IT} = E \times a \times T(y)$  з урахуванням гармонічної функції температури  $T(y,t)$ . Щоб визначити напруження  $\sigma_{IT}$  на нижній частині плити цементобетонного покриття або поверхні за формулою  $\sigma_{IT} = E \times a \times T(y)$ , прийнято відповідно  $y = h$  або  $y = 0$ .

У разі вільних поздовжніх деформацій розрахунок температурних напружень у плитах (від деформаційного шва до деформаційного шва), не здатних коробитися ( $C_x = 1$ ) або таких, що мають часткову можливість короблення ( $C_x < 1$ ), такий:

$h$  – товщина цементобетонного покриття, см;

$y$  – задана глибина.

Міру пошкодження цементобетонного покриття від зміни напружень з урахуванням добових і річних температурних коливань визначають за формулою

$$M_{Тем}(T(t)) = \left( \begin{array}{l} n_{i(l)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_{.l} \times (\sigma_{.l}^p(t, T) + \sigma_{.l}^{\partial}(t, T))^{-bt_{.l}}} + n_{i(o, \delta)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_{o, \delta} \times (\sigma_{o, \delta}^p(T(t)) + \sigma_{o, \delta}^{\partial}(T(t))^{-bt_{o, \delta}}} \\ + n_{i(3)} \int_0^{t_i} \frac{dt}{B_{.3} \times (\sigma_{.3}^p(T(t)) + \sigma_{.3}^{\partial}(T(t))^{-bt_{.3}}} \end{array} \right), \quad (30)$$

$$\sigma_{.l}^p(T(t)) = k \times E_{.l}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_{.l}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

де

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_{.l}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_{.l}^{\partial}(T(t)) = k \times E_{.l}^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_{.l}^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_{.l}^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_{o, \delta}^p(T(t)) = k \times E_{o, \delta}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_{o, \delta}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_{o, \delta}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_{o, \delta}^{\partial}(T(t)) = k \times E_{o, \delta}^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_{o, \delta}^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_{o, \delta}^{\partial}(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_{.3}^p(T(t)) = k \times E_{.3}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times T(y) - \frac{k \times E_{.3}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}}}{h}$$

$$\int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_{.3}^p(t) \times \alpha_{y\bar{o}} \times (\frac{h}{2} - y) \times (1 - C_x)^h}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times (\frac{h}{2} - y) dy$$

$$\sigma_3^{\partial}(T(t)) = k \times E_3^{\partial}(t) \times \alpha_{\text{цб}} \times T(y) - \frac{k \times E_3^{\partial}(t) \times \alpha_{\text{цб}}}{h} \int_0^h T(y, t) dy - \frac{12 \times k \times E_3^{\partial}(t) \times \alpha_{\text{цб}} \times \left(\frac{h}{2} - y\right) \times (1 - C_x)}{h^3} \int_0^h T(y, t) \times \left(\frac{h}{2} - y\right) dy$$

**Висновки.** Практична цінність отриманих результатів пов'язана з тим, що вперше запропоновано підходи для визначення міри пошкодження цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів від розтягувальних

напружень, що виникають унаслідок дії пневматичних коліс транспортних засобів, і температурних напружень, що виникають унаслідок добових і річних температурних коливань. Запропоновані підходи дають змогу запроєктувати цементобетонне покриття підвищеної довговічності.

### Список використаних джерел

1. Перспективи застосування цементобетонного покриття на транспортних спорудах / А. М. Онищенко, М. В. Гаркуша, О. О. Давиденко та ін. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 23. С. 178–196. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.178>. (дата звернення: 01.03.2025).
2. Вишнівський Б. О. Проектування цементобетонного покриття на залізобетонній плиті мостового полотна автодорожніх мостів. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 30. С. 311–320. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.311> (дата звернення: 01.03.2025).
3. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Чинний від 2010-03-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 52 с.
4. Bieliatynskiy A., Krayushkina E., Skrypchenko A. Modern Technologies and Materials for Cement Concrete Pavement's Repair. *9th International Scientific Conference Transbaltica 2015* Procedia Engineering 134. 2016. 344–347. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.017> (дата звернення: 01.03.2025).
5. Гамеляк І. П., Дмитриченко А. М. Математична модель оцінки ефективності використання високоміцного цементобетону для дорожніх та аеродромних покриттів. *Автошляховик України*. 2015. № 1-2. С. 75–80. URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/au\\_2015\\_1-2\\_23](https://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2015_1-2_23). (дата звернення: 01.03.2025).
6. Солодкий С. Й., Думич І. Ю. Вплив типу основи на витривалість монолітних цементобетонних дорожніх покриттів. *Автошляховик України*. 2014. № 2. С. 23–26. URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/au\\_2014\\_2\\_8](https://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2014_2_8). (дата звернення: 01.03.2025).
7. Чистяков В. В., Шургая А. Г., Дорошенко Ю. М., Чиженко Н. П. Цементобетони для покриття доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2012. Вип. 85. С. 48–55. URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb\\_2012\\_85\\_9](https://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2012_85_9). (дата звернення: 01.03.2025).
8. МР В.2.3-37641918-920:2021. Методичні рекомендації з проектування і влаштування цементобетонного покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів. Чинний від 2021-12-15. Вид. офіц. Київ: Державне агентство автомобільних доріг України, 2021. 66 с.
9. Радовський Б. С. Проблеми механіки дорожньо-будівельних матеріалів та дорожнього одягу. Київ: ПоліграфКонсалтинг, 2003. 240 с.

10. Р В.2.3-21476215-803:2012. Рекомендації з розрахунку температурних полів і напружень в асфальтобетонних покриттях конструкцій нежорстких дорожніх одягів. Чинний від 2012-12-14. Вид. офіц. Київ: Державне агентство автомобільних доріг України, 2012. 34 с.

---

Онищенко Артур Миколайович, професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>. Тел.: +38 (068) 777-18-99. E-mail: [onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com](mailto:onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com).

Гаркуша Микола Васильович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>. Тел.: +38 (096) 628-79-05. E-mail: [mykola.harkusha@ntu.edu.ua](mailto:mykola.harkusha@ntu.edu.ua).

Аксьонов Сергій Юрійович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6749-3909>. Тел.: +38 (097) 153-44-06. E-mail: [viprojekt@ukr.net](mailto:viprojekt@ukr.net).

Вишнівський Боліслав Олександрович, аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-9376-8299>. Тел.: +38 (050) 468-12-19. E-mail: [Boleslav1987@iCloud.com](mailto:Boleslav1987@iCloud.com).

Onyshchenko Arthur, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>. Tel.: +38 (068) 777-18-99. E-mail: [onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com](mailto:onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com).

Harkusha Mykola, Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>. Tel.: +38 (096) 628-79-05. E-mail: [mykola.harkusha@ntu.edu.ua](mailto:mykola.harkusha@ntu.edu.ua).

Aksonov Serhii, Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6749-3909>. Tel.: +38 (097) 153-44-06. E-mail: [viprojekt@ukr.net](mailto:viprojekt@ukr.net).

Vyshnivskiy Bolislav, graduate student of the Department of Bridges, Tunnels and Hydrotechnical Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-9376-8299>. Tel.: +38 (050) 468-12-19. E-mail: [Boleslav1987@iCloud.com](mailto:Boleslav1987@iCloud.com).

Статтю прийнято 25.12.2025 р.

УДК 691.32

## ВИПРОБУВАННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ 3D-ДРУКУ З ДОСТУПНИХ МАТЕРІАЛІВ

Кандидати техн. наук С. В. Мірошніченко, А. В. Романенко,  
аспіранти А. О. Рильський, С. В. Тютюкін

## TESTING OF CONCRETE MIXTURES FOR 3D PRINTING USING LOCALLY AVAILABLE MATERIALS

PhD (Tech.) Miroshnichenko Sergii, PhD (Tech.) Romanenko Oleksandr,  
PhD Student Rylskiy Andrii, PhD Student Tiutkin Sergii

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352034>

*Анотація.* У статті наведено результати розроблення бетонної суміші для технології 3D-друку з використанням доступних у Харківській області матеріалів. Основну увагу приділено забезпеченню необхідних реологічних характеристик, які допомагають транспортувати суміші трубопроводами, сприяють її екструдюванню та формостійкості. Проаналізовано вплив типу і дозування суперпластифікаторів, а також поліпропіленової

фібри на показники рухомості, щільності, міцності на стиск і згин. Наведено результати механічних випробувань зразків, виготовлених із експериментальної суміші, і визначено масштабний коефіцієнт для оцінювання міцності на балочках порівняно зі стандартними кубами. Розроблену суміш випробувано для друкування на промисловому 3D-принтері ТОВ «Геополімер», що дало змогу виявити низку технологічних особливостей, пов'язаних із застосуванням фібри.

**Ключові слова:** 3D-друк, бетон, фібра, реологічні властивості, міцність, добавки, суміш, екструзія.

**Abstract** The article presents the results of developing and testing a concrete mixture suitable for 3D-printing using locally available materials from the Kharkiv region of Ukraine. The research aimed to design a composition that meets the specific rheological and mechanical requirements of additive construction technologies while maintaining economic feasibility and material accessibility under regional market conditions. The study focuses on achieving optimal workability, extrusion stability, and structural integrity of the printed layers. Particular attention is given to the influence of superplasticizers and polypropylene fiber on the rheological behavior, density, and strength parameters of the concrete mixture. Experimental studies were conducted to determine the effect of different dosages and types of superplasticizers (C-3 and Master Silk) on flowability using a VZ-1 viscometer, which allowed the identification of an optimal content of 0.8 % for Master Silk without the need to increase the water-to-cement ratio. The role of polypropylene fiber with a length of 12 mm was also analyzed. It was found that the inclusion of 300–600 g/m<sup>3</sup> of fiber provides the most stable compressive strength results (430–460 kgf/cm<sup>2</sup>) while maintaining adequate rheological properties. However, longer fibers caused technological complications during extrusion, such as fiber entanglement on the screw feeder, leading to periodic cleaning interruptions. Comprehensive mechanical tests were performed on beam (4×4×16 cm) and cube (10×10×10 cm) specimens to establish a scaling coefficient between different sample geometries. The obtained coefficient (0.9–0.95) allows reliable correlation between laboratory and standard testing results. The developed mixture achieved a compressive strength exceeding 400 kgf/cm<sup>2</sup> and a flexural strength above 68 kgf/cm<sup>2</sup>, corresponding to concrete class C25/30 with satisfactory frost resistance (F75) and water absorption below 4 %. The mixture exhibited a mobility grade of P8 with a cone penetration depth of 65±3 mm, ensuring compatibility with the extrusion mechanism of the industrial 3D-printer. Experimental 3D-printing was carried out on the industrial printer developed by LLC «Geopolymer», confirming the printability and structural integrity of the proposed composition. The study also revealed that even using readily available, unmodified local materials can yield high-performance concrete mixtures suitable for additive construction. Future research will focus on optimizing fiber geometry (2–6 mm) to improve print stability and minimize mechanical interference during extrusion. The developed mixture thus represents a cost-effective and technologically adaptable solution for 3D-printed construction in resource-constrained or war-affected regions.

**Keywords:** 3D-printing, concrete, fiber, rheological properties, strength, additives, mixture, extrusion.

**Вступ.** Вибираючи склад бетону для 3D-друку, потрібно враховувати ряд факторів, починаючи від необхідних фізико-механічних характеристик готового матеріалу і до фактичних реологічних характеристик, які забезпечують взагалі можливість транспортування суміші

трубопроводом, а саме екструдуювання. Рекомендовано діапазон технічних вимог щодо будівельних сумішей для 3D-друку [1]. Також потрібно враховувати і безпосередньо призначення конструкції, якщо говорити про стіни будівель, які експлуатують в умовах навколишнього

середовища *XC4* і *XF1* (це відповідає вертикальним конструкціям будівель, які зазнають атмосферних впливів) [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Коли йдеться про бетон для будівельних конструкцій, завжди використовують основний набір складових – цемент, дрібний заповнювач, крупний заповнювач, вода і додатково різні домішки, які дають змогу надати суміші специфічних властивостей.

У дослідженні [3] як домішки застосовували пластифікатор, прискорювач твердіння та фібру. У роботі [1], крім прискорювача твердіння, також використовували доменний гранульований шлак. У роботі [4] було проаналізовано використання водостійких гіпсо-цементно-шлакових композицій. Для надання матеріалам спеціальних властивостей у роботі [5] застосовували магнезитовий заповнювач. У роботі [6] розглянуто можливість зменшення вуглецевого сліду в сумішах для 3D-друку за рахунок введення біовугілля та перероблених дрібних частинок. У роботі [7] розглянуто можливість використання морської води як прискорювача у друкованому бетоні. Усі перераховані напрями потребують зазвичай доопрацювання відповідних складових до стану, коли їх можна ввести для надання специфічних властивостей у бетонну суміш для 3D-друку. У своїй роботі автори у співробітництві з ТОВ «Геополімер» рухаються в напрямі використання складових, доступних на ринку прифронтового регіону (Харківська область), без додаткових модифікацій і з отриманням необхідних фізико-механічних характеристик.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Розроблення бетонної суміші з місцевих доступних матеріалів і характеристиками, що забезпечать необхідні реологічні і фізико-механічні властивості:

- марка суміші за рухомістю – П8;
- границя міцності на стиск *не менше 30 МПа*, що відповідає класу міцності бетону на стиск *C25/30*;

- водопоглинання за масою не більше 4 %;

- марка за морозостійкістю не менше F75;

- середня густина за вологості не більше 6 %, не менше 1900 кг/м<sup>3</sup>.

**Основна частина дослідження.**

Розробляючи суміш для 3D-друку, важливо враховувати не тільки її фізико-механічні характеристики, а також можливості роботи з цією сумішшю конкретного обладнання (розчинонасос, екструдер) і дальність транспортування цієї суміші трубопроводами. У роботі [8] наведені принципи формування складу суміші і безпосередньо обладнання для друку, а в цій статті розглянемо вплив окремих складових на досягнення відповідних характеристик.

Суміші розробляли і опробовували для конкретного 3D-принтера, який розроблений і побудований ТОВ «Геополімер» [8, 9]. Підбираючи склад бетону, враховували принципи підбирання складу на основі використання оптимальних коефіцієнтів розсуву піску та щебеню [10]. Найкращими складовими для виготовлення суміші для друку є доступні матеріали в регіоні Харківської області. В'язуче – цемент у мішках по 25 кг СЕМІІ/В 32,5R виробництва Кривий Ріг. Заповнювачі – пісок із модулем крупності 1,4 і гранвідсів із модулем крупності 2,4 і максимальним розміром до 5 мм. Максимальний розмір пов'язаний із можливостями шнекової пари, яка використана для друку. Пластифікатор вибирали доступний на ринку і недорогий. Вибір був між С-3 і Master Silk. Також були використані добавки для поліпшення реологічних і адгезійних характеристик.

Норми витрат суперпластифікатора, які рекомендують виробники, мають широкий діапазон. Тому, підбираючи оптимальну кількість для відповідного цементу, застосовували експрес-методику з використанням віскозиметра ВЗ-1 (рис. 1). За допомогою ВЗ-1 умовну в'язкість оцінювали часом ( $\tau$ ) витікання розчину в об'ємі 90 мл через отвір 5,4 мм.

Оптимальний відсоток визначали графічно (рис. 2). Випробування проводили за різних В/Ц.

Для обох суперпластифікаторів із вибраним цементом оптимальний вміст знаходиться в межах 0,8 %, але в разі

використання С-3 виникає потреба збільшити водоцементне відношення, що у свою чергу в подальшому призведе до зменшення міцності. Тому для подальших робіт вибрали суперпластифікатор Master Silk.

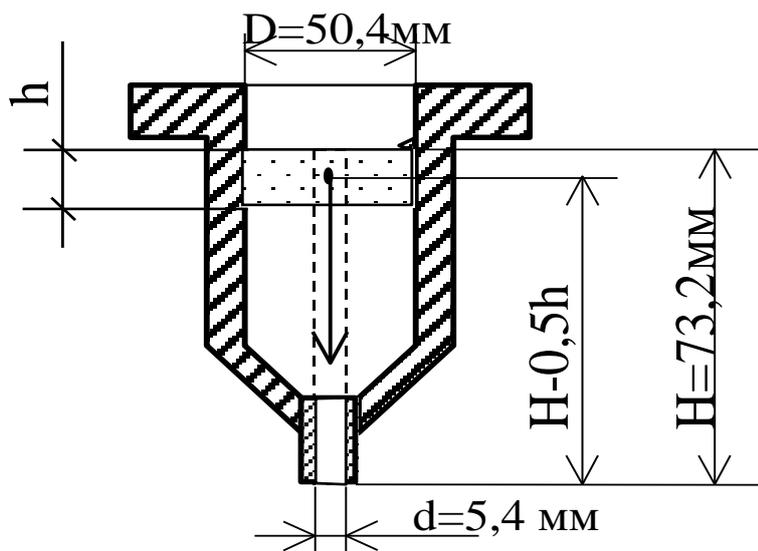


Рис. 1. Схема віскозиметра ВЗ-1

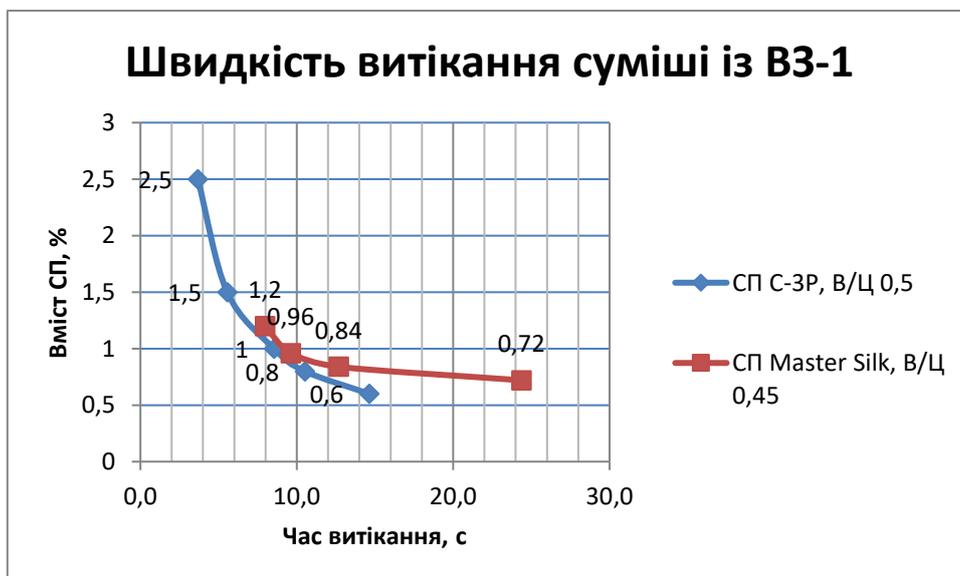


Рис. 2. Визначення оптимальної кількості суперпластифікатора

Як дисперсне армування використовували фібру поліпропіленову довжиною 12 мм. Виходили з того, що більша довжина порівняно з розмірами 2-6 мм дасть змогу збільшити міцність у першу чергу на згин, але не було враховано технологічний фактор – велика довжина фібри намотується на робочий орган екструдера, і його потрібно частіше зупиняти для промивання (не рідше одного разу на три години друкування).

Виробники фібри аргументують покращення властивостей бетону за рядом показників. Збільшує морозостійкість (виробники вважають поліпропіленову фібру альтернативою повітровтягувальним добавкам); істотно знижує утворення усадкових мікротріщин (які згодом мають тенденцію переростати в макротріщини); підвищує зносостійкість бетонної поверхні; збільшує водонепроникність бетону. За рахунок блокування волокнами фібри капілярів бетону з руйнуванням під навантаженням не спостерігають відділення уламків, оскільки залишаються зв'язаними між собою поліпропіленовими волокнами; підвищує міцність на стиск і вигин приблизно на 10 %; стійкість щодо циклів заморожування/розморожування; посилює кути, торці, виключаючи цим сколи; знижує усадку і утворення тріщин у процесі перших годин твердіння бетону; зменшує ймовірність пошкодження конструкцій під час зняття опалубки (в умовах 3D-друку не актуальна).

Рекомендовані витрати 0,6-1,0 кг на  $1 \text{ м}^3$  бетону.

Із введенням фібри у звичайний бетон вплив на фібру від механізмів буде мінімальним. Лише розчинозмішувач і, можливо, бетононасос. Для використання фібри в бетоні для друкування є додаткові механізми, які потрібно розглядати на сумісність таких бетонів із цими механізмами. Використовуючи для друкування як механізми для подавання бетону для друкувального пристрою шнекові пари (штукатурні станції), а також

в екструдерах будуть відбуватися доволі значні механічні впливи на фібру, що призведе як до пошкодження самої фібри, так і намотування на механізми. Із такими впливами ми стикалися і на виробництві, друкуючи на принтері ТОВ «Геополімер», і в лабораторних умовах, використовуючи звичайний міксер. Подібні проблеми були описані в науковій літературі. У своїх випробуваннях ми оцінили вплив кількості фібри на середню міцність на стиск і згин, рухливість суміші, щільність. Діапазон випробувань від 0 до 920 г фібри поліпропіленової довжиною 12 мм на  $1 \text{ м}^3$  бетону.

Вплив такої фібри в заданих межах на рухливість не виявлено. Усі суміші за В/Ц 0,36 мали глибину занурення стандартного конуса в межах 64-65 мм. Впливу на міцність зі згином не виявлено. Випробовуючи балочки 4x4x16 см на згин, середня міцність коливалася в межах 80-88 кгс/см<sup>2</sup>, половинки балочок на стиск (рис. 3) – більш стабільні показники мали склади з кількістю фібри в межах 300-600 г/м<sup>3</sup>, при цьому міцність досягала 500 кгс/см<sup>2</sup> за середніх показників 430-460 кгс/см<sup>2</sup>. Збільшення кількості фібри до 920 г/м<sup>3</sup> призвело до значного зменшення показника міцності до 300 кгс/см<sup>2</sup>. Це можна пояснити складністю рівномірного розподілу фібри в об'ємі за відсутності крупного заповнювача і, як наслідок, нерівномірною міцністю за об'ємом. Визначаючи щільність, виявлено її збільшення у зразках без фібри до 4 %, що може опосередковано підтвердити деяку повітровтягувальну дію фібри.

Паралельно із дослідженням міцності на стиск балочок 4x4x16 см контролювали міцність на кубах із розміром ребра 10 см. У таблиці наведені дані, отримані за випробувань різних серій зразків, але для одного визначеного складу. Обов'язково для всіх серій контролювали такий показник, як рухомість суміші, для якої характерна глибина занурення в суміш стандартного конуса (ЗК). Величина занурення була підібрана виходячи із можливостей конкретного обладнання і

склала  $65 \pm 3$  мм. За результатами випробувань визначено масштабний коефіцієнт для випробування зразків у вигляді балочок розміром  $4 \times 4 \times 16$  см відносно стандартного куба з розміром

ребра 10 см. Він знаходиться в межах 0,9-0,95. Масштабний коефіцієнт потрібен для подальших випробувань і оптимізації складу вже без додаткового формування кубів із розміром ребра 10 см.

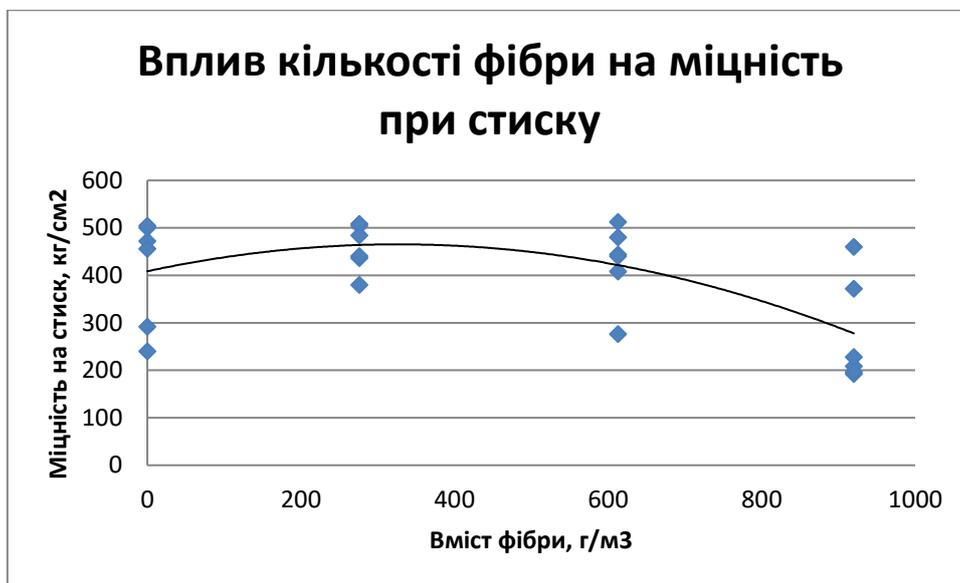


Рис. 3. Вплив кількості фібри на міцність половинок балочок за стиску

Таблиця

Характеристики контрольного складу суміші для 3D-друку, які були отримані за різних серій випробувань

	Міцність (4x4x16 см), кг/см <sup>2</sup>	Міцність куб 10 см, кг/см <sup>2</sup>	Масштабний коефіцієнт	Міцність на згин, кг/см <sup>2</sup>	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	ЗК, мм
Серія 1	418	440	0,95	68,3	2057,1	62
Серія 2	452	471	0,96	76,2	2109	61
Серія 3	420	466	0,9	78,5	2062,3	67
Серія 4	438	506	0,86	72,6	2084,8	63

Як добавки для поліпшення реологічних властивостей суміші були використані ПВА (полівінілацетатна емульсія) у рідкому стані та крохмаль модифікований (КМ). Вплив цих добавок і їхньої кількості на характеристики суміші для 3D-друку в цій роботі не розглянуто.

Для оцінювання можливості друкування розробленим складом на

промислому принтері були виготовлені дослідні зразки окремих конструкцій і фрагментів стін (рис. 4, 5), що показало доволі добру сумісність розробленого складу з конкретним обладнанням ТОВ «Геополімер» за доволі якісного стану поверхні після друкування.



Рис. 4. Друкування експериментальних фрагментів стін на промисловому 3D-принтері компанії ТОВ «Геополімер»



Рис. 5. Дослідні зразки, які були надруковані з експериментального складу на промисловому 3D-принтері компанії ТОВ «Геополімер»

**Висновки.** Розроблено бетонну суміш із місцевих доступних матеріалів із міцністю на стиск більше  $400 \text{ кгс/см}^2$  і на згин більше  $68 \text{ кгс/см}^2$ .

Підібрано необхідну рухливість суміші, виходячи із можливостей конкретного обладнання (3D-принтер ТОВ «Геополімер»), яка склала  $65 \pm 3 \text{ мм}$ .

Підібрано вміст фібри поліпропіленової довжиною  $12 \text{ мм}$ , що дає змогу підвищити міцність бетону. Більш стабільні показники мали склади з кількістю фібри в межах  $300\text{-}600 \text{ г/м}^3$ , при цьому міцність досягала  $500 \text{ кгс/см}^2$  за середніх показників  $430\text{-}460 \text{ кгс/см}^2$ . Але слід зазначити, що, працюючи з такою фіброю, виникли деякі технологічні складності. Проходячи через механізми для подавання

бетону до друкувального пристрою, а також в екструдерах, відбувається намотування на механізми, особливо коли друкують протягом декількох годин підряд. У подальшому передбачено провести випробування з фіброю меншого розміру ( $2\text{-}4\text{-}6 \text{ мм}$ ).

Вибрано недорогий доступний суперпластифікатор (Master Silk) і визначено його дозування для конкретного цементу ( $0,8 \%$ ).

За результатами випробувань визначено масштабний коефіцієнт для випробування зразків у вигляді балочок розміром  $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$  відносно стандартного куба з розміром ребра  $10 \text{ см}$ . Він знаходиться в межах  $0,9\text{-}0,95$ .

Розробленим складом друкували дослідні зразки на промисловому 3D-принтері ТОВ «Геополімер».

### Список використаних джерел

1. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Зятюк Ю. Ю. Цементно-шлакові суміші для 3d принтеру. DOI: 10.48076/2413-9890.2021-102-02.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011.
3. Савицький М. В., Конопляник О. Ю., Мислицька А. О., Лясота О. В. Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3d-друку будівельних конструкцій. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.64.622.
4. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Степасюк Ю. О., Марчук В. В. Ефективні будівельні розчини для 3d-принтера. DOI: 10.48076/2413-9890.2020-101-03.
5. Karol Federowicz a, Mateusz Techman a, Szymon Skibicki a, Mehdi Chougan b, Ahmed M. ElKhayatt c,d, H.A. Saudi e, Jarosław Błyszko a, Mohamed Abd Elrahman f, Sang-Yeop Chung g,\*, Pawel Sikora Development of 3D printed heavyweight concrete (3DPHWC) containing magnetite aggregate. *Materials & Design*. 2023. 233. 112246. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112246>.
6. Karol Federowicz, Paweł Sikora. Low-carbon cementitious composite incorporated with biochar and recycled fines suitable for 3D printing applications: hydration, shrinkage and early-age performance. *Frattura Ed Integrità Strutturale*. 2025. Vol. 19, Iss. 71. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.71.08.
7. Pawel Sikora, Sundar Rathnarajan, Karol Federowicz, Mateusz Techman, Hussein Alkroom. Use of seawater as an accelerator in 3D printed concrete (3DPC). *Materials Letters*. February 2025. Vol. 381, 15. DOI: 10.1016/j.matlet.2024.137781.
8. Мірошніченко С. В., Рильський А. О., Тютюкін С. В. Дрібнозернистий бетон для 3Д друку: проблеми та перспективи. *Збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції: Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій*. Одеса, 2024. С. 88-92.
9. Yaroslav Garashchenko, Olena Harashchenko, Ruslan Kucher. Additive technologies in construction: technical, economic and management analysis. doi: 10.20998/2078-7405.2024.101.10.

10. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: монография в 3-х т. / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин и др.; Укр. гос. акад. ж.-д. трансп.; под ред. А. Н. Плугина. Киев: Наук. думка, 2012. Т. 3. 281 с.

---

Мірошніченко Сергій Валерійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Тел.: +38 (050) 692 53 89. E-mail: c197.9000@gmail.com.

Романенко Олександр Валерійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів,

конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9203-6056. Тел.: +38 (050) 614 17 37. E-mail: roma.kharkov8315@gmail.com.

Рильський Андрій Олександрович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд,

Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-8009-9521.

Тел.: +38 (097) 695 95 84. E-mail: asdrilskiyasd@gmail.com.

Тютюкін Сергій Вікторович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0000-0114-8160. Тел.: +38 (067) 575 57 66.

E-mail: ukrstroyinvest-ua@ukr.net.

Miroshnichenko Serhii, PhD, Associate Professor, Department of Building Materials, Structures and Constructions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Tel.: +38 (050) 692 53 89.

E-mail: c197.9000@gmail.com.

Romanenko Oleksandr, PhD, Associate Professor, Department of Building Materials, Structures and Constructions,

Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9203-6056. Tel.: +38 (050) 614 17 37.

E-mail: roma.kharkov8315@gmail.com.

Rylskiy Andrii, PhD Student, Department of Building Materials, Structures and Constructions, Ukrainian State

University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-8009-9521. Tel.: +38 (097) 695 95 84.

E-mail: asdrilskiyasd@gmail.com.

Tiutkin Sergii, PhD Student, Department of Building Materials, Structures and Constructions, Ukrainian State

University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0000-0114-8160. Tel.: +38 (067) 575 57 66.

E-mail: ukrstroyinvest-ua@ukr.net.

Статтю прийнято 25.12.2025 р.

**УДК 624.012.45:625.1:691.322:621.182.95**

## **АНАЛІЗ МАТЕРІАЛУ ЩОДО УДОСКОНАЛЕННЯ ВЕРХНЬОЇ БУДОВИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ТА РОЗРОБЛЕННЯ НОВОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ**

**Кандидати техн. наук О. І. Валовой, В. В. Афанасьєв, М. О. Валовой**

## **ANALYSIS OF MATERIAL REGARDING IMPROVEMENT OF THE RAILWAY TRACK SUPERSTRUCTURE AND DEVELOPMENT OF A NEW TECHNICAL SOLUTION**

**PhD (Tech.) Oleksandr Valovoi, PhD (Tech.) Vitalii Afanasiev, PhD (Tech.) Maksym Valovoi**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352037>

*Анотація.* Розглянуто актуальні напрями підвищення ефективності будівництва залізниць на слабких основах. Встановлено відхилення і зміщення рейко-шпальної решітки залізничних колій на відвалах добутку залізних руд Криворізького басейну. Розроблено нову верхню будову колії, яка усуває складності колійних робіт, збільшує строки дії шарів баластної призми, замінює традиційний щебінь у призмі на щебінь із місцевих скельних гірничих порід.

**Ключові слова:** верхня будова залізничної колії, баластна призма, щепеневий баласт, слабкі основи.

**Abstract.** Modern directions for increasing the efficiency of railway construction on weak foundations are considered. Deviations and displacements of the rail-sleeper grid of railway tracks on iron ore dumps of the Kryvyi Rih Basin are established. Deviations of the track width, level, sizes of joint gaps, the difference of adjacent bending sags in circular curves (at points every 10 m for chords of 20 m) and the displacement of sleepers relative to the design position are determined. A new upper structure of a railway track has been developed, which contains a reinforced concrete block with bottom and side walls laid on an earthen bed, on the lower part of which two layers of crushed stone ballast are filled with a diaphragm between the layers, where the inner side of the side walls of the block is made in the lower part inclined at an angle of  $10-45^\circ$  from the vertical and the vertex of the angle limits the lower layer of crushed stone ballast, and in the upper part the inner side of the walls is made at an angle of  $140-200^\circ$  to the inclined inner side of the lower part of the side walls of the block, and the diaphragm is made such that it covers the lower layer of crushed stone ballast with the ballast layer covering between the layer and the walls of the block. In this case, the diaphragm covers the lower layer with folds on the sides near the walls of the block and at the level of the vertex of the angle  $\alpha$ . The new structure of the railway track eliminates difficulties with track installation and repair, increases the service life of ballast prism layers, and promotes the replacement of traditional crushed stone with crushed stone from local rocks.

**Keywords:** upper structure of the railway track, ballast prism, crushed stone ballast, weak foundations.

**Вступ.** Будівництво залізничних колій можуть проводити у складних інженерно-геологічних, гідрологічних умовах. Так, міцні основи складені скельними породами, великоуламковими, піщаними, глинистими твердими і напівтвердими ґрунтами, а слабкі основи складені слабкими ґрунтами, деформація яких може викликати появу великих і нерівномірних у часі осадів верхньої будови колії. Будівництво на слабких основах пов'язано зі зростанням експлуатаційних витрат на ремонтно-відновлювальні роботи рейко-шпальної решітки, зниженням експлуатаційних показників класу, групи, підгрупи, типу колії, типу рейок, максимальної швидкості та максимальної вантажної напруги залізничної колії. При цьому поперечні профілі нульових місць і виїмок із слабких ґрунтів мають нерівномірні деформації. Це ускладнює характер порушень колії та викликає пошук і розроблення нових технічних рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існують актуальні напрями

підвищення ефективності будівництва залізниць на слабких основах, а саме через зміцнення баластної призми залізничної колії [1, 2] і вдосконалення верхньої будови залізничної колії [3, 4]. Це забезпечує розподіл навантаження, стабілізацію рейок і поглинання вібрацій баластною призмою від залізничного транспорту.

Розроблено спосіб зміцнення баластної призми верхньої будови залізничної колії і захисту від проникнення засмічувачів, який складається з відсіпання щебеню з утворенням насипу у вигляді баластної призми, і введення в неї сполучного, який використовують із відходів нафтопереробки [1]. Недоліком є те, що за такого способу в разі руху вагового залізничного транспорту рейко-шпальна решітка має горизонтальний зсув шпал.

Існує спосіб зміцнення баластної призми верхньої будови залізничної колії, за якого відсіпають із баластної призми частину щебеневого шару, формують із боку діючої частини шляху технологічний укис висотою  $H$ , у верхні шари укусу і

ділянки баластної призми, що примикають, шириною  $H/2$  вводять рідке полімерне сполучне [2]. Недоліками такого способу зміцнення баластної призми є здатність можливого обсіпання баластних матеріалів на суміжну колію та складність проведення колійних робіт на ділянках.

Верхню будову залізничної колії підсилюють на сьогодні способом, який включає залізобетонний блок із дном і бічними стінками, що укладено на земляне полотно. На дно блока відсипано два шари щебеневого баласту з діафрагмою поміж ними [3].

Недолік – контактуючи з баластом рейко-шпальної решітки, під транспортним навантаженням виникає вібраційний вплив на баласт, який веде до сепарації щебеню так, що крупні зерна щебеню піднімаються вгору, а дрібні опускаються до низу. Така сепарація в шарах баласту веде до збільшення кількості колійних робіт із передчасної заміни щебеню і погіршує фільтрацію води із залізобетонного блока.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою досліджень будівництва залізничних колій на слабких основах є усування складності колійних робіт як із монтажу, так і ремонту, збільшення строку дії шарів баластної призми, заміна традиційного щебеню [10] на щебінь із місцевих скельних гірничих порід [6], відмова від піщаної подушки, підвищення швидкостей руху транспорту. Завданням досліджень є встановлення відхилень і зміщень рейко-шпальної решітки залізничних колій на слабких основах добутку залізних руд Криворізького басейну та розроблення технічного рішення щодо верхньої будови колії.

**Матеріали та методи досліджень.** Нами обстежено три ділянки з відхиленнями рейко-шпальної решітки на дерев'яних шпалах від нормованих значень за формування відвалів добутку залізної руди. Вимірювання відхилень і зміщення проводили за допомогою спеціалістів Інгулецького гірничозбагачувального

комбінату шаблоном ЦУП-1, а для шпал додатково нівеліром.

**Основна частина дослідження.** Залізнична колія як комплекс інженерних споруд і пристроїв, яка утворює дорогу з рейковою колією, для пропускання залізничного рухомого складу має нижню та верхню будови. Нижня будова залізничної колії являє собою комплекс інженерних споруд, сприймає навантаження і спрямовує рух рухомого складу. Нижня будова включає земляне полотно, мости, естакади, тунелі, труби, споруди для пропускання води, підпірні стінки, підсилюючі і захисні споруди. Верхня будова сучасної конструкції задовольняє основні принципи: міцність, стійкість, стабільність, зносостійкість, рух локомотива зі встановленою швидкістю. Верхня будова включає баластну призму, шпали, рейки зі скріпленнями, стрілочні переводи.

У нижній будові основною інженерною спорудою є земляне полотно. Зі спорудженням на слабкій основі і зі слабких ґрунтів виникають його дефекти, пов'язані з відхиленнями конструктивних параметрів земляного полотна від нормованих значень: верху, узбіч основного майданчика насипу, водовідводів і закуветних полиць укосів. За погонного залізничного навантаження проявляються залишкові осідання, підняття, зміщення, пошкодження або руйнування земляного полотна і його елементів від природних і техногенних впливів.

Утворюються нерівності поздовжнього профілю довжиною більше 25 м. Виникають відхилення конструктивного геометричного положення рейкової колії від нормованого проєктного. Мають місце відмови в роботі, які проявляються в порушеннях працездатності рейко-шпальної решітки верхньої будови колії локомотивом зі сходженням (відрив, перелом підрейкової основи). Потрібні влаштування верхньої будови залізничної колії з втопленою баластною призмою, проведення частих колійних ремонтів, а зі зростанням кількості відмов – зміцнення

слабкої основи, видалення наявного земляного полотна і спорудження на скельних гірських породах [6] або близьких до них ґрунтах нового земляного полотна.

Баластна призма верхньої будови колії розподіляє навантаження від залізничного транспорту на основний майданчик земляного полотна. За типових поперечних профілів баластної призми в разі щелевеного баласту застосовують двошарову призму, у якій під шаром щелеву укладають подушку піщану [7-9], гравійну, гравійно-піщану або з азбесту, мушлі. Подушка економить щелеві, не допускає забруднення щелеву через можливе проникнення ґрунту земляного полотна в баласт, оберігає ґрунт від розрідження, пересихання, розтріскування. При цьому на земляному полотні зі щільних скельних, великоуламкових і піщаних ґрунтів щелеві баластної призми можна укласти без подушки.

Для того щоб тиск від баласту на основний майданчик земляного полотна нижньої колії не призводив до утворення заглиблень у ній (баластних корит або лож), укладають достатню товщину баласту. Залежно від типу верхньої будови колії (нормального, важкого і особливо важкого) товщина шару щелеву для піщаної подушки товщиною 20 см має бути відповідно 25, 30, 35 см. Товщину одношарової призми влаштовують 0,45 м. Сучасне зростання експлуатаційних

показників залізниць потребує переведення їх на щелевений баласт із застосуванням фракцій 5–25 мм, бажано зі щільних скельних гірських порід [6].

Спорудження залізничних колій на слабких основах відвалів, земляного полотна зі слабких ґрунтів, баластних призм із некондиційних матеріалів пов'язано з появою ділянок колій із відхиленнями і зміщеннями: відхилення за шириною колії, за рівнем, у розмірах стикових зазорів, різниця в суміжних стрілах вигину в кругових кривих (у точках через 10 м за хорди 20 м), зміщення шпал відносно проектного положення. Нами було вибрано три контрольні ділянки залізничної колії на слабких основах. Вимірювання здійснювали разом зі спеціалістами Інгулецького гірничозбагачувального комбінату.

#### Відхилення за шириною колії.

Відхилення за шириною колії оцінює відстань між внутрішніми гранями верхніх частин рейок. Показник важливий для забезпечення та ефективності руху залізничними коліями.

Нами проведено вимірювання відхилення за шириною колії з використанням вимірювальної лінійки, яку розміщували між внутрішніми гранями верхніх частин рейок (рис. 1, 2). Якщо виміряна відстань перевищувала допустимі відхилення, то це свідчило про наявність відхилення за шириною колії.

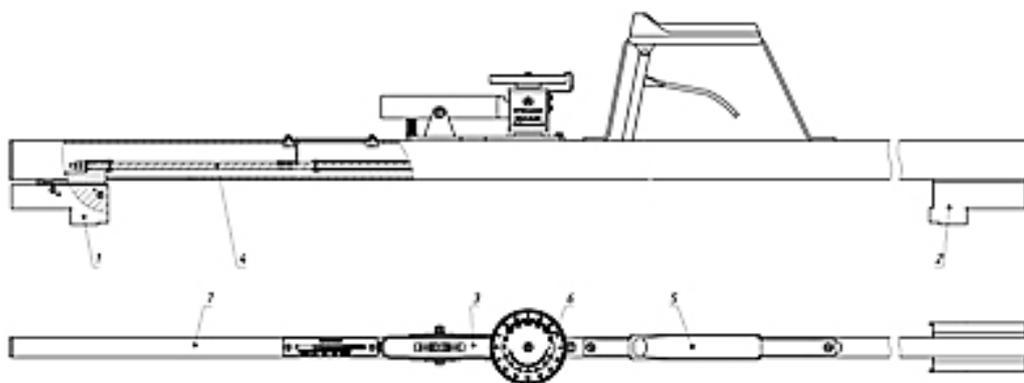


Рис. 1. Залізничний контрольний шаблон ЦУП-1



Рис. 2. Використання шаблона ЦУП-1 для вимірювань

Розширення чи звуження колії спричинено різними факторами, такими як зношення або деформація частин підвіски, несправності в системі керування, неправильне встановлення компонентів, зміна вантажопідйомності залізничного транспортного засобу тощо. Регулярна перевірка і корекція відхилень за шириною колії забезпечує рух залізничного транспорту.

Встановлено, що номінальний розмір ширини колії між внутрішніми гранями головок рейок із дерев'яними шпалами на прямих ділянках залізничної колії становить 1524 мм за відхилень відносно подовження до 1536 мм, а ширина колії на кривих радіусом від 349 м і менше – 1540...1550 мм. Визначено, що величини відхилень від норм із розширення в геометрії рейкової колії за номіналом 1524 мм становлять до +12 мм. Це спричиняє необхідність зниження швидкості локомотива на ділянках до 15 км/год, погіршує керованість, призводить до зносу коліс, колії, підвищує витрати палива.

**Відхилення за рівнем.** Відхилення «за рівнем» належить до змін нахилу колії в площині поперечного розрізу під час руху локомотива з різними швидкостями (рис. 3). Цей параметр важливий для забезпечення та ефективності руху залізничного транспорту на ділянках колій. Із підвищенням швидкостей зміна нахилу може мати великий вплив на стійкість локомотива.

Ми вимірювали відхилення за рівнем із використанням вимірювальної лінійки (колійного контрольного шаблона ЦУП-1). Під час вимірювання рівня залізничної колії враховували динамічні ефекти як бічні сили і через вплив відцентрової сили під час поворотів. На трьох ділянках залізничного полотна з баластною призмою з хвостів сухої магнітної сепарації гірничозбагачувального комбінату [6, 10] визначали рівень, який становив: 1) 70 мм; 2) 90 мм; 3) 80 мм, а також просідання, що становило до 140 мм. При цьому виключали ділянки, на яких відвід піднесення зовнішньої рейки влаштований у прямій.



Рис. 3. Ділянка залізничного полотна зі щєбеневою баластною призмою з місцевих матеріалів

За отриманими даними встановлено, що на ділянках 1, 2, 3 потрібно обмеження швидкості локомотива до 5...15 км/год; необхідний колійний ремонт, пов'язаний із заміною баластної призми з нефракціонованого матеріалу на баластну призму зі щєбеню крупністю 5-25 мм, а також ремонт з укріплення слабкої основи.

**Різниця в суміжних стрілах вигину в кругових кривих.** Різниця в суміжних стрілах вигину в кругових кривих (у точках через 10 м за хорди 20 м) являє собою

технічний параметр, пов'язаний із геометрією залізничної колії в кругових кривих (рис. 4). Суміжні стріли вигину є відстанню між внутрішніми гранями верхніх частин рейок у круговій кривій. Різниця в суміжних стрілах у точках через 10 м за хорди 20 м означає, що різницю в суміжних стрілах вимірюють у точках, які знаходяться через кожні 10 м по довжині кругової кривої, за умови, що хорда (відрізок прямої, що з'єднує кінці кривої) дорівнює 20 м.



Рис. 4. Ділянка колії для вимірювань різниці в суміжних стрілах

Цей параметр досить важливий, оскільки зміна суміжних стріл вигину може вплинути на динамічну поведінку локомотива, особливо під час проходження кривих ділянок колії, впливає на безпеку і стійкість руху поїзда під час проходження зігнутих ділянок. Суміжні стріли вигину впливають на лежання коліс на рейках і забезпечують необхідний зазор для повороту коліс у кривих, запобігаючи боковим силам, що можуть виникнути під час руху вигнутими ділянками. Цей параметр, як і інші геометричні характеристики колії, відповідає за забезпечення ефективного і безпечного руху залізничного транспорту.

Вимірювали різницю в суміжних стрілах із використанням вимірювальної лінійки (рис. 1) у точках через кожні 10 м

уздовж кругової кривої за хорді 20 м. Встановлено, що різниця суміжних стріл, вимірюваних від середини хорди завдовжки 20 м за довжини нерівності колії понад 20 до 40 м включно для трьох точок становила: 1) 70 мм; 2) 95 мм; 3) 85 мм. Висновок: потрібні обмеження швидкості руху локомотива до 5...15 км/год і ремонт верхньої будови колії зігнутої ділянки кругової кривої.

**Відхилення в розмірах стикових зазорів.** Відхилення в розмірах стикових зазорів на залізниці належать до змін у розмірах зазорів і з'єднань між рейками, особливо в місцях з'єднання – стиків. Стиковий зазор являє собою простір між кінцями двох суміжних рейок у стику. Ці відхилення можуть впливати на безпеку і стійкість руху залізничного складу (рис. 5).



Рис. 5. Стиковий зазор між рейками

Вимірювали відхилення в розмірах стикових зазорів із використанням вимірювальної лінійки в різних точках стику з оцінюванням ширини, висоти і глибини стикового зазора. Величини трьох стикових зазорів становили 0; 20; 15 мм. Зазор у стиках поворотних гостряків і сердечників близький до нормативного і складав 3...5 мм. Встановлено, що необхідні

регулярні вимірювання та корекції відхилень у розмірах стикових зазорів. Це забезпечує ефективність руху залізничною колією за різних швидкостей локомотива.

**Зсув шпал від проєктного положення.** Зсув дерев'яних шпал від проєктного положення на залізниці може відбуватися через деформацію ґрунту слабких основ, зміну вологості,

нерівномірні навантаження та інші фактори, що призводить до нерівномірного розподілу навантаження на рейки, впливає на стабільність колії та безпеку руху

залізничного транспорту. Може суттєво зменшуватися через посилення стиків і додаткове введення в рейко-шпальну решітку металевих шпал (рис. 6).



Рис. 6. Рейко-шпальна решітка з посиленням стиків і додатковими металевими шпалами

Вимірювали зміщення дерев'яних шпал за допомогою вимірювальної лінійки та нівеліра. Встановлено, що на ділянці з основою і баластною призмою з нефракціонованих місцевих матеріалів рейко-шпальна решітка укріплена металевими шпалами. Місця сходження локомотива не визначені. Зміщення дерев'яних шпал у трьох випадках становило 30, 50, 80 мм, що допустимо (80 мм за швидкості локомотива до 15 км/год). Необхідно здійснювати систематичні вимірювання та контролювати зміщення дерев'яних шпал. Це гарантує безпеку, ефективність і довговічність залізничної інфраструктури, дає змогу виявляти проблеми та проводити регулярне технічне обслуговування і підтримку належного стану колії.

**Розроблення нової верхньої будови залізничної колії.** Для удосконалення способу і пристрою [3] нами розроблено нову верхню будову залізничної колії, яка містить укладений на земляне полотно залізобетонний блок із дном і бічними стінками, на дно якого відсипано два шари щебеневого баласту з діафрагмою між

шарами, де внутрішня сторона бічних стінок блока виконана в нижній частині нахилоною під кутом  $10-45^\circ$  від вертикалі, вершина кута обмежує нижній шар щебеневого баласту, а у верхній частині внутрішня сторона стінок виконана під кутом  $140-200^\circ$  до похилої внутрішньої сторони нижньої частини бічних стінок блока, діафрагма виконана такою, що покриває нижній шар щебеневого баласту з огинанням шару баласту між шаром і стінками блока. При цьому діафрагма покриває нижній шар із відгинанням його з боків біля стін блока і на рівні вершини кута  $\alpha$  [4, 5].

Верхня будова залізничної колії показана на рис. 7. Складається з залізобетонного блока 1, дна 2, бічних стінок 3, нижньої частини 4, яка виконана з внутрішньою стороною блока похилою під кутом  $\alpha = 10-45^\circ$  до вертикалі, верхньої частини 5, стінки 3, виконаної внутрішньою стороною, нахилоною під кутом  $\beta = 140-200^\circ$  до сторони кута  $\alpha$ , шпали 6 на верхньому шарі баластного щебеню 7, нижнього 8 шару баласту щебеню, діафрагм 9 між шарами 7, 8 і стінками 3.

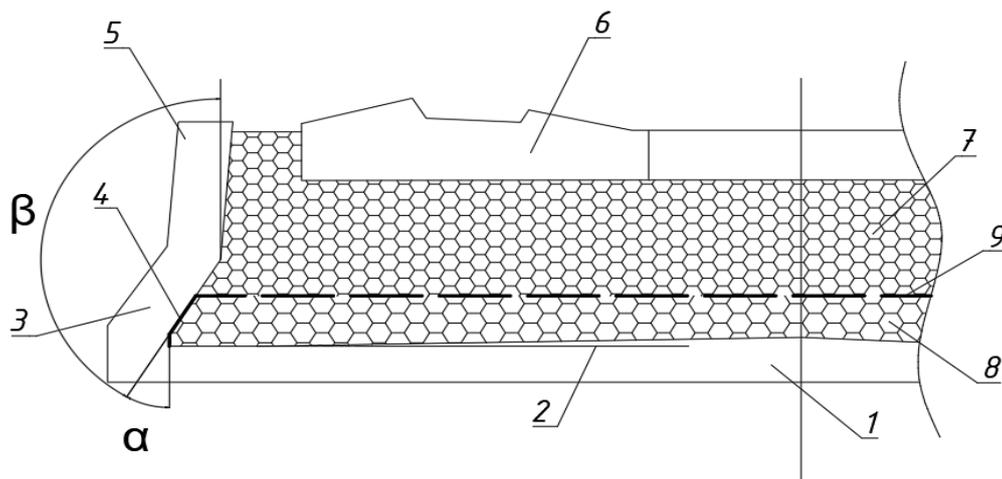


Рис. 7. Нова верхня будова залізничної колії

Верхню будову залізничної колії укладають на земляне полотно у вигляді залізобетонного блока 1 з боковими стінками 3. У залізобетонному блоці 1 під дією навантаження поїзда виникають вібраційні коливання, які від рейко-шпальної решітки подаються на шари баластного щебеню у верхньому та нижньому шарах, відповідно у верхній 5 і нижній 4 частинах стінок 3. Із вібраційним впливом із боку рейко-шпальної решітки нахил нижньої частини 4 стіни 3 на кут  $\alpha$  виключає сепарацію щебеню баластного шару нижньої частини 4 стінки 3 у шарі баластного щебеню частини 4 стінки 3 через боки нижнього шару 8, а кут  $\beta$  нахилу верхньої частини 5 стінки 3 відносно нижньої частини 4 сприяє сепарації верхнього шару баластного щебеню зі швів поміж шпалою 6 і стінкою 3 від рейко-шпальної решітки.

Завдяки кутам  $\alpha$  і  $\beta$  нахилу частин 4 і 5 стінки 3 і огинання діафрагмою шару баластного щебеню досягають сепарації шару щебеню так, що крупні зерна зміщуються під шпали та підіймаються в підшпальну решітку догори. У результаті зменшується сепарація баласту в нижній частині 4. Також виникає затримка сепарації щебеню верхнього шару баласту 7 у

підшпальному просторі і в бік між шпалою 6 і шарами 7, 8 у залізобетонному блоці 1.

**Висновки.** 1. Будівництво залізничних колій на слабких основах, верхньої будови зі слабких ґрунтів і нижньої будови з некондиційних матеріалів призводить до появи відхилень і зміщень колії відносно проектного положення.

2. Відкриваються можливості для ефективного будівництва залізниць на слабких основах відвалів, обслуговування і ремонту пошкоджених ділянок колій діючих залізниць.

3. Підвищується експлуатаційна надійність верхньої будови:

- за рахунок повного використання зернового складу баластного щебеню;
- через оптимізацію кутів нахилу стінок блока і збільшення строку служби шарів щебеню.

4. Відкривається можливість використання місцевих матеріалів у баластній призмі: скельних гірських порід залізорудних кар'єрів і відходів сухого магнітного збагачення гірничозбагачувальних комбінатів.

5. Знижується пилоутворення і суттєво поліпшується екологічний стан навколишнього середовища.

*Список використаних джерел*

1. А. с. SU 887723 А, МПК E01B 1/00. Спосіб зміцнення баластної призми. Опубл. 07.12.1981, Бюл. № 45.
2. Спосіб зміцнення баластної призми: пат. РФ № 2469145 МПК E01B 1/00. Опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.
3. Верхня будова залізничної колії: пат. РФ № 2127786 МПК E01B2/00. Опубл. 20.03.1999, Бюл. № 9.
4. Верхня будова залізничної колії: пат. України № 151112 U МПК E01B2/00. Опубл. 08.06.2022, Бюл. № 23.
5. Афанасьєв В. В., Піскун І. А. Верхня будова залізничної колії. Розвиток промисловості та суспільства. Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. : тези доповідей. Кривий Ріг, 2022. С. 66.
6. ДСТУ Б В.2.7-34:2001. Щебінь для будівельних робіт із скельних гірських порід та відходів сухого магнітного збагачення залістистих кварцитів гірничо-збагачувальних комбінатів і шахт України. Технічні умови. Київ: Держбуд України, 2001. 32 с.
7. ДСТУ Б В.2.7-33-2001. Пісок кварцево-залістий і тонкодисперсна фракція для будівельних робіт з відходів гірничо-збагачувальних комбінатів України. Технічні умови. Чинний від 2002-04-01. Київ: Держбуд України, 2001. 31 с.
8. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Чинний від 1996-01-01. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 35 с.
9. ДСТУ Б В.2.7-29-96. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. Чинний від 1996-01-01. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 35 с.
10. ДСТУ Б А.1.1-56-94. Гірські породи для виробництва нерудних будівельних матеріалів. Терміни та визначення. Київ: Укргеолбудм, 1994. 31 с.

---

Валовой Александр Иванович, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри промислового цивільного і міського будівництва, Криворізький національний університет. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-2939-3028>. Тел.: +38(067)901806. E-mail: [valovoi@knu.edu.ua](mailto:valovoi@knu.edu.ua).

Афанасьєв Віталій Валентинович, кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового цивільного і міського будівництва, Криворізький національний університет. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0000-5840-3513>. Тел.: +38(097)7539205. E-mail: [afanasiev.vv@knu.edu.ua](mailto:afanasiev.vv@knu.edu.ua).

Валовой Максим Александрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового цивільного і міського будівництва, Криворізький національний університет. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-4623-4248>. Тел.: +38(096)2871016. E-mail: [valovoj.mo@knu.edu.ua](mailto:valovoj.mo@knu.edu.ua).

Oleksandr Valovoi, PhD in Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial, Civil, and Urban Construction, Kryvyi Rih National University. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-2939-3028>. Tel. +38(067)901806. E-mail: [valovoi@knu.edu.ua](mailto:valovoi@knu.edu.ua).

Vitalii Afanasiev, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil, and Urban Construction, Kryvyi Rih National University. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0000-5840-3513>. Tel. +38(097)7539205. E-mail: [afanasiev.vv@knu.edu.ua](mailto:afanasiev.vv@knu.edu.ua).

Maksym Valovoi, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil and Urban Construction, Kryvyi Rih National University. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-4623-4248>. Tel. +38(096)2871016. E-mail: [valovoj.mo@knu.edu.ua](mailto:valovoj.mo@knu.edu.ua).

Статтю прийнято 25.12.2025 р.

*ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)*

---

УДК 528:004

**ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ОСНОВА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НЕРУХОМОСТІ**

**Канд. екон. наук О. О. Воронков, канд. техн. наук А. А. Євдокімов**

**GEOGRAPHIC INFORMATION BASE FOR REAL ESTATE VALUATION**

**PhD (in Economics) O. Voronkov, PhD (Tech) A. Yevdokimov**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352039>

**Анотація.** У статті досліджено сучасні підходи для оцінювання нерухомості з використанням геоінформаційних систем (ГІС), що допомагають підвищити точність і об'єктивність оціночних процесів. Основну увагу приділено аналізу впливу просторових факторів (транспортна доступність, інфраструктура, локація) на вартість оренди нерухомості на прикладі м. Харкова. У статті зазначено про необхідність подальшого вдосконалення системи, зокрема автоматизації оновлення даних, розширення факторного аналізу та інтеграції AI. Запропонований підхід може бути використаний для масового оцінювання, оптимізації податкової політики та ухвалення інвестиційних рішень.

**Ключові слова:** моделювання, геоінформаційні системи, оцінювання нерухомості, QGIS, транспортна доступність, просторовий аналіз.

**Abstract.** This article explores the application of Geographic Information Systems (GIS) in real estate valuation, demonstrating how spatial analysis can increase the accuracy and objectivity of property appraisal. Using the rental housing market in Kharkiv as a case study, the research develops a practical GIS-based methodology implemented in the open-source software QGIS. A geodatabase was created containing 80 rental listings geocoded by address, supplemented by infrastructure layers (metro stations, public transport stops, shops, pharmacies, parks, schools, kindergartens, and hospitals).

Spatial analysis techniques, including density mapping, buffer zones, and visualization of accessibility, revealed two primary high-value rental zones: the prestigious central part of Shevchenkivskyi district and densely built-up neighborhoods of Saltivka with well-developed infrastructure. The study confirmed a strong correlation between rental prices and proximity to metro stations, while also showing that a dense and efficient ground public transport network can largely compensate for the absence of metro access in certain areas.

The results highlight the effectiveness of GIS in visualizing spatial patterns of the rental market and identifying factors that traditional valuation methods often overlook. The developed model serves as a practical tool for appraisers, real estate analysts, and local authorities. Limitations of the current research include the static nature of the dataset and the need for regular automated updates. Future improvements involve incorporating additional factors (environmental conditions, noise levels), integrating machine learning for price forecasting, and creating publicly accessible geoportals. The study provides a replicable, open-source framework that combines GIS techniques with real-world valuation tasks, contributing to more transparent and data-driven decision-making in urban real estate markets.

**Keywords:** modeling, geographic information systems, real estate valuation, QGIS, transport accessibility, spatial analysis.

**Вступ.** Оцінювання нерухомості – це складний процес, який передбачає визначення економічної вартості об'єктів нерухомості на основі різних факторів, включаючи місцезнаходження, фізичні характеристики, ринкові тенденції та юридичні міркування. В останні десятиліття інтеграція геоінформаційних систем (ГІС) зробила революцію у сфері оцінювання нерухомості, забезпечивши надійну основу для аналізу просторових даних і підвищивши точність і ефективність процесів оцінювання.

Геоінформаційні системи (ГІС) є основним інструментом сучасного оцінювання нерухомості. Вони дають змогу систематизувати, аналізувати і наочно подавати геодані, включаючи локацію об'єкта, розвиток інфраструктури, коливання цін тощо. Інтеграція ГІС з іншими базами даних і сервісами забезпечує комплексний підхід, даючи змогу оцінювачам отримувати розгорнуту інформацію про нерухомість і її середовище. Це значно підвищує точність і достовірність висновків про вартість об'єкта.

Прогрес у сфері геоінформаційних систем (ГІС) відкриває нові можливості для оцінювання нерухомості. Сучасні ГІС-інструменти, такі як деталізовані карти, супутникові знімки з подальшим аналізом і застосування штучного інтелекту для обробки даних, значно підвищують точність, швидкість і достовірність оціночних результатів.

Поєднання ГІС з оцінюванням нерухомості відкриває нові горизонти для аналітики. Геопросторовий підхід дає змогу враховувати важливі територіальні особливості, зменшуючи суб'єктивність і підвищуючи достовірність результатів. Серед додаткових переваг: можливість моделювати розвиток територій, виявляти перспективні ділянки та оптимізувати рішення про будівництво. У результаті оцінювання стає більш науковим, а висновки більш обґрунтованими.

Застосування сучасних технологічних рішень дає змогу забезпечити всебічне та високоякісне оцінювання нерухомості, інтегруючи багатофакторний підхід з інноваційними методами аналізу. Такі інструменти значно підвищують ефективність оціночного процесу за рахунок автоматизації, зменшення суб'єктивних факторів і забезпечення більш точних результатів. У результаті фахівці мають змогу проводити об'єктивні та обґрунтовані аналізи, що суттєво підвищує достовірність оціночних висновків і сприяє ухваленню оптимальних рішень у сфері нерухомості.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідженню впровадження ГІС для оцінювання нерухомості присвячено багато вітчизняних і зарубіжних публікацій, достатньо різнобічних і прийнятних для дослідження цієї проблеми.

Так, у роботі [1] наведено результати дослідження ринку нерухомості з використанням ГІС-технології. Автори доводять, що використання ГІС-карт допомагає виявляти закономірності та прогнозувати майбутні зміни на ринку нерухомості.

Авторами роботи [2] визначено тенденції розвитку ГІС у вирішенні питань оцінювання нерухомості. У роботі зроблено висновок, що масштабне впровадження ГІС для аналізу нерухомості має покращити якість оцінювання, зробити ринок нерухомості більш прозорим.

Дослідження у статті [3] зосереджено на головних труднощах застосування ГІС-технологій у кадастрі та для оцінювання нерухомості. Автори визначають, що для побудови ефективної системи оцінювання потрібно формалізувати взаємодію об'єктів із міським і ринковим середовищем, а також оптимізувати збір і аналіз фінансових даних.

Автор публікації [4] доводить, що створення ГІС для оцінювання нерухомості потребує формалізації просторових взаємозв'язків об'єкта з урбаністичним середовищем.

Наукові результати, наведені у працях [5, 6], мають значний потенціал для

впровадження у сферу масового оцінювання об'єктів нерухомості в населених пунктах різного типу. Автор зазначає, що важливим етапом у цьому процесі є розроблення спеціалізованого геоінформаційного ресурсу – геокодованого адресного реєстру населеного пункту, який має форму структурованої бази даних, що містить інформацію про вулиці, номери будинків і координати їхніх центрів, що забезпечує точне просторове позиціонування кожної адреси. Наявність структурованого геокодованого адресного реєстру створює передумови для підвищення точності та ефективності масового оцінювання нерухомості в рамках ГІС-технологій.

У статті [7] зазначено роль ГІС як життєво важливої основи для оцінювання нерухомості. Автори доводять, що, інтегруючи ГІС з гедоністичними моделями, штучним інтелектом і математичними моделями оцінювання, зацікавлені сторони можуть зменшити суб'єктивність і підвищити точність оцінювання нерухомості. Така інтеграція підтримує справедливу практику оцінки та сприяє сталому розвитку міст в умовах різних суспільних викликів.

У роботі [8] подано систему обробки даних для оцінювання нерухомості на основі ГІС, інтегруючи просторові та прикладні бази даних. Вона генерує альтернативний список громад і отримує інформацію про нерухомість на основі вибраних громад. Система оцінює, використовуючи атрибутивні дані як з оцінюваних об'єктів нерухомості, так і зразків нерухомості, забезпечуючи користувачам наочний та об'єктивний набір зразків. Автори зазначають, що такий підхід підвищує точність і надійність оцінювання нерухомості завдяки комплексній обробці геоінформації, що збільшує ефективність завдяки можливості швидкого моделювання сценаріїв, візуалізації ринкових тенденцій і скорочення часу на збір та обробку інформації.

У статті [9] зазначено, що ГІС слугує технологічним інструментом для

вдосконалення практики оцінювання нерухомості шляхом підвищення точності та ефективності. Автори підкреслюють підвищення точності за рахунок інтеграції просторових даних (топографія, інфраструктура, зонування), аналізу сусідства та врахування факторів доступності.

Дослідження [10] поєднує географічні інформаційні системи (ГІС) із методом аналізу ієрархій для покращення оцінювання нерухомості. ГІС допомагає проводити просторовий аналіз атрибутів розташування, таких як близькість до шкіл, торгових центрів і транспортних мереж, тоді як метод аналізу ієрархій – структурувати і визначити пріоритети різних критеріїв, що впливають на вартість нерухомості. Автор зазначає, що таке поєднання сприяє більш точному, ефективному та об'єктивному оцінюванню вартості нерухомості.

У роботі [11] досліджено необхідність і доцільність застосування геоінформаційної системи (ГІС) до системи оцінювання нерухомості, а також висунуто основні функції модуля ГІС системи оцінювання нерухомості.

Автори праці [12] пропонують використовувати інструменти обробки даних ГІС для розрахунку додаткових параметрів нерухомості, необхідних для оцінювання, зокрема буферну функцію, що належить до канону просторового аналізу, яка допомагає визначити відстань об'єкта нерухомості до інших об'єктів, а також функції з галузі аналізу географічних мереж, що допомагають розраховувати найкоротші шляхи.

У дослідженні [13] вивчено використання геопросторових інформаційних систем (ГІС) для покращення оцінювання нерухомості, виділено чотири теми: візуалізація даних, масове оцінювання, хмарні системи та прогнозування цін, із наслідками для практики оцінювання нерухомості та майбутніх досліджень.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета цієї роботи полягає в наданні розробленої геоінформаційної

основи для оцінювання нерухомості та її можливостей.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення поставленого завдання вибрано програмне забезпечення QGIS, яке є відкритим і забезпечує багатий набір засобів для роботи з геопросторовими даними, включаючи їх створення, редагування, візуалізацію та аналіз.

Для роботи було створено базу даних об'єктів нерухомості на території міста Харків, дані про які отримано на сайті «Ріелтори Харкова» (<https://rieltor.ua/harkov/>). База створена у програмному забезпеченні MS Excel із метою подальшої її трансформації до атрибутивної таблиці бази даних проєкту. При цьому було враховано такі особливості об'єктів нерухомості, як район міста, адреса, тип: житлова або комерційна площа, поверховість будівлі, кількість кімнат, поверх розташування, наявність станції метро, вартість продажу або оренди, стан і додаткова інформація про умови оренди та особливості будівлі. Загалом вибрано 80 житлових приміщень, пропонувані для оренди.

У роботі для картування локацій, зазначених в оголошеннях про оренду нерухомості, використано геокодувальний сервіс Nominatim 5.2.0, який відсутній у репозиторії QGIS, і відповідно був встановлений додатково.

Геоприв'язку об'єктів нерухомості виконано за їхніми адресами, результати подано на рис. 1.

Отже, до геобазу додано точні координати об'єктів нерухомості.

Також у проєкт додано такі шари інфраструктури: магазини, школи, дитячі садки, лікарні, парки, аптеки, станції метро, зупинки міського транспорту.

За отриманою геоінформаційною основою проаналізовано просторовий розподіл вартості оренди об'єктів нерухомості (рис. 2).

Із рис. 2 випливає, що найбільша вартість об'єктів, пропонувані в оренду, зосереджена у двох основних зонах: центральній частині Шевченківського району, що безпосередньо примикає до історичного центру міста, і віддаленій частині Салтівського району з високою щільністю багатоповерхової житлової забудови та розвинутою інфраструктурою. Такий розподіл демонструє полярність у географії орендного ринку, з одного боку, престижні центральні квартали, з іншого – розвиненість інфраструктури в густонаселених районах.

Також проаналізовано зв'язок вартості оренди і транспортної доступності. На рис. 3 наведено розподіл вартості відносно станцій метро.

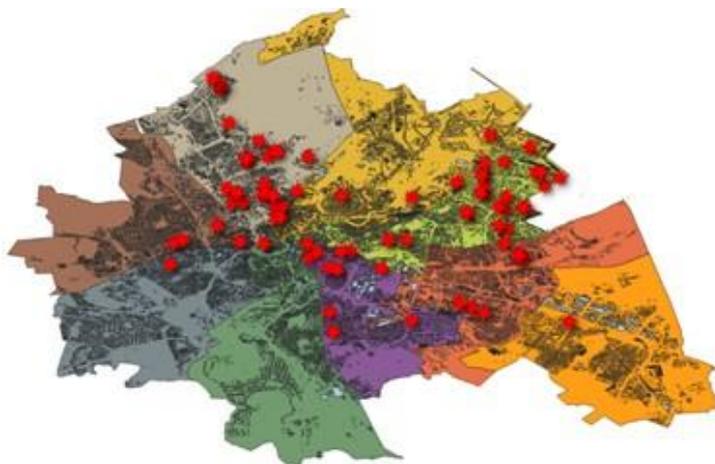


Рис. 1. Результати геоприв'язки

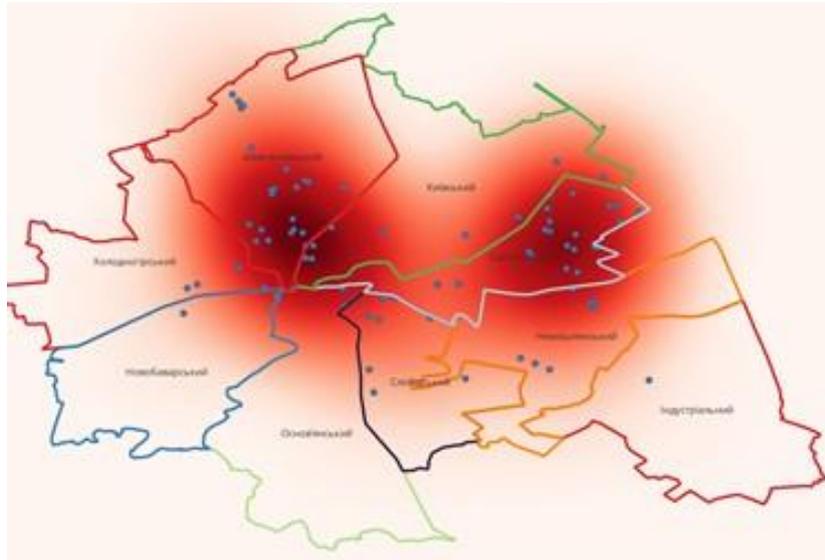


Рис. 2. Розподіл за щільністю пропозицій

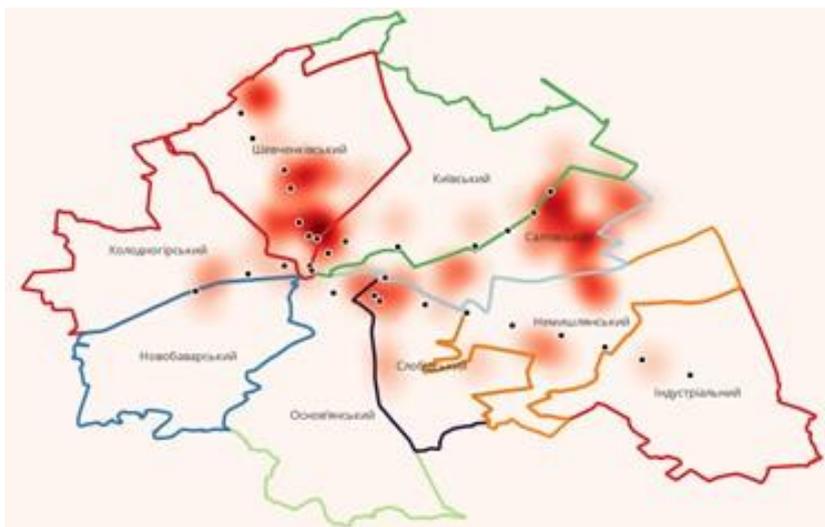


Рис. 3. Залежність вартості оренди від доступності метрополітену

На рис. 3 чітко прослідковується залежність між вартістю оренди нерухомості та відстанню до станцій метро. Найвищі ціни спостерігають у безпосередній близькості до підземки. Однак у Шевченківському та Солов'янському районах, незважаючи на відсутність метрополітену, сформовані значні за

площею зони з високими орендними ставками. Це свідчить про наявність інших важливих факторів, що впливають на вартість. Для з'ясування причин такої динаміки проаналізовано розвиток мережі наземного громадського транспорту в цих районах (рис. 4).



геокодованих реєстрів нерухомості, поглиблене використання аналітики на основі штучного інтелекту і розроблення

відкритих геопорталів для загального доступу до даних.

### Список використаних джерел

1. Кобзан, С., Поморцева О. Дослідження ринку нерухомості за допомогою ГІС. *Тенденції та перспективи розвитку. Збірник наукових праць ЛОГОΣ*. Грудень 2021. doi:10.36074/logos-10.12.2021.v3.48.
2. Лященко А., Мамедов З. Тенденції розвитку геоінформаційного забезпечення оцінювання нерухомості. *Містобудування та територіальне планування*. Березень 2024. Вип. 85. С. 365-83. doi:10.32347/2076-815x.2024.85.365-383.
3. Губар Ю. П., Хавар Ю. С., Сай В. М., Винарчик Л. В. Застосування геоінформаційних технологій для кадастру та оцінки. *Молодий вчений*. 2017. № 3. С. 714-720. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv\\_2017\\_3\\_167](http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2017_3_167).
4. Губар Ю. Застосування проблемно-орієнтованих ГІС-технологій для цілей кадастрової оцінки нерухомості. *Геодезія, картографія та аерофотознімання. Міжвідомчий наук.-техн. зб.* 2013. № 78 С. 192-200.
5. Лященко А. А. Архітектура адаптивної геоінформаційної системи для грошової оцінки земель населених пунктів. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2001. № 10. С. 76–82.
6. Лященко А. А., Карпінський Ю. О. Геоінформаційні технології грошової оцінки земель населених пунктів. *Геоінформаційне системи і муніципальне управління. Збірник наукових праць до міжнародної науково-практичної конференції*. Миколаїв: Мф НаУКМА, 2000. С. 53–60.
7. Droj Gabriela et al. A Comprehensive Overview Regarding the Impact of GIS on Property Valuation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. May 2024. Vol. 13, No. 6. P. 175. doi:10.3390/ijgi13060175.
8. Dengqiang Lu et al. GIS (Geographic Information System) Real Estate Valuation Based Data Processing System and Method. 1 Oct. 2014.
9. Ayedun Caleb Abiodun, et al. Geographical Information System (GIS) Application to Property Valuation Practices in Port Harcourt Metropolis of Rivers State, Nigeria. *Journal of International Cooperation and Development*. May 2022. Vol. 5, No. 1. P. 19, doi:10.36941/jicd-2022-0002.
10. Yalpir Sukran. Forecasting Residential Real Estate Values with Ahp Method and Integrated Gis. Jan. 2014. URL: [https://www.fce.vutbr.cz/ekr/pbe/Proceedings/2014/070\\_14309.pdf](https://www.fce.vutbr.cz/ekr/pbe/Proceedings/2014/070_14309.pdf).
11. Yang Jian Ping and Qing Bai. Research of Real Estate Appraisal Based on GIS Technology. *Advanced Materials Research*. Dec. 2013. Vol. 859. P. 562–65. doi:10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.859.562.
12. Parzych Piotr. Application of Geographic Information Systems for Real Estate Valuation Support. Jan. 2008.
13. Saraf Mohamad Haizam Mohamed et al. The Use of Geospatial Information System for an Enhanced Property Valuation Process. 2024. doi:10.24191/jcrinn.v9i2.457.

---

Воронков Олексій Олександрович, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6905-0098>. Тел.: +38(067)276-85-06. E-mail: voronkov.oleksii@kname.edu.ua.

---

Євдокімов Андрій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7538-8922>. Тел.: +38(097)530-68-22.  
E-mail: Andriy.Evdokimov@kname.edu.ua.

Voronkov Oleksii, PhD (in Economics), Associate Professor, Associate Professor of the department of land administration and geoinformation systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6905-0098>. Тел.: +38(067)276-85-06.  
E-mail: voronkov.oleksii@kname.edu.ua.

Yevdokimov Andrii, PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the department of land administration and geoinformation systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7538-8922>. Тел.: +38(097)530-68-22.  
E-mail: Andriy.Evdokimov@kname.edu.ua.

Статтю прийнято 15.12.2025 р.

## ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

---

УДК 629.4.083:629.45

### ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У КОНСТРУКЦІЇ СУЧАСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Кандидати техн. наук А. О. Каграманян, В. В. Бондаренко,  
асп. О. А. Жерновенков

### APPLICATION OF ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES IN THE DESIGN OF MODERN RAILWAY ROLLING STOCK

PhD (Tech.) A. O. Kagramanian, PhD (Tech.) V. V. Bondarenko,  
PhD student O. A. Zernovenkov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351618>

***Анотація.** У статті досліджено перспективи використання сучасних літій-іонних акумуляторних батарей у системі енергопостачання пасажирських вагонів. Проаналізовано можливість заміни традиційних нікель-кадмієвих, нікель-залізних і свинцево-кислотних акумуляторних батарей вагонів на перспективні літій-іонні (Li-ion) батареї. Нові акумулятори мають меншу масу, вищу питому енергоємність, підвищену безпеку та довший термін служби. Отримані результати підтверджують перспективність застосування енергоефективних технологій для сучасного рухомого складу залізниць.*

***Ключові слова:** пасажирський вагон, електричне обладнання, акумуляторна батарея, енергопостачання, енергоефективність, літій-іонні батареї.*

***Abstract.** The article examines the feasibility of introducing modern lithium-ion battery technologies into the power supply systems of passenger railway cars. The rapid growth of energy consumption in railway vehicles, associated with the integration of advanced diagnostic devices, information systems, and passenger comfort equipment, has significantly increased the requirements for onboard energy storage. Traditionally, passenger cars have been equipped with lead-acid, nickel-cadmium, or nickel-iron batteries, which are reliable but heavy, have limited capacity, and require regular maintenance. Their large mass and dimensions negatively affect operational efficiency and limit the modernization potential of railway rolling stock. The study focuses on replacing these conventional solutions with lithium-ion batteries, particularly lithium iron phosphate (LiFePO<sub>4</sub>, LFP), which are widely used in electric vehicles, buses, and stationary energy storage systems. The methodological approach is based on technical calculations of capacity, voltage, number of cells, and overall weight of battery packs. The comparison demonstrates that LFP batteries can provide the same electrical performance while reducing the total mass of the battery system by approximately 1.3 tons. This reduction represents nearly a sevenfold decrease in mass, which is critical for railway operations, as it improves energy efficiency and reduces infrastructure load. In addition to weight reduction, LFP batteries offer enhanced safety due to their thermal stability, non-toxic composition, and resistance to combustion compared with Ni-Cd systems. They also provide longer service life, lower maintenance requirements, and competitive cost per kilowatt-hour, especially in comparison with nickel-based batteries. However, the study also identifies certain limitations, including higher*

*initial investment, mandatory use of a battery management system, reduced performance at low temperatures, and the need for a more developed recycling infrastructure. The results confirm that the implementation of lithium iron phosphate batteries in passenger railway cars is both technically and economically justified. Their application offers an optimal balance between mass, safety, durability, and energy efficiency, making them a promising alternative to traditional solutions and a significant step toward modernizing the energy supply systems of railway rolling stock.*

**Keywords:** *passenger car, electrical equipment, battery, power supply, energy efficiency, lithium-ion batteries.*

**Вступ.** Сучасний суцільнометалевий пасажирський вагон являє собою складну інженерну конструкцію з комплексом механічних, електронних та електричних систем. Однією зі складних і відповідальних систем вагона є електрообладнання. Електричне обладнання, що застосовано в пасажирських вагонах, використовують для створення необхідних комфортних умов для пасажирів, приготування та зберігання їжі у вагонах-ресторанах, радіомовлення та роботи пристроїв зв'язку, полегшення праці поїзної бригади та гарантування безпеки руху поїздів. Постійне удосконалення електрообладнання, яке пов'язане з підвищенням безпеки руху та комфортних умов пасажирів, призвело до збільшення кількості споживачів електроенергії та ускладнення систем регулювання, контролю, захисту та сигналізації пасажирських вагонів. Встановлене у вагоні електрообладнання повинно мати якомога меншу масу та габаритні розміри, оскільки ці параметри впливають на економічні показники роботи рухомого складу. Особливо жорсткі вимоги висувають щодо ваги та розмірів електрообладнання, встановленого під вагоном, оскільки це обладнання має вписуватися в габаритні розміри рухомого складу, а велика маса підвагонного обладнання безпосередньо впливає на динамічні показники вагона та витрати палива локомотивом. У той же час акумуляторні батареї, що використовують для енергозабезпечення пасажирських вагонів, відрізняються найбільш високими масогабаритними характеристиками серед іншого електричного обладнання. У зв'язку з цим у роботі розглянуто можливість

заміни традиційних нікель-кадмієвих (Ni-Cd), нікель-залізних (Ni-Fe) і свинцево-кислотних (SLA) акумуляторних батарей вагонів на літій-іонні (Li-ion) батареї, які мають меншу масу, вищу питому енергоємність, підвищену безпеку та довший термін служби.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ефективність роботи залізничного транспорту визначають безпека, регулярність і собівартість перевезень, що переважно залежить від конструкції та технічного стану рухомого складу. Через це пріоритетними завданнями є впровадження сучасних і надійних систем електрообладнання пасажирських вагонів [8], модернізація гальмових систем [4, 12] і ходових частин [3, 10, 11], прогнозування технічного стану вузлів [7, 14] та ін., що сприяє підвищенню надійності та ефективності експлуатації поїздів. Зараз в АТ «Укрзалізниця» експлуатують вагони чотирьох типів: вагони пасажирські відкритого типу, спальні, купейні та міжобласні/денні. Найбільшу питому вагу у структурі парку пасажирських вагонів займають вагони відкритого типу (ЦМО – 32,96 %); купейні (ЦМК – 31,76 %), спальні (СВ – 4,32 %) [1].

Пасажирський вагон являє собою складну інженерну конструкцію, однією зі складних і відповідальних систем якої є система електрообладнання, різнотипне та складне за своєю будовою. У результаті розвитку конструкцій пасажирських вагонів і їхнього електричного обладнання на сьогодні є такі основні системи енергозабезпечення: автономні, змішані, централізовані [2]. Конструкції вагонів

постійно удосконалюють, модернізують обладнання, ускладнюють системи контролю, діагностики, моніторингу [6, 11] і методи аналізу і пошуку несправностей [5, 9], збільшується маса та потужність електричних споживачів вагонів. Акумуляторні батареї, які використовують у системах електрообладнання пасажирських вагонів, виконують важливі функції живлення електричною енергією основних споживачів (на зупинках, у пунктах формування та обороту, під час невеликої

швидкості руху); живлення кіл, що не вимикають; сприймають пікові навантаження; живлять котушки контакторів кіл високої напруги, використовують як резервне та аварійне джерело електричної енергії.

У пасажирських вагонах зараз застосовують лужні акумуляторні батареї (40(84)ВНЖ-300П-У2, 40(84)ТНЖ-300-У2, 40(90)KL(КМ)300Р та ін.) і свинцево-кислотні (із гелевим електролітом 13(28) L04 300G та ін.) (рис. 1).



Рис. 1. Розташування типових свинцево-кислотних акумуляторів типу 28L 04 300G у підвагонному акумуляторному ящику

Незважаючи на прогрес у характеристиках існуючих вагонних акумуляторних батарей, вони мають обмеження за ємністю, велику масу (близько 1500 кг) і габарити. Акумуляторні батареї також займають значну частину підвагонного простору. У зв'язку з цим важливими завданнями для застосування вагонних акумуляторів є пошук шляхів зниження їхньої маси та габаритів, забезпечення нечутливості відносно різних режимів експлуатації, мінімізація операцій технічного обслуговування акумуляторів та ін. Також важливим є пошук і впровадження нових і сучасних видів акумуляторних батарей.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є теоретичне обґрунтування можливості та доцільності застосування літій-іонних акумуляторних батарей для енергозабезпечення пасажирських вагонів. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати і вибрати перспективні та оптимальні типи

акумуляторних батарей для пасажирських вагонів; визначити кількість модулів, ємність і масу нової акумуляторної батареї пасажирського вагона.

**Основна частина дослідження.** Для дослідження питання в цілому розглянуто світові тенденції у сфері транспорту, де за останні роки значного розвитку і поширення набули літій-іонні (Li-ion) акумуляторні батареї. Найпотужніші з них застосовують як основні джерела живлення в електробусах, електричних вантажівках, навіть на поромках. Але найбільшого розповсюдження літій-іонні акумуляторні батареї дістали як основне джерело живлення в електричних і гібридних автомобілях [15].

У статті розглянуто підхід, за якого літій-іонні акумуляторні батареї високої питомої енергоємності використовують як джерело живлення в типових (традиційних) системах енергозабезпечення вагонів. За такого підходу штатну акумуляторну

батарею вагона замінюють на перспективну літій-іонну батарею зі збереженням стандартної енергоємності та напруги. Зарядження батареї відбувається традиційно під час руху вагона від генератора та в пунктах формування та обороту від зовнішньої мережі. На електрифікованій залізничній лінії літій-іонні батареї можуть заряджатися централізовано від електровоза через вагонний перетворювач.

Обґрунтовували вибір перспективної та оптимальної конструкції акумуляторної батареї для енергозабезпечення пасажирських вагонів за такими характеристиками та параметрами: питома енергоємність, масогабаритні параметри, стійкість до умов експлуатації, термін служби, модульність конструкції, вартість, безпечність експлуатації.

На сьогодні найбільш поширені такі літій-іонні батареї: літій-залізо-фосфатні LFP ( $\text{LiFePO}_4$ ), нікель-марганець-кобальтові NMC ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ), нікель-кобальт-алюмінієві NCA ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ), літій-кобальт-оксидні LCO ( $\text{LiCoO}_2$ ), літій-марганцево-оксидні LMO ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), літій-титанатні LTO ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ). Для пасажирських вагонів вибрано батареї LFP ( $\text{LiFePO}_4$ ) завдяки їхній безпеці, довговічності та стійкості до температур. Їх також використовують в електробусах, на залізничному транспорті, у системах для зберігання енергії.

Основні переваги LFP ( $\text{LiFePO}_4$ ) батарей:

- безпека – найбезпечніший тип літій-іонних батарей, що не перегріваються і не горять;
- довговічність – термін служби більш 5000 циклів, що у два-три рази більше, ніж у NMC/NCA батарей;
- стійкість до температур – ефективно працюють у діапазоні від  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  до  $+60\text{ }^\circ\text{C}$ , не втрачаючи своїх характеристик;
- екологічність – не містять токсичних металів (таких, як кобальт), що робить їх безпечними для довкілля;

- стабільність і рівень напруги – постійна напруга акумуляторів 3,2 В прийнятна для формування секцій акумуляторних батарей вагона за номінальної напруги в мережі 50 і 110 В;

- енергетична щільність  $90\div 150\text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ . Цей показник нижче, ніж у NMC/NCA, але значно перевищує показник традиційних батарей вагонів: нікель-кадмієві (Ni-Cd)  $40\div 60\text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ , нікель-залізни (Ni-Fe)  $30\div 50\text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ , свинцево-кислотні (SLA)  $30\div 50\text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ .

За форм-фактором (конструкцією) LFP ( $\text{LiFePO}_4$ ) батареї поділяють на циліндричні (32140, 18650, 26650), призматичні (EVE 100Ah, CATL 280Ah, CALB 230Ah), пакетні ( $\text{LiFePO}_4$  20Ah, 50Ah, 100Ah Soft Pack) (рис. 2).

Наведемо методику розрахунку літій-іонної батареї для вагона та порівняємо отримані характеристики і параметри батарей 28L 04 300G і LFP ( $\text{LiFePO}_4$ ) різних типів.

Необхідну ємність літій-іонної батареї для перспективної системи енергозабезпечення вагонів вибрано в межах  $250\div 350\text{ А}\cdot\text{год}$ , як і традиційної батареї, щоб було забезпечено живлення основних споживачів протягом декількох годин перебування вагона в пунктах обороту і відстою; номінальна напруга в мережі 110 В.

Розраховували такі базові параметри, як ємність літій-іонної акумуляторної батареї та потрібна напруга, з орієнтиром на номінальні значення типового акумулятора вагона. Наприклад, для акумулятора 28L 04 300G [16] номінальна ємність  $300\text{ А}\cdot\text{год}$ , номінальна напруга батареї 112 В, кількість акумуляторів у батареї 28 шт., маса одного акумулятора з електролітом 54 кг, маса батареї 1512 кг. Ці дані використовували як базові для розрахунку характеристик літій-іонної батареї. Основні характеристики акумуляторів, що порівнюють, наведені в табл. 1.

а



Акумулятор LFP (LiFePO<sub>4</sub>)  
32140, 20 Ah, 3,2 В

б



Акумулятор LFP (LiFePO<sub>4</sub>)  
EVE LF100 MA 100 Ah, 3,2 В

в



Акумулятор LFP (LiFePO<sub>4</sub>)  
Soft Pack 50 Ah, 3,2 В

Рис. 2. Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LFP):  
циліндричні (а), призматичні (б), пакетні (в)

Таблиця 1

Основні характеристики акумуляторів

Характеристика акумулятора	Тип акумулятора			
	28L 04 300G	32140	EVE	Soft Pack
Номінальна ємність, А*год	300	20	100	50
Номінальна напруга, В	4	3,2	3,2	3,2
Маса одного акумулятора з електролітом, кг	54	0,375	2	1

Визначення кількості послідовно з'єднаних батарей (S):

$$S = \frac{U_{bat}}{U_{ak}}, \quad (1)$$

де  $U_{bat}$  – номінальна напруга акумуляторної батареї (112 В);

$U_{ak}$  – напруга акумулятора (3,2 В).

Кількість послідовно з'єднаних батарей складає 35 одиниць для всіх наведених акумуляторів.

Визначення кількості паралельних рядів (P):

$$P = \frac{Q_{bat}}{Q_{ak}}, \quad (2)$$

де  $Q_{bat}$  – ємність акумуляторної батареї вагона (300 А\*год);

$Q_{ak}$  – ємність акумулятора, А\*год.

Отримаємо кількість паралельних рядів 15, 3 та 6 відповідно для циліндричних, призматичних і пакетних акумуляторів.

Визначення загальної кількості осередків для кожного типу батареї:

$$N_{total} = S \cdot P. \quad (3)$$

**Результати дослідження.** Результати розрахунку параметрів акумуляторної батареї, отримані за наведеною вище методикою, подані в табл. 2.

Проведені розрахунки та порівняння показали, що заміна традиційних акумуляторних батарей типу SLA, Ni-Cd і Ni-Fe на літій-залізо-фосфатні (LiFePO<sub>4</sub>, LFP) є технічно та економічно доцільною.

Результати розрахунку параметрів батареї з різними акумуляторами

Тип батареї	Напруга, В	Ємність, А*год	Кількість акумуляторів	Маса, кг
28L 04 300G	112	300	28	1512
Циліндричні 32140	112	300	525	197
Призматичні EVE	112	300	105	210
Пакетні Soft Pack	112	300	210	210

Основні переваги LFP:

- зменшення маси батарейного комплексу приблизно на 1,3 т (шість-сім разів) зі збереженням ємності та напруги (112 В, 300 А·год);

- підвищення питомої енергоемності та збільшення терміну служби у два-три рази порівняно зі SLA;

- вища безпека експлуатації завдяки термічній стабільності та відсутності токсичних компонентів (на відміну від Ni-Cd).

Разом із тим застосування LFP має низку обмежень:

- більша початкова вартість (у два-три рази вища, ніж у SLA, і в півтора-два рази вища за Ni-Cd та Ni-Fe);

- потреба в системі керування (BMS), що підвищує складність конструкції;

- зниження ефективності роботи за низьких температур, що потребує додаткових систем підігріву;

- менш розвинена інфраструктура утилізації порівняно зі свинцево-кислотними батареями.

Концепція систем енергозабезпечення вагонів з літій-іонними батареями добре узгоджена з технологіями відновлюваної енергетики, що отримали значний розвиток за останній час. Однією з таких технологій на залізничному транспорті є використання сонячних панелей на даху вагонів як

додаткове джерело електричної енергії, детально про цей спосіб енергозабезпечення наведено в патенті [17].

Отже, використання LFP у пасажирських вагонах є доцільним і перспективним, особливо у проєктах модернізації та нового будівництва рухомого складу, де критично важливими є зниження маси підвагонного обладнання, підвищення енергоефективності та безпеки. При цьому доцільно враховувати експлуатаційні обмеження й передбачати системи управління та температурного контролю батарей.

**Висновки.** Використання літій-іонних акумуляторних батарей типу LFP ( $\text{LiFePO}_4$ ) дає змогу зменшити масу акумуляторного комплексу пасажирського вагона приблизно на 1300 кг порівняно з традиційними нікель-кадмієвими (Ni-Cd), нікель-залізними (Ni-Fe) і свинцево-кислотними (SLA) батареями. При цьому забезпечена незмінна номінальна напруга та ємність. Проведені розрахунки підтверджують доцільність застосування LFP-батарей у пасажирських вагонах як ефективнішої та безпечнішої альтернативи традиційним аналогам з урахуванням необхідності використання системи керування (BMS) і забезпечення роботи за низьких температур.

### Список використаних джерел

1. Лупітько Н. В., Сладких І. В. Дослідження сучасного стану інвентарного парку пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця». *Рейковий рухомий склад: зб. наук. праць*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ». 2020. Вип. 21. С. 28-43.

2. Бондаренко В. В., Обуховський В. В., Шатаєв В. М. Електричне обладнання вагонів: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2016. 258 с.
3. Ravlyuk V. G. The definition of a technical condition of axle-box bearings rolling stock of vibrodiagnostics. *Eastern European journal of advanced technologies*. 2015. Iss. 2/7 (74). P. 11–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39036>.
4. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V. & Dižo J. Prediction of Residual Wear Resources of Composite Brake Pads of a Modernized Brake System of Freight Wagons. *Vehicles*. 2024. Vol. 6(4). P. 1975–1994. <https://doi.org/10.3390/vehicles6040097>.
5. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Hrebenuk, V., Bondarenko, V. Process features and parametric assessment of the emergence of the excessive wear for the brake pads of freight car bogies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708 (012025). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012025>.
6. Ravluk V., Derevianchuk Y., Derevyanchuk O., Krychun A. & Kravchenko H. Investigation of the statistical data on the technical condition of brake equipment components of passenger carriages in operation. *Edelweiss Applied Science and Technology*. 2024. Vol. 8(6). P. 5957–5970. <https://doi.org/10.55214/25768484.v8i6.3292>.
7. Ravlyuk V. H., Mykhalkiv S. V., Rybin A. V., Derevianchuk Ia. V., Plakhtiy O. A. Forecasting of wear of pads of modernized brake system devices of bogies of freight cars using ARIMA models. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 6. P. 48–54. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/048>.
8. Теоретичні основи оцінювання проєктної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів / В. В. Бондаренко, Р. І. Візняк, Д. І. Скуріхін та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків: УкрДУЗТ, 2024. № 4. С. 55-62. <https://doi.org/10.18664/iksz.v29i4.320395>.
9. Діагностування електронного обладнання пасажирських вагонів з урахуванням надійності його компонентів / В. В. Бондаренко, Р. І. Візняк, В. Г. Равлюк та ін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2025. № 211. С. 172-181. URL: [https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht\\_zbirn\\_211.pdf](https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_211.pdf).
10. Martynov I., Bondarenko V., Skurikhin D. Mathematical modeling of oscillations wheelset as the basis of the method of acoustic control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. № 7. P. 22-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.20088.
11. Bondarenko V. V., Skurikhin D. I., Vizniak R. I., Ravlyuk V. H., Skurikhin V. I. Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 4. P. 30–36. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/7>.
12. Ravlyuk V., Ravliuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. TRANSBUD-2019*. С. 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026>.
13. Development of a Procedure for Determining the Pre-Failure Condition of the Axle Boxes of Railway Rolling Stock / Martynov I., Gerlici J., Trufanova A., Petuhov V., Shovkun V., Kravchenko K. *Komunikácie - vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline*. 2022. 24(1). P. B87-B93. DOI: 10.26552/com.C.2022.1.B87-B93.
14. Пасажирські вагони. Діагностування. Залишковий ресурс. Надійність: монографія / Ю. Я. Водянніков, А. О. Сулим, П. О. Хозя та ін. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2023. 69 с.
15. Bondarenko V., Skurikhin D., Wojciechowski J. The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development. *Smart and Green Solutions for Transport Systems: 16th Scientific and Technical Conference «Transport*

*Systems. Theory and Practice 2019» Selected Papers.-Katowice: Springer International Publishing. 2020. P. 114-125. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35543-2\\_](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35543-2_).*

16. Акумуляторні батареї пасажирських вагонів. Інструкція з ремонту. ЦЛ-0086. Укрзалізниця. № 071-Ц (2012).

17. Спосіб альтернативного енергозабезпечення вагонів рейкового рухомого складу від фотоелектричної системи: пат. 101017 Україна: а 201033363; заявл. 17.09.2010; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. 5 с.

---

Каграманян Артур Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD:0000-0003-3520-4911. Тел.: +38(057)730-10-05. E-mail: kartal@kart.edu.ua.

Бондаренко В'ячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017.

Тел.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Жерновенков Олексій Андрійович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-1477-5141. Тел.: +38 (050) 402-41-22.

E-mail: shernovenkov\_phd@kart.edu.ua.

Kagramanian Artur, PhD (Tech), Associate Professor, department of thermal engineering, heat engines and energy management, Ukrainian State University of Railway Transport . ORCID iD: 0000-0003-3520-4911.

Tel.: +38(057)730-10-05. E-mail: kartal@kart.edu.ua.

Bondarenko Viacheslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Tel.: +38 (057) 730-10-35.

E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Zhernovenkov Oleksii, Postgraduate Student, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-1477-5141. Tel.: +38 (050) 402-41-22.

E-mail: shernovenkov\_phd@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.

**УДК 629.42**

## **МОДЕЛЮВАННЯ ДООПРАЦЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ЛОКОМОТИВІВ**

**Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, канд. техн. наук О. О. Шапатіна,  
асп. К. С. Бондаренко**

## **MODELING REFINEMENT OF LOCOMOTIVE EQUIPMENT**

**D.Sc. (Tech.) O. Krashenin, PhD (Tech.) O. Shapatina,  
postgraduate student K. Bondarenko**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351759>

***Анотація.** Зі створенням нових зразків локомотивної техніки виникає необхідність проведення комплексу заходів, пов'язаних із доведенням їх до необхідних вимог щодо забезпечення надійності. Причина цього полягає в конструкторському і технологічному недоопрацюванні окремого обладнання локомотивів, що призводить до появи джерел відмов. У статті розглянуто декілька методичних підходів, що спрямовані на усунення причин відмов і, відповідно, підвищення надійності локомотивного обладнання за рахунок їх доопрацювання.*

---

**Ключові слова:** випробування, джерело відмов, доопрацювання, імовірність безвідмовної роботи, локомотив, надійність, обладнання.

**Abstract.** *When creating new models of locomotive equipment, it becomes necessary to implement a set of measures to bring them into compliance with the required reliability standards. This is due to design and manufacturing deficiencies in individual locomotive components, which introduce sources of failure. Accordingly, this paper examines several methodological approaches aimed at eliminating the causes of failures and, consequently, improving the reliability of locomotive equipment through a refinement process. Specifically, during the experimental refinement phase, equipment prototypes undergo numerous modifications to eliminate design and manufacturing deficiencies. The primary information guiding this refinement process is obtained experimentally from the results of additional tests. The main reason necessitating the testing and refinement of newly developed equipment is the presence of failure sources in the initial product, namely: design shortcomings and manufacturing defects. Existing models for ensuring reliability growth are based on two approaches. In the first approach, a specific curve is selected to model the reliability growth trend, and its parameters are then estimated using experimental results. In the second approach, the identification of the reliability growth trend is preceded by an analysis of the stochastic mechanism of the manifestation and elimination of failure sources. From this analysis, reliability growth equations are derived, and only then are the parameters of the reliability growth model estimated. This second approach enables an a priori analysis of the equipment's reliability improvement process. Therefore, based on the analyzed mathematical methods for solving the problems of locomotive equipment refinement across several implementation variants of reliability growth curves, this paper develops an algorithm for the calculation and optimization of the parameters of the equipment refinement model. Furthermore, calculations are presented to determine the probability of failure-free operation of the locomotive equipment for a range of these reliability growth curve implementations.*

**Keywords:** *equipment, failure sources, locomotive, probability of failure-free operation, refinement, reliability, testing.*

**Вступ.** У залізничній галузі за останні роки виникло багато невідкладних завдань на тлі зовнішнього втручання в політичне та економічне життя країни фактора воєнних дій. Українська промисловість втратила велику кількість промислових підприємств, ресурсів і територій. Флагмани локомотивобудування в Україні були захоплені або зруйновані.

Ремонтна інфраструктура, яка і раніше перебувала в глибокій стагнації, неспроможна повною мірою реагувати на ці виклики [1]. Навіть сучасний рухомий склад закордонного виробництва, експлуатований на залізницях України, досить складно підтримувати в працездатному стані.

Водночас, як показав досвід експлуатації закордонного рухомого складу, необхідно застосовувати науково-

обґрунтовану політику з утримання всіх засобів транспорту і їхнього обладнання. Це стосується і можливості використання математичних методів щодо реалізації стратегії проведення випробувальних (доводочних) робіт для обладнання, що використовують на тяговому рухомому складі. Усе це визначає актуальність моделювання процедури доопрацювання окремого обладнання локомотивів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемам підвищення надійності в теоретичному аспекті присвячені фундаментальні праці, зокрема Б. Гнеденка [2], роботи закордонних і вітчизняних учених [3—5]. У них розкрито проблеми забезпечення надійності технічних об'єктів у різних галузях промисловості [6—8]. Крім того, широкого

розвитку набули роботи наукового і прикладного напрямів з удосконалення системи ТО, ПР ТРС [9, 10], присвячені оптимізації стратегії і тактики ТО, ПР ТРС. Характерною рисою цих досліджень є застосування математичних методів, таких як теорії ймовірності і математичної статистики, масового обслуговування, методи динамічного і лінійного програмування, теорія надійності [5]. Низка досліджень присвячена оптимізації витрат на утримання ТРС за життєвий цикл [9].

Пришло розуміння необхідності удосконалення системи ТО, ПР ТРС за рахунок широкого запровадження засобів і технологій оцінювання технічного стану обладнання ТРС за рахунок використання діагностичних приладів і комплексів, створення АСУ надійністю ТРС, переходу на сервіс ТРС [9, 10].

Однак методики підвищення надійності локомотивного обладнання були прерогативою локомотивобудівельних заводів і випробувальних полігонів ТРС [9].

**Мета та завдання дослідження.** Мета статті полягає в дослідженні підходів для моделювання процедури доопрацювання локомотивного обладнання. З урахуванням цього поставлені такі завдання:

1. Проаналізувати математичні підходи щодо проблеми доопрацювання локомотивного обладнання.

2. Розробити алгоритм розрахунку і оптимізації параметрів моделі доопрацювання локомотивного обладнання.

3. Виконати розрахунки з визначення ймовірності безвідмовної роботи (ІБР) локомотивного обладнання.

**Основна частина дослідження.** У процесі експериментального доопрацювання дослідні зразки обладнання локомотивів зазвичай зазнають численних змін для усунення конструкторських і технологічних недоопрацювань. Основу та інформацію для доопрацювання здобувають експериментально в результаті проведення додаткових випробувань. Головною причиною, що призводить до необхідності

випробовувати і доопрацьовувати розроблене обладнання, є наявність у недоопрацьованому виробі джерел відмов (ДВ): недоліків проектування і дефектів технології виготовлення.

Існуючі моделі із забезпечення зростання ІБР підпорядковані двом підходам. У першому підході для моделювання тенденції зростання ІБР підбирають деяку криву і далі, використовуючи результати експериментів, оцінюють параметри цієї кривої. У другому підході виявленню тенденції зростання ІБР передують аналіз випадкового механізму прояву і усунення джерел відмов, виводять рівняння зростання ІБР, а потім уже оцінюють параметри моделі зростання надійності. Другий підхід дає змогу провести апріорний аналіз процесу підвищення надійності обладнання.

Розглянемо гіперболічну криву зростання ІБР обладнання або досягнення успіху для доопрацювання обладнання. У цій моделі зростання ІБР обладнання розглядають експериментальне доопрацювання, що складається з  $l$  етапів.

На кожному  $j$ -му етапі ( $j = \overline{1, l}$ ) проводять  $n_j$  випробувань, за результатами яких доопрацьовують обладнання для усунення причин відмов. Як рівняння гіперболічної кривої зростання ІБР використовують залежність вигляду [5, 9]

$$P_j = P_\infty - \frac{a}{j^c}, \quad j = \overline{1, l}, \quad (1)$$

де  $P_j$  — імовірність успіху в одному випробуванні на  $j$ -му етапі;

$P_\infty$  — гранично досягнена імовірність успіху для  $j \rightarrow \infty$ ;

$a, c$  — параметри моделі (можливості підвищення надійності за рахунок доопрацювання).

Оцінки  $\hat{P}_\infty$  і  $\hat{a}$  можна отримати методом найменших квадратів (МНК) за формулами [5]

$$\hat{a} = \frac{\varphi \sum_{j=1}^l \frac{m_j}{n_j} - l \sum_{j=1}^l \frac{1}{j^c} \cdot \frac{m_j}{n_j}}{l\varphi - \varphi^2}, \quad (2)$$

$$\hat{p}_\infty = \frac{\psi \sum_{j=1}^l \frac{m_j}{n_j} - l \sum_{j=1}^l \frac{1}{j^c} \cdot \frac{m_j}{n_j}}{l\psi - \varphi^2}, \quad (3)$$

де  $n_j$  — кількість випробувань на  $j$ -му етапі;  
 $m_j$  — кількість успіхів у  $j$ -й серії випробувань.

Нехай кількість етапів відпрацювань  $l=6$ , за результатами яких отримані такі дані (табл. 1).

Таблиця 1

Вихідні дані

Номер $j$ етапу відпрацювань	Кількість $n_j$ випробувань	Кількість $m_j$ зафіксованих успішних результатів	Частота успіхів $\frac{m_j}{n_j}$
1	12	8	0,67
2	9	7	0,78
3	14	11	0,79
4	33	30	0,91
5	39	37	0,95
6	49	48	0,98

Прийmemo значення  $c=1$ . Параметри  $\varphi$  і  $\psi$  оцінемо за формулами

$$\varphi = \sum_{j=1}^l \frac{1}{j^c}; \quad \psi = \sum_{j=1}^l \frac{1}{j^{2c}}.$$

Розглянемо спочатку випадок, коли  $l=5$ .  
 Тоді

$$\varphi = \sum_{j=1}^5 \frac{1}{j} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} = 2,283;$$

$$\psi = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{4^2} + \frac{1}{5^2} = 1 + 0,25 + 0,111 + 0,0625 + 0,04 = 1,464;$$

$$\sum_{j=1}^5 \frac{m_j}{n_j} = 0,67 + 0,78 + 0,79 + 0,91 + 0,95 = 4,09;$$

$$\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j} \cdot \frac{m_j}{n_j} = 1 \cdot 0,67 + 0,5 \cdot 0,78 + 0,33 \cdot 0,79 + 0,25 \cdot 0,91 + 0,2 \cdot 0,95 = 1,74 ;$$

$$\hat{a} = \frac{2,283 \cdot 4,09 - 5 \cdot 1,74}{5 \cdot 1,464 - (2,283)^2} = \frac{9,334 - 8,672}{7,318 - 5,214} = \frac{0,662}{2,104} = 0,314 ;$$

$$\hat{P}_{\infty} = \frac{1,464 \cdot 4,09 - 2,283 \cdot 1,74}{5 \cdot 1,464 - (2,283)^2} = \frac{5,983 - 3,96}{2,104} = \frac{2,023}{2,104} = 0,961 .$$

За допомогою додаткової інформації на шостому етапі визначимо

$$\varphi = 2,283 + \frac{1}{6} = 2,45 ; \quad \psi = 1,464 + \frac{1}{6^2} = 1,491 ;$$

$$\sum_{j=1}^6 \frac{m_j}{n_j} = 4,09 + 0,98 = 5,1 ;$$

$$\sum_{j=1}^5 \frac{1}{j} \cdot \frac{m_j}{n_j} = 1,74 + 0,98 \cdot 0,167 = 1,74 + 0,17 = 1,91 ;$$

$$\hat{a} = \frac{2,45 \cdot 5,1 - 6 \cdot 1,91}{6 \cdot 1,491 - (2,45)^2} = 0,343 ;$$

$$\hat{P}_{\infty} = \frac{1,491 \cdot 5,1 - 2,45 \cdot 1,91}{6 \cdot 1,491 - (2,45)^2} = 0,9928 .$$

Знайдемо оцінку ІБР обладнання у випробуванні перед проведенням першого доопрацювання:

$$\hat{P}_1 = P_{\infty} - \frac{\hat{a}}{1} = 0,9928 - 0,343 = 0,649 .$$

А для 10 етапів доопрацювання

$$\hat{P}_{10} = 0,9928 - \frac{0,343}{10} = 0,958 .$$

Отже, за рахунок додаткових етапів доопрацювання задача з підвищення ІБР обладнання розв'язана.

Розглянемо зростання ІБР обладнання за експоненційною кривою залежно від

кількості проведених доопрацювань за формулою [5]

$$P_j = P_\infty - (P_\infty - P_0) \exp(-b(j-1)) \quad (4)$$

або

$$P_j = \beta + \beta_1 \cdot c^{j-1} = cP_j + d, \quad (5)$$

де параметри моделі

$$\beta_0 = P_\infty; \quad \beta_1 = P_0 - P_\infty; \quad c = e^{-b}; \quad d = (1-c)P_\infty; \quad P_1 = P_0. \quad (6)$$

Нехай за експериментальними даними відомі параметри експоненційної кривої:  $P_\infty=0,95$ ;  $P_0=0,05$ ;  $b=0,35$ .

Визначимо ІБР для доопрацювання обладнання між десятим та одинадцятим доопрацюваннями:

$$P_{10} = 0,95 - (0,95 - 0,05) \cdot \exp(-0,35 \cdot (10 - 1)) = 0,9114;$$

$$\beta_0 = 0,95; \quad \beta_1 = 0,05 - 0,95 = -0,9; \quad c = e^{-0,35} = 0,7047;$$

$$d = (1 - 0,7047) \cdot 0,95 = 0,2805.$$

Тоді, за виразом (5),

$$P_{j+1} = 0,7047 P_j + 0,2805,$$

одержуємо

$$P_{11} = 0,7047 \cdot 0,9114 + 0,2805 = 0,925.$$

Як і в попередній моделі, зі збільшенням кількості етапів доопрацювань досягають зростання ІБР обладнання.

У разі, коли необхідно оцінити параметри експоненційної моделі зростання ІБР обладнання, скористаємося МНК [5].

Критерієм близькості експоненційної кривої до експериментальної послідовності частотних оцінок ІБР є така сума квадратів:

$$F(c_v) = \sum_{j=1}^l \left( \frac{m_j}{n_j} - \hat{\beta}_{0v} - \hat{\beta}_{1v} \cdot c_v^{j-1} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

де  $c_v$  — значення параметра моделі (5), що зафіксовано на  $v$ -му кроці процедури оцінювання параметрів;

$\hat{\beta}_{0v}, \hat{\beta}_{1v}$  — оцінки параметрів моделі, що отримані на  $v$ -му кроці,

$$\hat{\beta}_{0v} = \frac{S_{2v} \cdot S_3 - S_{1v} \cdot S_{4v}}{lS_{2v} - S_{1v}^2}; \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_{1v} = \frac{lS_{4v} - S_{1v} \cdot S_3}{lS_{2v} - S_{1v}^2}, \quad (9)$$

причому

$$S_{1v} = \frac{1 - c_v^l}{1 - c_v}; \quad (10)$$

$$S_{2v} = \frac{1 - c_v^{2l}}{1 - c_v^2}; \quad (11)$$

$$S_3 = \sum_{j=1}^l \frac{m_j}{n_j}; \quad (12)$$

$$S_{4v} = \sum_{j=1}^l c_v^{j-1} \cdot \frac{m_j}{n_j}. \quad (13)$$

Початкове наближення  $c_1$  величини  $c$  визначають за формулою

$$c_1 = \frac{\hat{P}_\infty - \frac{m_{j+1}}{n_{j+1}}}{\hat{P}_\infty - \frac{m_j}{n_j}}, \quad (14)$$

де  $\hat{P}_\infty$  — попередня оцінка параметра  $P_\infty$ ,  
 $\frac{m_j}{n_j} < \hat{P}_\infty < 1$ .

Нехай за  $l = 6$  етапів було проведено доопрацювання обладнання, результати яких наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Вихідні дані

Номер $j$ етапу відпрацювань	Кількість $n_j$ випробувань	Кількість $m_j$ зафіксованих успішних результатів	Частота успіхів $\frac{m_j}{n_j}$
1	20	3	0,15
2	25	11	0,44
3	20	14	0,7
4	25	19	0,76
5	20	15	0,75
6	30	24	0,8

Знаходимо початкові наближення  $c_1$  параметра  $c$  за співвідношенням (14). У разі  $i=1$  і  $\hat{P}_\infty=0,95$  маємо

$$c_1 = \frac{0,95 - 0,44}{0,95 - 0,15} = 0,61;$$

$$S_{11} = \frac{1 - 0,61^6}{1 - 0,61} = \frac{0,948}{0,39} = 2,43;$$

$$S_{21} = \frac{1 - 0,61^{12}}{1 - 0,61^2} = \frac{0,9973}{0,628} = 1,588;$$

$$S_3 = \sum_{j=1}^l \frac{m_j}{n_j} = 0,15 + 0,44 + 0,7 + 0,76 + 0,75 + 0,8 = 3,6;$$

$$S_{4v} = \sum_{j=1}^l (0,61)^{j-1} \cdot \frac{m_j}{n_j} = (0,61)^0 \cdot 0,15 + (0,61)^1 \cdot 0,44 + (0,61)^2 \cdot 0,7 + \\ + (0,61)^3 \cdot 0,76 + (0,61)^4 \cdot 0,75 + (0,61)^5 \cdot 0,8 = 0,15 + 0,2684 + 0,2605 + \\ + 0,1725 + 0,1038 + 0,0676 = 1,023;$$

$$\hat{\beta}_{0v} = \frac{1,588 \cdot 3,6 - 2,43 \cdot 1,023}{6 \cdot 1,588 - (2,43)^2} = \frac{5,7168 - 2,4859}{9,528 - 5,905} = \frac{3,03}{3,623} = 0,892;$$

$$\hat{\beta}_{1v} = \frac{6 \cdot 1,023 - 2,43 \cdot 3,6}{6 \cdot 1,588 - (2,43)^2} = \frac{6,138 - 8,748}{3,623} = -\frac{2,61}{3,623} = -0,72;$$

$$\hat{P}_\infty = \hat{\beta}_{0v} = 0,892;$$

$$\hat{P}_{01} = 0,892 - 0,72 \cdot (0,61)^0 = 0,172;$$

$$F(c_1) = \sum_{j=1}^6 \left[ \left( 0,15 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^0 \right)^2 + \left( 0,44 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^1 \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( 0,7 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^2 \right)^2 + \left( 0,76 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^3 \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( 0,75 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^4 \right)^2 + \left( 0,8 - 0,892 - (-0,72) \cdot (0,61)^5 \right)^2 \right] = \\ = 0,00048 + 0,00016 + 0,0058 + 0,00099 + 0,00179 + 0,00097 = 0,0102 (0,1\%).$$

Для вибору параметрів кривої ІБР розроблено алгоритм, поданий на рисунку, за яким виконані розрахунки оптимальних значень параметрів, що занесені в табл. 3.

Із наведених розрахунків оптимальні значення параметрів моделі такі:  $\hat{P}_\infty = \hat{\beta}_0 = 0,8210$ ;  $\hat{\beta}_1 = 0,6814$ ;  $c = 0,4935$ , причому мінімальне значення  $F(c_1) = 0,005502$ .

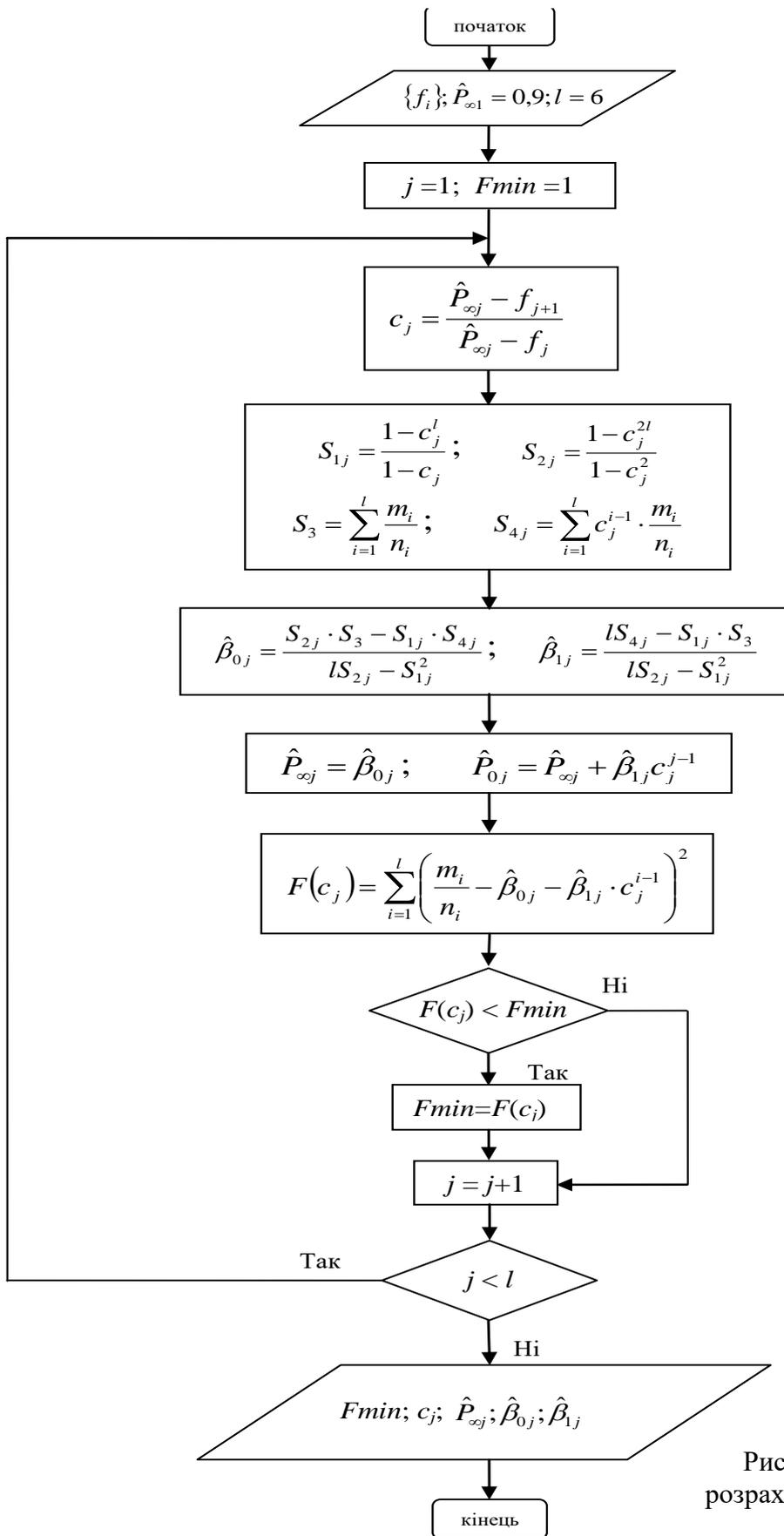


Рис. Блок-схема алгоритму розрахунку оптимальних значень параметрів моделі

Таблиця 3

Розрахунки оптимальних значень параметрів моделі

$c_i$	$S_{1i}$	$S_{2i}$	$S_3$	$S_{4i}$	$\beta_{0i}$	$\beta_{1i}$	$P_\infty$	$P_{01}$	$F(c_i)$
0,6000	2,3834	1,5591	3,6	0,9896	0,8857	-0,7193	0,8857	0,1665	0,009404
0,5500	2,1607	1,4326	3,6	0,8391	0,8516	-0,6988	0,8516	0,1529	0,006622
0,5000	1,9688	1,3330	3,6	0,7119	0,8242	-0,6832	0,8242	0,1410	0,005517
0,4500	1,8031	1,2538	3,6	0,6045	0,8015	-0,6704	0,8015	0,1310	0,006188
0,4900	1,9336	1,3157	3,6	0,6889	0,8193	-0,6805	0,8193	0,1388	0,005507
0,4910	1,9371	1,3174	3,6	0,6912	0,8198	-0,6808	0,8198	0,1390	0,005505
0,4920	1,9406	1,3191	3,6	0,6934	0,8203	-0,6810	0,8203	0,1392	0,005503
0,4930	1,9441	1,3208	3,6	0,6957	0,8207	-0,6813	0,8207	0,1395	0,005503
0,4940	1,9476	1,3225	3,6	0,6980	0,8212	-0,6816	0,8212	0,1397	0,005503
0,4950	1,9511	1,3243	3,6	0,7003	0,8217	-0,6818	0,8217	0,1399	0,005503
0,4935	1,9458	1,3217	3,6	0,6969	0,8210	-0,6814	0,8210	0,1396	0,005502
0,4936	1,9462	1,3218	3,6	0,6971	0,8210	-0,6815	0,8210	0,1396	0,005502
0,4937	1,9465	1,3220	3,6	0,6973	0,8211	-0,6815	0,8211	0,1396	0,005502

У табл. 4 для порівняння наведено частотні оцінки ймовірностей зростання ІБР обладнання з доопрацюванням і оцінки цих

імовірностей для кожного етапу доопрацювання, що отримані за формулою (5) за методом МНК.

Таблиця 4

Порівняння оцінок ІБР за МНК з частотними оцінками

$j$	$\hat{P}_j$	$\frac{m_j}{n_j}$	$\frac{m_j}{n_j} - \hat{P}_j$
1	0,1396	0,15	0,0104
2	0,4846	0,44	-0,0446
3	0,6549	0,7	0,0451
4	0,7390	0,76	0,0210
5	0,7805	0,75	-0,0305
6	0,8010	0,8	-0,0010

Коли на початку доопрацювання зростання ІБР обладнання досить повільне порівняно з наступними етапами доопрацювання, доцільно застосовувати

інші криві зростання ІБР, зокрема логістичну криву зростання ІБР.

Логістична крива зростання ІБР обладнання має вигляд

$$P_j = \frac{P_\infty}{1 + \left(\frac{P_\infty}{P_0} - 1\right) \cdot \exp(-b(j-1))} \quad (15)$$

Нехай між доопрацюваннями локомотивного обладнання в середньому проводять 10 випробувань, при цьому планують провести 300 випробувань. Параметри логістичної кривої мають такі значення:  $P_\infty = 0,98$  і  $b = 0,2$ . Необхідно до кінця доопрацювання мати значення ІБР

$P_T = 0,95$ . При цьому визначимо, чи буде досягнуте необхідне значення ІБР, коли на початку відпрацювання  $P_{01} = 0,05$  або  $P_{02} = 0,15$ .

За формулою (15), попередньо визначивши середню кількість відпрацювання в одному інтервалі  $300 : 10 = 30$ ,

$$P_{30}^{(1)} = \frac{0,98}{1 + \left(\frac{0,98}{0,05} - 1\right) \cdot \exp(-0,2 \cdot (30 - 1))} = \frac{0,98}{1 + 18,6 \cdot \exp(-5,8)} = 0,9268 .$$

$$P_{30}^{(2)} = \frac{0,98}{1 + \left(\frac{0,98}{0,15} - 1\right) \cdot \exp(-0,2 \cdot (30 - 1))} = \frac{0,98}{1 + 5,53 \cdot \exp(-5,8)} = 0,9635 .$$

Тобто мета з доопрацюванням для значення  $P_{02} = 0,15$  виконана.

Визначимо найменший номер доопрацювання для випадку  $P_{02} = 0,15$  за формулою

$$t_0 = 1 + \frac{1}{b} \cdot \ln \frac{\frac{P_\infty}{P_0} - 1}{\frac{P_\infty}{P_T} - 1} \quad (16)$$

$$t_0 = 1 + \frac{1}{0,2} \cdot \ln \frac{\frac{0,98}{0,15} - 1}{\frac{0,98}{0,95} - 1} = 26,8 .$$

Отже, необхідного рівня ІБР досягають в результаті реалізації 27 доопрацювань, а потрібно загалом  $27 \cdot 10 = 270$  випробувань.

На практиці часто виникає необхідність аналізу експериментального доопрацювання до початку його проведення, тобто апіорі. Через це виникає необхідність побудови моделі зростання надійності, виходячи з імовірнісної прояви і усунення джерел відмов (ДВ).

Для процесу підвищення надійності відповідного локомотивного обладнання використовують систему рівнянь

$$\begin{cases} P_{i+1} - P_i = \left( \sum_{v=1}^{N_1} s_{vi} q_{vi} \right) P_i + \sum_{v=1}^{N_1} g_{vi} q_{vi}^2 \\ q_{v(i-1)} - q_{vi} = -(s_{vi} P_{vi} + g_{vi} q_{vi}) q_{vi} \end{cases} \quad (17)$$

де  $P_1 = P_0$ ,  $P_i$  — ІБР в  $i$ -му випробуванні;

$g_{vi}$  — імовірність виникнення в  $i$ -му випробуванні відмови, що викликано  $\nu$ -м ДВ;

$\nu = \overline{1, N_1}$ ;  $q_{vi} = c_{vi}$ ;  $g_{vi}$  — імовірність усунення  $\nu$ -го ДВ із доопрацюванням, що проводять після відмови, яка викликана цим ДВ;

$S_{vi}$  — імовірність усунення  $\nu$ -го ДВ із доопрацюванням, яке проводять після успішного доопрацювання на  $\nu$ -му випробуванні;

$N_1$  — кількість усунених ДВ.

Коли доопрацювання обладнання проводять тільки після відмов, приблизне розв'язання системи рівнянь (17) буде таким:

$$P_i = P_\infty - \sum_{\nu=1}^{N_1} \frac{c_\nu}{c_\nu g_\nu (i-1) + 1}, \quad (18)$$

де  $P_\infty = 1 - \sum_{\nu=1}^{N_1} c_\nu$ .

У випадку рівності значень початкових імовірностей  $g_{vi}$ ,  $\nu = \overline{1, N_1}$  залежність зростання ІБР обладнання від кількості проведених випробувань має такий вигляд:

$$P_i = P_\infty - \frac{P_\infty - P_0}{N_1 g (P_\infty - P_0) (i-1) + 1}, \quad (19)$$

де  $g = g_\nu$ ,  $\nu = \overline{1, N_1}$ .

Нехай за умовами випробувань дослідні зразки доопрацьованого обладнання не відновлюються. Треба перед початком відпрацювання оцінити кількість дослідних зразків обладнання, яке необхідно виготовити для підвищення зростання ІБР з  $P_0 = 0,05$  до  $P_T = 0,955$ .

За даними експериментальних доопрацювань зразків обладнання — аналогів визначені такі значення параметрів:  $P_\infty = 0,98$ ;  $s = 0,15$ ;  $g = 0,84$ ;  $N_1 = 30$ .

Послугуючись рівнянням (20), знайдемо шукані значення  $i = t_T$ :

$$P_i = P_\infty (\alpha + \beta P_0) - \alpha (P_\infty - P_0) \frac{\exp[-s P_\infty (i-1)]}{\alpha + \beta P_0 + \beta (P_\infty - P_0) \cdot \exp[-s P_\infty (i-1)]}, \quad (20)$$

де  $\alpha = \frac{P_\infty g}{N_1}$ ;  $\beta = s - \frac{g}{N_1}$ .

$$t_T = 1 + \frac{1}{s P_\infty} \cdot \ln \frac{(\alpha + \beta P_T)(P_\infty - P_0)}{(\alpha + \beta P_0)(P_\infty - P_T)},$$

де  $\alpha = \frac{0,98 \cdot 0,84}{30} = 0,02744$ ;  $\beta = 0,15 - \frac{0,84}{30} = 0,122$ .

$$t_T = 1 + \frac{1}{0,15 \cdot 0,98} \cdot \ln \frac{(0,02744 + 0,122 \cdot 0,955)(0,98 - 0,05)}{(0,02744 + 0,122 \cdot 0,05)(0,98 - 0,955)} = 34,3.$$

Тобто для проведення експериментальних доопрацювань необхідно зробити 34 дослідних зразки обладнання.

**Висновки.** З урахуванням проведених досліджень отримані такі результати:

— проаналізовано математичні методи для вирішення завдань доопрацювання локомотивного обладнання для декількох варіантів реалізації кривих зростання ІБР;

— розроблено алгоритм розрахунку та оптимізації параметрів моделі доопрацювання локомотивного обладнання;

— проведено розрахунки з визначення імовірності безвідмовної роботи локомотивного обладнання для низки варіантів реалізації кривих зростання ІБР локомотивного обладнання.

### Список використаних джерел

1. Капіца М. І. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2012. Вип. 40. С. 63—67.
2. Gnedenko B. V., Belyayev Yu. K., Solovyev A. D. *Mathematical Methods of Reliability Theory*. Elsevier. 1969. P. 506. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12300-8>.
3. Chen D., Xiao Q., Mou M., Yang W. et al. Fatigue reliability evaluation of heavy-haul locomotive car body underframe based on measured strain and virtual strain. *International Journal of Fatigue*. 2023. Vol. 172. 107661. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107661>.
4. Leite M., Costa M. A., Alves T., Infante V. et al. Reliability and availability assessment of railway locomotive bogies under correlated failures. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 135. 106104. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106104>.
5. Канарчук В. Є. Надійність машин. Київ: Либідь, 2003. 424 с.
6. Falcetelli F., Yue N., Di Sante R., Zarouchas D. Probability of detection, localization, and sizing: The evolution of reliability metrics in structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*. 2021. Vol. 21(6). P. 2990 — 3017. <https://doi.org/10.1177/14759217211060780>.
7. Xu P., Jones R., Sarris G., Huthwaite P. Efficient generation of realistic guided wave signals for reliability estimation. *Structural Health Monitoring*. 2025. <https://doi.org/10.1177/14759217241302469>.
8. Zorzi S., Broccardo M., Tonelli D., Zonta D. Reliability-based metrics for structural health monitoring information quality assessment. *Structural Health Monitoring*. 2025. Vol. 24(5). P. 3028 — 3045. <https://doi.org/10.1177/14759217241265956>.
9. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог: монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин и др. Луганск: «Ноулидж», 2011. 174 с.
10. Голубенко О. Л. Визначення оптимальних строків служби та міжремонтних періодів рухомого складу. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2002. № 11(58). С. 132—137.

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372.

Тел.: +38 (097) 991-70-99. E-mail: [alsem1512@gmail.com](mailto:alsem1512@gmail.com).

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9185-6212. Тел.: +38 (066) 812-48-89. E-mail: [shapatina.uvkr@kart.edu.ua](mailto:shapatina.uvkr@kart.edu.ua).

Бондаренко Костянтин Станіславович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [kos.bondarenko.kh@gmail.com](mailto:kos.bondarenko.kh@gmail.com).  
Orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Krasheninina Oleksandr, Dr.Sc (Tech.), Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372. Tel.: +38 (097) 991-70-99. E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Shapatina Olga, PhD (Tech.), Associate Professor, department of cargo and commercial work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9185-6212. Tel.: +38 (066) 812-48-89. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Bondarenko Kostiantyn Stanislavovych, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, postgraduate student, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kos.bondarenko.kh@gmail.com. Orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.

УДК 625.143.036:625.15

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗВИТКУ НЕРІВНОСТЕЙ КОЛІЇ В ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ПЛОЩИНІ ДЛЯ БЕЗСТИКОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Канд. техн. наук Д. О. Потапов, асп. В. В. Тертичний

## THEORETICAL STUDIES OF THE EVOLUTION OF HORIZONTAL-PLANE TRACK IRREGULARITIES IN CONTINUOUSLY WELDED TRACK

PhD (Tech.) D. Potapov, postgraduate student V. Tertychnyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351841>

**Анотація.** У статті запропоновано математичний апарат, який допомагає оцінювати динаміку зміни амплітуди геометричних нерівностей у горизонтальній площині для експлуатації рейкових плітей. Наведені функціональні залежності можуть бути включені в діючу нормативну базу з улаштування, укладання, ремонту і утримання безстикової колії на залізницях України. Їх практичне застосування дасть змогу своєчасно ухвалювати рішення та розробляти заходи для забезпечення руху в період дії високих температур, особливо коли середньодобова різниця між температурою закріплення пліті і температурою рейок більше 30 °С.

**Ключові слова:** безпека руху, безстикова колія, стійкість колії, горизонтальні нерівності, температура закріплення пліті.

**Abstract.** The article introduces an advanced mathematical framework developed to predict the evolution of horizontal geometric irregularities that arise in continuously welded rails during long-term operation. The proposed methodology provides a systematic way to evaluate how the amplitude of these irregularities increases under the combined influence of temperature-induced compressive forces, accumulated residual stresses, and dynamic loads generated by passing rolling stock. The analytical expressions and functional dependencies obtained in the study enable engineers to quantitatively assess track stability under changing thermal conditions and to forecast the probability of lateral deformation or track buckling over a specified time horizon.

The presented model has significant practical value, as it can be integrated into the current regulatory and methodological base governing the installation, adjustment, maintenance, and repair of continuously welded track on the railways of Ukraine. By embedding the proposed predictive dependencies into existing standards, infrastructure managers will gain a more accurate and

*scientifically grounded tool for evaluating the structural behavior of rail strings under variable thermal loads. This, in turn, will enhance the ability of maintenance personnel to identify hazardous track segments in advance, optimize inspection strategies, and schedule preventive interventions in a timely and resource-efficient manner.*

*Particular attention is devoted to the conditions of elevated ambient temperatures, when the difference between the rail neutral temperature and the actual rail temperature exceeds 30 °C. Under such circumstances, the likelihood of uncontrolled lateral displacement increases sharply, making the accurate prediction of irregularity amplitude growth especially critical. The implementation of the proposed approach contributes to strengthening operational safety, reducing the risk of derailments associated with thermal instability, and improving the overall reliability and resilience of continuously welded rail infrastructure.*

**Keywords:** *traffic safety, continuously welded track, track stability, horizontal irregularities, rail neutral temperature.*

**Вступ.** Усі елементи залізничної колії за міцністю, стійкістю і станом мають гарантувати безпечний і плавний рух поїздів із швидкостями, встановленими на певній ділянці [1]. У процесі експлуатації залізничної колії в ній і її елементах неминуче накопичуються залишкові деформації, у тому числі вигляд геометричних нерівностей у горизонтальній (вертикальній) площині.

Як відомо [2], ці нерівності є однією з основних причин виникнення складних і багатофакторних коливальних процесів, що виникають у системі «екіпаж-залізнична колія» під час проходження рухомого складу. Ці коливальні процеси призводять до виникнення додаткових динамічних сил взаємодії, які негативно впливають на технічний стан колії, що в деяких випадках може викликати необхідність обмеження швидкості і навіть закриття руху.

З іншого боку, беручи до уваги той факт, що безстикова конструкція колії на сьогодні є основною на магістральних залізницях України, наявність відхилень від проектного положення рейкових нитей у плані може створювати безпосередню загрозу втрати стійкості, призводити до небезпечного явища – температурного «викиду» колії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Із самого початку впровадження безстикової конструкції колії одразу гостро постало питання про

встановлення максимально допустимих меж підвищення температури рейок відносно температури їх закріплення.

Недостатній ступінь розвитку обчислювальної техніки, недосконалість математичного апарату не давали змогу на той час вирішити це питання чисельними методами, тому перші методики обчислення критичних температур були базовані на положеннях у галузі опору матеріалів. У подальшому були створені різні варіанти методів розрахунку величин поздовжніх критичних сил у рейках: енергетичний метод, метод диференціальних рівнянь, скінченних елементів, імітаційного моделювання та інші, які знайшли своє відображення у великій кількості наукових, навчальних матеріалів і відповідній нормативній базі [3-7].

Зрозуміло, що кожен із вище перелічених методів розрахунків має як переваги, так і недоліки. Точність розрахунків, необхідний перелік вихідних параметрів, граничні умови, урахування (або ні) перехідних процесів безпосередньо із втратою стійкості – ось неповний перелік факторів, які впливають на вибір методу розрахунку.

Наприклад, у чинних Правилах [8] для розрахунків із забезпечення поперечної стійкості рейко-шпальної решітки безстикової колії проти викиду за дії критичних температурних сил використовують енергетичний метод, за

яким стискальна сила  $P_t$  (влітку), що виникає в пліті, зокрема коли температура рейки максимальна, не має перевищувати допустимого за умовами стійкості значення  $[P_{t-cm}]$ . Тобто має бути виконана така умова:

$$P_t \leq \frac{A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{k_{запасу} \cdot i^a}, \quad (1)$$

де  $A$  і  $a$  – параметри, які залежать від типу рейки і плану лінії;

$i$  – середній ухил початкової нерівності;

$k_1, k_2, k_3$  – коефіцієнти, які залежать від опору шпал переміщенням поперек колії, епюри укладання шпал і стану проміжних рейкових скріплень;

$k_{запасу}$  – коефіцієнт запасу.

Наведена умова яскраво підкреслює одну з основних переваг енергетичного методу – його відносну простоту порівняно, наприклад, із методом диференціальних рівнянь. Але, з іншого боку, не дає змогу повноцінно оцінити динаміку зміни основних геометричних параметрів нерівностей і критичної поздовжньої сили, що може негативно впливати на безпеку руху в реальних умовах експлуатації.

**Визначення мети та завдання досліджень.** Тому метою дослідження є спроба доповнити сучасну методику з визначення стійкості рейко-шпальної

решітки для безстикової конструкції математичним апаратом, який дасть змогу прогнозовано оцінювати розвиток нерівностей у горизонтальній площині колії.

Для досягнення поставленої мети необхідно отримати аналітичну залежність зміни стріли вигину горизонтальної нерівності рейкової пліті під дією поздовжніх температурних сил у функції часу з урахуванням фізико-механічних характеристик конструктивних елементів верхньої будови колії.

**Основна частина дослідження** Згідно з розрахунковою схемою на рисунку рейко-шпальну решітку безстикової колії можна подати як пружний стрижень. У площині згину жорсткість стрижня дорівнює  $EW$  (де  $E$  – модуль пружності рейкової сталі,  $W$  – момент опору поперечного перетину рейко-шпальної решітки у площині згину, який приведений до моментів інерції перетинів двох рейок). Крім того, існує погонний опір зсуву вздовж  $r$  і поперек осі колії  $q$ .

За дії температурної поздовжньої сили  $F = \alpha E \omega \Delta t$  (де  $\alpha$  – коефіцієнт температурного розширення рейкової сталі,  $\omega$  – площа поперечного перерізу двох рейкових нитей,  $\Delta t = t - t_3$  – різниця між температурою рейок  $t$  і температурою їх закріплення  $t_3$ ) виникає горизонтальна нерівність довжиною  $l$  із початковою стрілою вигину  $f_0$ .

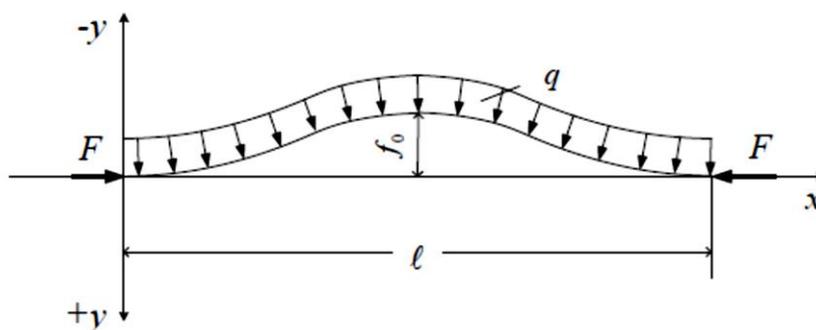


Рис. Розрахункова схема для визначення стійкості безстикової колії

Диференціальне рівняння поперечних переміщень, що відповідає розрахунковій схемі, можна подати як

$$EI \cdot y^{IV} \pm F \cdot y'' \pm q = 0. \quad (2)$$

Замість розв'язання цього диференціального рівняння автори пропонують використати енергетичний метод. За умову рівноваги в енергетичному методі візьмемо рівність нулю суми елементарних робіт. Тобто визначення умов стійкості безстикової колії може бути засноване на принципі можливих переміщень [9-11]:

$$\sum dA_i = 0. \quad (3)$$

Єдиною активною силою, що виводить рейко-шпальну решітку з рівноваги, є поздовжня стискальна сила  $F$ . Тоді з її дією можливим нескінченно малим поздовжнім переміщенням буде  $d\lambda$ . Елементарну роботу цієї сили можна визначити як

$$dA_1 = -Fd\lambda. \quad (4)$$

Елементарна робота внутрішніх сил згинання рейок – це реактивні сили, які визначають так:

$$dA_2 = \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} df. \quad (5)$$

Елементарна робота сил опору зсуву шпал у баласті (це також реактивні сили):

$$dA_3 = \frac{ql}{2} df. \quad (6)$$

Поздовжнє переміщення  $\lambda$  зі згином рейок [9-11] можна визначити як

$$\lambda = \frac{\pi^2 f^2}{4l} \quad \text{та} \quad d\lambda = \frac{\pi^2 f}{2l} df. \quad (7)$$

Для згину (рисунок), підставляючи у вирази (3)-(6), з урахуванням формул (7) отримуємо

$$dA_i = -Fd\lambda + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} df + \frac{ql}{2} df, \quad (8)$$

або

$$\left( -\frac{F\pi^2 f}{2l} + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} + \frac{ql}{2} \right) df = 0.$$

Оскільки  $df \neq 0$ , то можна записати:

$$-\frac{F\pi^2 f}{2l} + \frac{2\pi^4 EIf}{l^3} + \frac{ql}{2} = 0.$$

Для того щоб вийти на функціональну залежність між  $q$ ,  $f$  і  $l$ , проведемо наступні перетворення, помноживши отриманий вираз на  $\frac{2}{l}$ :

$$-\frac{F\pi^2 f}{l^2} + \frac{4\pi^4 EIf}{l^4} + q = 0.$$

Звідси

$$q = \frac{F\pi^2 f}{l^2} - \frac{4\pi^4 EIf}{l^4} = \frac{\pi^2 f}{l^2} \cdot \left( F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right). \quad (9)$$

Використовуючи формулу (9), отримуємо вираз для визначення стріли нерівності

$$f = \frac{ql^2}{\left( F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right) \cdot \pi^2}. \quad (10)$$

Довжину нерівності  $l$ , якій відповідає максимальна стріла вигину  $f$ , визначимо за умови  $\frac{df}{dl} = 0$ .

$$\frac{df}{dl} = \frac{2ql\pi^2 \cdot \left( F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right) - \frac{ql^2 \pi^4 8EI}{l^3}}{\pi^4 \cdot \left( F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right)^2} = 0.$$

Звідси

$$2ql\pi^2 \cdot \left( F - \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \right) - \frac{ql^2 \pi^4 8EI}{l^3} = 0.$$

Розкриємо дужки:

$$2ql\pi^2 F - \frac{8q\pi^4 EI}{l^2} - \frac{ql^2 \pi^4 8EI}{l^3} = 0.$$

Після спрощень і приведення подібних отримуємо  $2ql\pi^2 F = 16q\pi^4 EI$  або

$$Fl^2 = 8\pi^2 EI. \quad (11)$$

Звідси

$$l = 2\pi \sqrt{\frac{2EI}{F}}. \quad (12)$$

Отже, величина критичної сили дорівнює

$$F = \frac{8\pi^2 EI}{l^2}. \quad (13)$$

Підставляючи у формулу (9) отриманий вираз (13), отримуємо

$$q = \frac{F\pi^2 f}{l^2} - \frac{4\pi^4 EIf}{l^4} = \frac{8\pi^4 EIf}{l^4} - \frac{4\pi^4 EIf}{l^4} = \frac{4\pi^4 EIf}{l^4}.$$

Підставляючи у формулу (9) вираз (12), отримуємо

$$q = \frac{F^2 f}{16EI}. \quad (14)$$

А підставивши у формулу (9) вираз (13) для визначення критичної сили, отримали залежність величина стріли нерівності від її довжини

$$f = \frac{ql^4}{4\pi^4 EI}. \quad (15)$$

У такий спосіб було отримано функціональні залежності, які визначають стійкість рейкової колії.

Слід зазначити, що потенціальні розв'язки виразів (14) і (15) є багатозначними, оскільки в реальних умовах

експлуатації поєднань  $f_i$ ,  $F_i$  і  $l_i$  безліч. Їх можна розглядати як випадкові величини, що залежать від великої кількості конструктивних та експлуатаційних факторів (температурних умов роботи, конструкції верхньої будови колії, силового впливу рухомого складу, конфігурації нерівності тощо). Великий ступінь дисперсії цих випадкових величини, на нашу думку, не дає змогу в межах статистики визначити в безстиківій колії небезпечне місце за умови її стійкості.

Зробивши припущення, що зростання стріли вигину виникає внаслідок зменшення погонного опору зсуву рейко-шпальної решітки поперек колії тільки під час руху поїздів, розв'язання вищенаведених виразів можна вважати однозначним.

Погонний опір зсуву рейко-шпальної решітки поперек колії можна визначити як [12-14]

$$q = \psi \frac{df}{d\tau}, \quad (16)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт, який урахує пружні та в'язкі властивості баластного шару;

$\frac{df}{d\tau}$  – перша похідна зміни стріли вигину в часі.

Прирівняємо праві частини виразів (14) і (16):

$$\psi \frac{df}{d\tau} = \frac{F^2 f}{16EI}.$$

Далі, поділимо змінні  $f$  та  $\tau$ :

$$\frac{df}{f} = \frac{F^2}{16EI\psi} d\tau.$$

Інтегруємо в межах від 0 до  $\tau$  з урахуванням  $f(0) = f_0$ ,  $f(\tau) = f$ , тобто

$$\int_{f_0}^f \frac{df}{f} = \int_0^\tau \frac{F^2 d\tau}{16EI\psi}. \quad (17)$$

Звідси

$$\ln f - \ln f_0 = \frac{F^2 \tau}{16EI\psi},$$

$$\ln \frac{f}{f_0} = \frac{F^2 \tau}{16EI\psi}. \quad (18)$$

Тобто стріла вигину потенційно небезпечної нерівності дорівнює

$$f = f_0 \cdot e^{\frac{F^2 \tau}{16EI\psi}}. \quad (19)$$

А з урахуванням  $F = \alpha EW \omega \Delta t$  остаточний вираз можна подати як

$$f = f_0 \cdot e^{\frac{(\alpha EW \omega \Delta t)^2 \tau}{16EI\psi}}. \quad (20)$$

Для практичного використання отриманої залежності нижче в таблиці наведені результати розрахунків зростання стріли вигину нерівності  $f$  впродовж 30 календарних днів на ділянці, де укладено рейки типу Р65 на залізобетонних шпалах. Середньодобове підвищення температури рейкової плити відносно температури її закріплення приймали від +10 до +40 °С із кроком 5 °С. Початкова стріла вигину нерівності  $f_0 = 0,01$  м.

Як граничні умови були прийняті значення стріл вигину 25, 35, 65 мм, які [15] відповідають несправностям III, IV і V ступеня.

Таблиця

Результати розрахунків зміни стріли нерівності

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Термін розвитку початкової нерівності до відповідного ступеня несправності, днів		
	III ступінь (25 мм)	IV ступінь (35 мм)	V ступінь (65 мм)
10	–	–	–
15	26	–	–
20	14	20	29
25	9	13	19
30	6	9	13
35	5	6	10
40	4	5	7

Наведені результати свідчать, що за прийнятих вихідних даних швидкість зростання стріли нерівності не загрожує безпеці руху за середньодобових коливань різниці температур рейок від 10 до 20 °С.

За середньодобової різниці в 20 °С через 20 діб стріла вигину буде відповідати несправності IV ступеня (необхідно буде обмежувати швидкість), а через 29 діб вона може досягти значень, що відповідають вже V ступеню. Але в будь-якому випадку ця несправність із високою імовірністю буде виявлена за результатами проходження вагона-колієвимірювача, оскільки періодичність його проходження складає 14 діб.

Особливу небезпеку становить середньодобова різниця температур рейок 30 °С і більше. Зрозуміло, що поява стріли вигину 65 мм через 13 або 10 діб не може бути своєчасно виявлена вагоном-колієвимірювачем і потенційно може безпосередньо загрозувати безпеці руху. Аналогічні висновки можна зробити і про розвиток нерівностей, унаслідок наявності

яких у колії можлива втрата стійкості рейко-шпальної решітки.

**Висновки.** Запропонований у статті математичний апарат із визначення зміни амплітуди нерівностей у горизонтальній площині для безстикової конструкції колії може бути включений у чинну нормативну базу АТ «Укрзалізниця» як додатковий показник, який гармонічно буде доповнювати сучасну методика. Це може сприяти зниженню кількості відмов за умови стійкості, особливо в період високих температур. Крім того, ця методика може бути корисною для планування запобіжних робіт, оскільки дає змогу більш раціонально вибирати передбачувані ділянки, де планують рихтування колії із застосуванням колійних машин важкого типу.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на експериментальну перевірку отриманих аналітичних виразів, уточнення окремих фізико-механічних показників елементів верхньої будови колії, що входять до розрахункових залежностей, у реальних умовах експлуатації.

### Список використаних джерел

1. Правила технічної експлуатації залізниць України. Київ: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2002, 133 с.
2. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом: підруч. для вищ. навч. закл. Київ: Інпрес, 2010. Т. 1. 456 с.
3. Даніленко Е. І. Проектування і розрахунки конструкцій залізничної колії: підруч. для вищ. навч. закл. Київ: Хай-Тек Прес, 2020. Т. 2. 551 с.
4. Esveld C. *Modern Railway Track*, 2nd ed. MRT Productions, The Netherlands, 2001.
5. Рибкін В. В., Патласов О. М., Белорусов О. І. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України. Київ: Транспорт України, 2012. 144 с.
6. Albinović S., Hebib-Albinović M. Continuously welded rail (CWR) track buckling and safety concepts. *Road and Rail Infrastructure II, 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructures*, May 2012. P. 649–655.
7. Enshaeian A., Rizzo P. Stability of continuous welded rails: A state-of-the-art review of structural modeling and nondestructive evaluation. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 2021. Vol. 235, No. 10. P. 1291–1311.
8. Даніленко Е. І., Рибкін В. В. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. Київ: Транспорт України, 2006. 167 с.
9. Nemesdy E. Berechnung waagerechter Gleisverwerfungen nach neuen ungarischen Versuchen. *Eisenbahntechnische Rundschau*. 1960. No. 12. P. 514–534.

10. Nemesdy E. A hézagnélküli vasúti pályák gátolt dilatációjának pontos és közelítő számítása, valamint a sínvégek illesztéseinek kialakítása. *Research report / thesis*. Hungary. P. 1961–1962.
  11. Nemesdy E. A sínvégek mozgása és kialakítása hézagmentes vasúti pályánál. *Közlekedéstudományi Szemle*. 1960. No. 11. P. 45–57.
  12. Selig E. T., Waters J. M. *Track Geotechnology and Substructure Management*. London: Thomas Telford, 1994. 512 p.
  13. Indraratna B., Salim W. *Mechanics of Ballasted Rail Tracks: A Geotechnical Perspective*. London: Balkema / Taylor & Francis, 2005. 280 p.
  14. Koyama E. A new approach for evaluating lateral resistance of railway ballast. *Engineering Geology*. 2021. Vol. 293. P. 106–120.
  15. СТП «Залізничний транспорт. Колієвимірювальні засоби. Організація роботи». Київ, 2018. 188 с.
- 

Потапов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7279-4271. Тел.: +38 (057)730-10-60. E-mail: ppx\_xiit@kart.edu.ua.

Тертичний Віталій Вікторович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (057)730-10-60. E-mail: ppx\_xiit@kart.edu.ua.

Dmytro Potapov PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and transport facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7279-4271. Tel.: +38 (057)730-10-60. E-mail: ppx\_xiit@kart.edu.ua.

Vitalii Tertychnyi, postgraduate student of railway track and transport facilities department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD 0009-0002-9025-6546. Tel.: +38 (057) 730-10-60. E-mail: ppx\_xiit@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.

**УДК 656.2:658.155.2:004.9**

## **УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ У КОНТЕКСТІ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ТА НЕВИЗНАЧЕНІСТЮ**

**Аспіранти П. В. Квасов, М. В. Продащук**

## **IMPROVEMENT OF RAILWAY TRANSPORT INFRASTRUCTURE OPERATIONS THROUGH INNOVATIVE SOLUTIONS IN THE CONTEXT OF RISK AND UNCERTAINTY MANAGEMENT**

**Postgraduate student P. V. Kvasov, Postgraduate student M. V. Prodashchuk**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351842>

*Анотація.* У статті досліджено підходи щодо вдосконалення технології роботи залізничної транспортної інфраструктури України в умовах зростаючих ризиків і невизначеності. Розкрито вплив економічних, технічних, соціальних та екологічних факторів на стабільність функціонування галузі. Проаналізовано сучасний стан залізничного транспорту. Показано руйнівний вплив воєнних дій на інфраструктуру та акцентовано на потребі інтеграції інноваційних рішень для підвищення стійкості системи. Узагальнено

досвід країн ЄС у сфері управління ризиками та виявлено відмінності в українських підходах. Обґрунтовано доцільність застосування цифрових платформ управління перевезеннями, систем предиктивного обслуговування («predictive maintenance»), технологій IoT, Big Data і штучного інтелекту. Визначено концептуальні засади формування «розумної» інфраструктури, здатної забезпечити довгострокову надійність і конкурентоспроможність національної транспортної системи.

**Ключові слова:** залізнична інфраструктура, управління ризиками, інноваційні технології, цифровізація, стійкість транспорту, IoT, Big Data, штучний інтелект.

**Abstract.** The article investigates approaches to improving the operational technology of Ukraine's railway transport infrastructure under conditions of growing risks and uncertainty. The research highlights the impact of economic, technical, social, and environmental factors on the stability of the railway sector. The current state of railway transport is analyzed. The destructive consequences of military actions on infrastructure, including damage to tracks, energy substations, and depots, are outlined, emphasizing the urgent need for modernization and innovation. A comparative analysis of European Union practices in risk management demonstrates significant differences from Ukrainian approaches, underscoring the necessity for systematic integration of standardized methodologies.

The article substantiates the relevance of applying digital transport management platforms, predictive maintenance systems, as well as IoT, Big Data, and artificial intelligence technologies. The proposed conceptual model of a «smart» railway infrastructure integrates technological solutions at all management levels, from local track segments to the national network. Such integration makes it possible to forecast risks, adapt operational practices to rapidly changing external conditions, and ensure more effective coordination between infrastructure, rolling stock, and safety systems.

The practical value of the research lies in its potential application to post-conflict recovery and modernization programs in Ukraine, providing a methodological and technological basis for sustainable railway development. Furthermore, the findings contribute to the broader discourse on the resilience of transport systems in crisis situations and may be relevant for other countries facing similar challenges in infrastructure renewal.

**Keywords:** railway infrastructure, risk management, innovative technologies, digitalization, transport resilience, IoT, Big Data, artificial intelligence.

**Вступ.** Сучасний розвиток залізничного транспорту відбувається в умовах зростання складності інфраструктури та необхідності швидкої адаптації до технологічних і соціально-економічних змін. Галузь залізничного транспорту є стратегічно важливою для національної економіки, оскільки забезпечує стабільне функціонування транспортної системи. Вона також сприяє інтеграції України у європейський і світовий транспортний простір і підвищенню її міжнародної конкурентоспроможності [1].

Водночас функціонування залізничної інфраструктури супроводжено значними

ризиками та невизначеністю, зокрема техногенними, природними, економічними та соціальними. Особливого значення ці аспекти набувають в умовах воєнних дій і відновлення транспортної мережі, коли необхідно забезпечувати стійкість системи та її здатність до швидкого відновлення [2].

Розв'язання цих проблем можливе завдяки застосуванню інноваційних технологій, зокрема цифровізації управлінських процесів, впровадженню автоматизованих систем моніторингу та прогнозування стану інфраструктури, а також використанню великих даних і

методів штучного інтелекту для аналізу та управління ризиками [3].

Актуальність дослідження визначають світові тенденції переходу до концепції «розумної інфраструктури», що передбачає інтеграцію інтелектуальних транспортних систем (ITS), інтернету речей (IoT), сенсорних мереж і систем предиктивного обслуговування у процес управління залізничним транспортом [7].

Отже, дослідження спрямоване на вдосконалення технології роботи залізничної транспортної інфраструктури з використанням інноваційних рішень у контексті управління ризиками та невизначеністю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема вдосконалення технології функціонування залізничної інфраструктури є предметом активних досліджень як в Україні, так і за кордоном. Вітчизняні науковці приділяють увагу модернізації транспортної системи, підвищенню її енергоефективності та цифровізації управління процесами. Зокрема, у працях Крауса розглянуто концептуальні аспекти впливу цифрової економіки на економічне зростання, що може бути застосовано для формування стратегій розвитку залізничного транспорту [3]. Актуальними є й дослідження Зеленька та Калимбета, які оцінюють ризики та пропонують підходи щодо їх мінімізації у процесах перевезення вантажів [5]. У роботах Тарашевського зазначено про важливість систематичного управління ризиками на транспортних підприємствах для підвищення безпеки перевізного процесу [6]. У працях Левківа, Франчука та Ткачука проаналізовано роль цифрових платформ в оптимізації логістичних ланцюгів, що може бути застосовано і для залізничних перевезень [7].

Закордонні дослідження висвітлюють проблематику в ширшому контексті «розумної інфраструктури». Проаналізовано можливості інтеграції інтелектуальних транспортних систем, IoT і

методів штучного інтелекту для підвищення безпеки і надійності залізничних перевезень [4]. Європейські публікації акцентують увагу на підвищенні стійкості транспортних систем до кризових умов, включаючи кліматичні та геополітичні виклики.

Разом із тим, попри активний розвиток досліджень, низка питань залишається недостатньо вивченою. Більшість робіт зосереджена на окремих технічних рішеннях (сенсорні системи, предиктивне обслуговування, автоматизовані платформи), тоді як комплексна методологія інтеграції інноваційних технологій в управління ризиками та невизначеністю на рівні всієї транспортної інфраструктури ще не розроблена. Саме ліквідації цього наукового прогалу присвячене дослідження.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є обґрунтування підходів щодо вдосконалення технології функціонування залізничної транспортної інфраструктури через інтеграцію інноваційних рішень у систему управління ризиками та невизначеністю.

Для досягнення цієї мети передбачено вирішення кількох взаємопов'язаних завдань. По-перше, проаналізувати сучасні наукові підходи щодо управління інфраструктурою залізничного транспорту в умовах ризику та невизначеності. По-друге, оцінити потенціал застосування цифрових платформ, систем прогнозного обслуговування та інтелектуальних транспортних технологій у практиці управління. Наступним етапом передбачено розроблення концептуальних засад інтеграції інновацій у систему управління ризиками на рівні всієї транспортної мережі. У завершальній частині дослідження визначені можливі напрями практичної реалізації результатів для підвищення безпеки, ефективності та стійкості функціонування залізничного транспорту.

**Основна частина дослідження.** Управління ризиками та невизначеністю в

залізничній інфраструктурі охоплює комплекс заходів, спрямованих на своєчасну ідентифікацію потенційних загроз, оцінювання їхньої ймовірності та наслідків, а також розроблення стратегій зменшення негативного впливу. Це передбачає застосування методів прогнозування, аналізу даних, а також адаптацію управлінських практик до змінних умов експлуатації та зовнішнього середовища.

Серед зарубіжних досліджень, актуальних для оцінювання надійності залізничної інфраструктури, виокремлюють аналіз компонентів мережі з урахуванням географічних і кліматичних факторів. Дослідники виявили, що такі елементи, як стрілочні переводи та вузлові перехрестя, особливо чутливі до змін температури, опадів і сезонних коливань, що збільшує ризик відмов. Розроблена модель дає змогу порівнювати надійність різних компонентів мережі з урахуванням їх розташування та кліматичних умов [8].

Інше дослідження аналізує ефективність вбудованих діагностичних систем (on-board diagnostics, OBD) для електричних приводів у залізничних машинах. Використовуючи статистику відмов і марковські моделі станів, автори змогли оцінити, наскільки застосування діагностичних систем знижує частоту аварійних ситуацій та оптимізує планове обслуговування [9].

В українських дослідженнях також накопичено важливі напрацювання щодо інтеграції технічних і організаційних підходів для управління ризиками. Так, у роботі Бантюкова та Бантюкової зазначено про необхідність інтеграції технічних і організаційних підходів для ефективного управління ризиками в умовах сучасних викликів [10]. У дослідженні Кравченка акцентовано увагу на використанні цифрових технологій для підвищення ефективності управління ризиками на підприємствах залізничного транспорту в умовах цифрової трансформації [11].

Діяльність Комітету з управління ризиками в АТ «Укрзалізниця» демонструє перехід від реактивного фіксування проблем до системного аналізу: ідентифікації джерел ризику, створення матриць і карт ризиків, а також урахування витрат і ймовірностей їх реалізації [12].

Застосування цифрових технологій, зокрема сенсорів і вбудованих діагностичних систем (OBD) в електродвигунах, допомагає збирати дані про стан обладнання та інфраструктури в реальному часі, прогнозувати відмови та планувати обслуговування більш раціонально, наприклад, використовуючи п'ятистанну модель надійності [9].

Водночас існують суттєві нерозв'язані проблеми. Українські умови мають свої особливості: експлуатація в умовах кліматичних змін, пошкодження інфраструктури, обмежене фінансування та логістичні обмеження. Зарубіжні методики не завжди враховують економічну невизначеність, соціальні чи регуляторні ризики, які є критично важливими для України. Отже, подальші дослідження мають поєднувати технічне прогнозування з комплексним управлінням ризиками на рівні всієї транспортної мережі, а не лише окремих ділянок або типів обладнання.

Сучасний розвиток залізничної інфраструктури неможливий без впровадження інноваційних технологій, що підвищують ефективність, безпеку і стійкість транспортної системи. Головні роль відіграють цифрові платформи управління перевезеннями, системи предиктивного обслуговування та інтегровані технології, включно з IoT, Big Data і AI, які забезпечують моніторинг і оперативне управління інфраструктурою [7, 13].

Цифрові платформи дають змогу інтегрувати дані про рух поїздів, стан інфраструктури та погодні умови, сприяючи оптимізації маршрутів і ефективному використанню ресурсів. Як показують дослідження Левківа, Франчука і Ткачука, такі платформи застосовують у логістичних

ланцюгах, включно з управлінням залізничними перевезеннями, для підвищення стійкості транспортних мереж [7].

Системи предиктивного обслуговування, зокрема, базовані на аналізі даних у реальному часі. Вони дають змогу прогнозувати можливі відмови та своєчасно проводити технічне обслуговування, що зменшує непередбачені витрати і підвищує надійність роботи системи. Реміха і Тонюк розглядають концепції цифрового стратегічного управління транспортним комплексом із використанням інтелектуальних систем для мінімізації ризиків [13].

Поєднання цифрових платформ і систем предиктивного обслуговування з інтегрованими технологіями створює інтелектуальні системи, здатні адаптуватися до змінних умов експлуатації та оперативно реагувати на проблеми. Дослідження Заріпової та співавторів показують, що цифрова трансформація транспортно-логістичної галузі допомагає оптимізувати процеси управління та підвищувати безпеку перевезень [14]. Практичне застосування таких систем у країнах ЄС демонструє зниження часу простою локомотивів і зменшення аварійності. В Україні ініціатива «Цифрова трансформація Укрзалізниці» забезпечує прогнозування технічного обслуговування та підвищення ефективності перевезень [2, 18].

Отже, впровадження сучасних технологій не лише оптимізує роботу залізничного транспорту, але і створює передумови для побудови «розумної» інфраструктури, здатної ефективно функціонувати у складних і невизначених умовах [13, 14]. Водночас, щоб ці системи працювали на довгострокову стійкість, необхідно враховувати і управління ризиками, адже навіть високотехнологічні рішення не можуть компенсувати системні загрози чи наслідки руйнувань інфраструктури.

Залізнична інфраструктура України перебуває у складному стані через тривале

недофінансування та наслідки воєнних дій. Значна зношеність колій і рухомого складу ускладнює модернізоване обслуговування та підтримання стабільної роботи мережі [15]. Повномасштабна агресія росії додатково спричинила руйнування залізничних колій, енергетичних підстанцій і локомотивних депо. Як наслідок, виникли затримки руху, потреба в аварійному ремонті та перенаправлення вантажопотоків на менш уражені ділянки, що стало серйозним викликом для логістики країни [16, 17].

У цьому контексті інноваційні технології дають можливості не лише для оперативного управління, але і системного контролю та підвищення стійкості мережі. Інтеграція цифрових платформ, систем предиктивного обслуговування та рішень на основі IoT, Big Data і AI дає змогу своєчасно виявляти несправності, прогнозувати потреби в технічному обслуговуванні та оптимізувати роботу залізничного транспорту. Це у свою чергу створює підґрунтя для комплексного управління ризиками та формування концепції «розумної» залізничної інфраструктури [13].

Одночасно модернізація рухомого складу, включаючи оновлення локомотивів і вагонів, є важливим аспектом підвищення ефективності перевезень і зниження експлуатаційних витрат. Практичні приклади впровадження інноваційних технологій можна спостерігати як у країнах Європейського Союзу, де активно розвиваються проєкти з цифровізації управління перевезеннями та інтеграції AI у моніторинг інфраструктури, так і в Україні в рамках ініціативи «Цифрова трансформація Укрзалізниці», яка передбачає модернізацію інфраструктури та використання цифрових технологій для підвищення ефективності та безпеки перевезень [1].

Оцінити реальний ефект від модернізаційних і цифрових ініціатив допомагає аналіз фактичних показників діяльності АТ «Укрзаліниця». Статистика

за 2020–2023 рр. [18-20] відображає як зміни в обсягах перевезень, так і динаміку капітальних інвестицій, що дає уявлення про результативність здійснюваних заходів. На рисунку ці дані узагальнено на основі

відкритих джерел Eurostat і АТ «Укрзалізниця», що дає змогу наочно простежити взаємозв'язок між інвестиційною активністю і стабільністю перевезень.

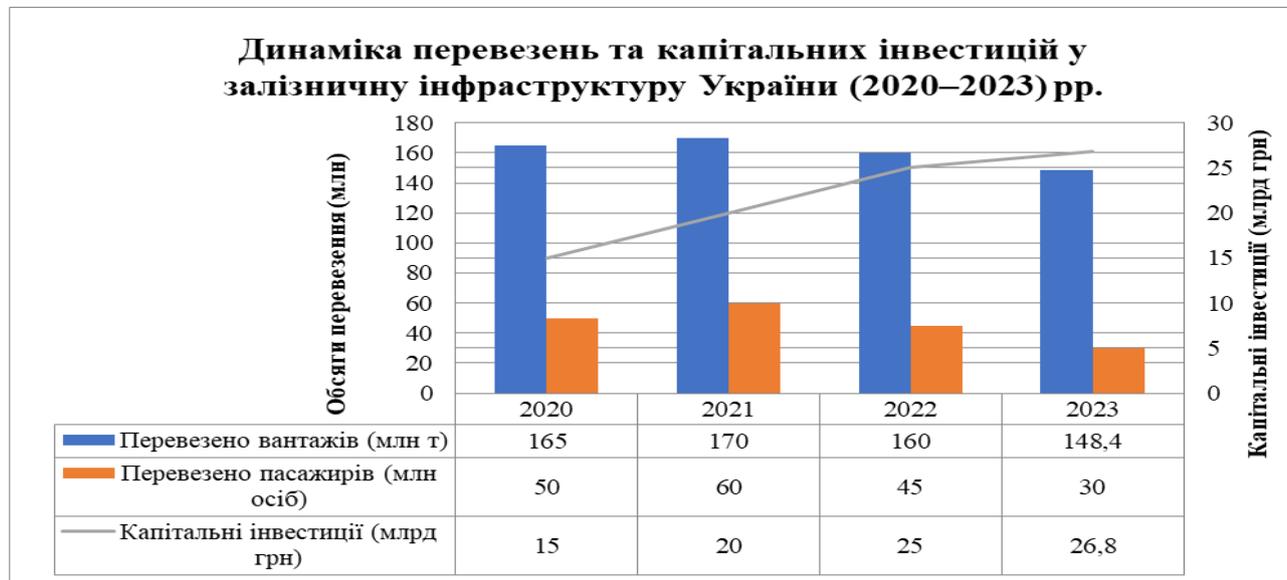


Рис. Динаміка перевезень і капітальних інвестицій у залізничну інфраструктуру України (2020–2023) рр. [18, 20]

Як свідчить аналіз рисунка, обсяг перевезень вантажів у 2023 р. скоротився на 7,25 % порівняно з 2022 р.  $(148,4 - 160,0) / 160,0 \times 100 = -7,25\%$ , що вказує на негативний вплив воєнних дій на транспортну галузь. Водночас капітальні інвестиції зросли на 7,20 %  $(26,8 - 25,0) / 25,0 \times 100 = 7,20\%$ , що демонструє зусилля щодо відновлення та модернізації інфраструктури. Ці показники ще раз підтверджують нагальну потребу інтеграції інноваційних технологій для підвищення ефективності та стійкості залізничного транспорту в умовах кризових ситуацій [1, 7, 13, 14].

Аналіз цих даних неминує веде до ширшого кола проблем, пов'язаних із ризиками функціонування залізничної системи. Одним із найважливіших є економічний ризик, що безпосередньо впливає на стабільність роботи галузі та реалізацію інфраструктурних проєктів.

Економічні ризики залишаються основними для стабільного функціонування галузі. Дані АТ «Укрзалізниця» за 2020–2023 рр. свідчать про нестійку динаміку доходів від перевезень та обмеженість фінансування, що підвищує ймовірність невиконання інфраструктурних проєктів і підкреслює необхідність системного підходу для планування інвестицій і оцінювання економічної ефективності [1, 18].

Технічні ризики також мають істотний вплив на безпеку і стабільність перевезень. Високий рівень зношеності колій, локомотивів і вагонів ускладнює забезпечення надійності мережі. За даними аналізу [8], стрілочні переводи та вузлові перехрестя особливо чутливі до кліматичних коливань і демонструють імовірність відмов на рівні 4–5 % на рік, що підкреслює актуальність впровадження систем предиктивного обслуговування.

Соціальні та кадрові ризики потребують не меншої уваги: недостатня кваліфікація персоналу і відтік кадрів можуть призводити до аварійних ситуацій і зниження ефективності роботи. Екологічні ризики проявляються у високому енергоспоживанні та негативному впливі на довкілля в разі використання застарілих технологій, що підкреслює необхідність модернізації [12].

Отже, комплексний характер ризиків вказує на потребу у використанні більш системних підходів для їх подолання. Важливим орієнтиром у цьому напрямі є досвід країн Європейського Союзу, де сформовані ефективні практики управління ризиками, що можуть слугувати прикладом для України. Порівняльний аналіз практик управління ризиками у країнах ЄС та Україні виявляє суттєві відмінності. В Європі активно застосовують стандартизовані системи управління ризиками (наприклад CSM-RA), що дає змогу прогнозувати аварійні події на рівні всієї мережі та ефективно розподіляти ресурси. В Україні, незважаючи на створення Комітету з управління ризиками, інтеграція таких методик на національному рівні залишається обмеженою, а оцінювання ризиків часто має фрагментарний характер [2, 12].

Інноваційні технології відіграють головну роль у підвищенні ефективності управління ризиками, адже вони забезпечують безперервний контроль стану колій і рухомого складу, дають змогу завчасно прогнозувати технічні відмови та оптимізувати процеси обслуговування [7]. Однак для досягнення довготривалої стійкості транспортної системи важливо не лише застосовувати окремі рішення, а й об'єднувати їх у цілісну інтегровану концепцію управління інфраструктурою. Ця концепція передбачає поєднання цифрових платформ управління перевезеннями, систем предиктивного обслуговування, а також технологій IoT, Big Data і штучного інтелекту, що забезпечує координацію і взаємодію всіх елементів системи, підвищує

надійність її роботи і сприяє більш ефективному розподілу ресурсів [7, 8].

На основі такої інтеграції формують концепцію «розумної» залізничної інфраструктури, яка охоплює всі рівні управління – від локальних ділянок колій до національної транспортної мережі. Вона передбачає розроблення моделей прогнозування ризиків, адаптацію управлінських практик до змінних умов експлуатації та зовнішнього середовища, а також формування єдиних стандартів взаємодії між технологічними платформами, системами безпеки та управління. Такий підхід забезпечує узгоджене функціонування всієї транспортної системи, підвищує її стійкість до кризових ситуацій і створює надійну основу для планування подальшого розвитку та модернізації залізничної інфраструктури [1, 2].

Виходячи з концептуальних засад, практичне застосування інноваційних рішень стає наступним логічним кроком. Це допомагає планувати і реалізовувати програми відновлення і модернізації залізничної інфраструктури України, особливо в постконфліктний період. Інтеграція цифрових платформ, систем предиктивного обслуговування і технологій IoT, Big Data і AI сприяє підвищенню безпеки перевезень, оптимізації використання ресурсів і забезпеченню стабільної роботи транспортної системи, що має важливе значення для економічного відновлення та розвитку галузі [1, 2, 7, 8].

Завершальним підсумком є те, що результати дослідження створюють науково-методологічну основу для подальшого вдосконалення управління ризиками та впровадження інновацій у залізничному транспорті України. Такий підхід забезпечує довгострокову стабільність, підвищує ефективність і конкурентоспроможність національної транспортної системи [1, 2].

**Висновки.** Дослідження підтвердило, що інтеграція інноваційних цифрових технологій у систему управління

залізничною інфраструктурою значно підвищує ефективність, безпеку і стійкість перевезень. При цьому ефективне управління ризиками потребує комплексного підходу, який урахує економічні, технічні, соціальні та екологічні аспекти, що безпосередньо впливають на стабільність роботи транспортної системи. Незважаючи на тимчасове зменшення обсягів перевезень, спостережувана інвестиційна активність створює реальні можливості для модернізації інфраструктури та зміцнення її стійкості.

Аналіз сучасних методів управління ризиками і застосування інноваційних технологій показав їхню ефективність для підвищення надійності інфраструктури, зниження аварійності та оптимізації експлуатаційних процесів. Порівняння практик управління ризиками в Європі та

Україні виявило істотні відмінності у прогнозуванні та запобіганні аварійним подіям, що підкреслює необхідність розвитку комплексної національної системи управління ризиками, здатної враховувати всі рівні та аспекти функціонування залізничної мережі.

Запропоновані підходи щодо інтеграції інновацій і формування концептуальних засад «розумної» залізничної інфраструктури створюють науково-методологічну основу для практичного впровадження в Україні. Їх використання сприяє підвищенню ефективності планування і розподілу ресурсів, зміцненню безпеки перевезень і стійкості транспортної системи, а також забезпечує умови для сталого розвитку національної інфраструктури навіть у складних кризових і невизначених умовах.

#### Список використаних джерел

1. Міністерство інфраструктури України. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 р. Київ: Міністерство інфраструктури України, 2019. 42 с.
2. European Union Agency for Railways. Consolidated Annual Activity Report (CAAR) 2023. Valenciennes: ERA, 146 p.
3. Kraus K., Kraus N. Virtual-Real Aspect of Economic Growth Reserves. WSEAS. *Transactions on Business and Economics*. 2021. Vol. 18. P. 569–580. DOI: <https://doi.org/10.37394/23207.2021.18.57>.
4. Sarp S., Sekmen A. Digitalization of railway transportation through AI-powered systems: a review. *European Transport Research Review*. 2024. DOI: 10.1186/s12544-024-00679-5.
5. Зеленько Ю. В., Калимбет М. В. Оцінка ризиків та надання рекомендацій щодо мінімізації їх виникнення під час перевезення вантажів залізничним транспортом. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2024. № 27. DOI: 10.15802/tstt2024/307372.
6. Тарашевський М. М. Стан управління ризиками на транспортних підприємствах України. *Вісник транспортних досліджень. Transport Research Bulletin*. 2020. URL: <https://oaji.net/pdf.html?n=2020/727-1603786737.pdf> (дата звернення: 25.09.2025).
7. Левків В. В., Франчук В. І., Ткачук С. М. Цифрові платформи в управлінні логістичними ланцюгами: сучасні тенденції та перспективи розвитку. *Економіка та держава*. 2025. № 5. С. 45–52. DOI: 10.32702/2306-6806.2025.5.45.
8. Kasraei A., Garmabaki A. H. S. Reliability analysis of railway assets considering the impact of geographical and climatic properties. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2024. DOI: 10.1007/s13198-024-02397-6.
9. Gubarevych O., Duer S., Melkonova I. et al. Research on and Assessment of the Reliability of Railway Transport Systems with Induction Motors. *Energies*. 2023. Vol. 16(19). P. 6888. DOI: 10.3390/en16196888.

10. Бантюков С. Є., Бантюкова С. О. Управління ризиками в системі залізничних перевезень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті : тези стендових доповідей та виступів учасників 36-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, 16–17 листопада 2023 р.)*. Харків, 2023. № 3. С. 19–20. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/18545> (дата звернення: 23.09.2025).
11. Кравченко В. В. Управління ризиками на підприємствах залізничного транспорту в умовах цифрової трансформації. *Актуальні питання економічних наук*. 2025. № 12. С. 1–15. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16028154>.
12. В УЗ запровадив Комітет з управління ризиками АТ «Укрзалізниця». *Rail.insider*. 2025. URL: <https://www.railinsider.com.ua/v-uz-zapratsyuvav-komitet-z-upravlinnya-ryzykamy-at-ukrzaliznytsya/> (дата звернення: 23.09.2025).
13. Remyha Y. & Toniuk M. (2025). Modern concept of digitalized strategic management of the transport complex. *The Actual Problems of Regional Economy Development*. 2(21). 398–409. <https://doi.org/10.15330/apred.2.21.398-409>.
14. Zaripova R., Nikitin A., Rustamova A. Transformation of the Transport and Logistics Industry in the Context of Digital Economy Development. *Finance, Economics, and Industry for Sustainable Development*. 2024. P. 265–274. DOI: 10.1007/978-3-031-56380-5\_24.
15. GMK Center. More than 60 % of Ukrainian railways infrastructure is unprofitable. *GMK Center*. 2023. URL: <https://gmk.center/en/news/more-than-60-of-ukrainian-railways-infrastructure-is-unprofitable-oleksandr-kalenkov/> (дата звернення: 24.09.2025).
16. Financial Times. Ukraine's railways struggle amid war damage. *Financial Times*. 2023. URL: <https://www.ft.com/content/de5a13d4-22f9-4409-8fc3-2842d4c37dee> (дата звернення: 24.09.2025).
17. RailFreight.com. It's practically impossible to destroy Ukrainian railway network. *RailFreight.com*. 27 Jan 2023. URL: <https://www.railfreight.com/railfreight/2023/01/27/its-practically-impossible-to-destroy-ukrainian-railway-network/> (дата звернення: 20.09.2025).
18. Статистичні дані по АТ «Укрзалізниця» за 2023–2024 роки. Міністерство розвитку громад та територій України. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/zaliznychnyi-transport/statystychni-dani-pro-ukrainsku-zaliznytsiu/statystychni-dani-po-at-ukrzaliznytsia-za-2023-2024-roky> (дата звернення: 20.09.2025).
19. Міністерство розвитку громад та територій України. Офіційний сайт. URL: <https://mtu.gov.ua/> (дата звернення: 20.09.2025).
20. Eurostat. Transport statistics database. 2025. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data> (дата звернення: 20.09.2025).

---

Квасов Павло Вікторович, аспірант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0006-5572-0015. E-mail: hvac.kpv@gmail.com.  
Продашук Микола Вікторович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3355-7767. E-mail: pn9920@ ukr.net.

Kvasov Pavlo Viktorovich, postgraduate student of department of management of freight and commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0006-5572-0015. E-mail: hvac.kpv@gmail.com.  
Prodashchuk Mikola Viktorovich, postgraduate student of department of railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3355-7767. E-mail: pn9920@ ukr.net.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.

УДК 625.14:629.4.05:681.586

## ВИКОРИСТАННЯ ІНЕРЦІАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ БЛОКІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОЛІЇ

Канд. техн. наук В. Г. Вітольберг, асп. С. С. Чесак

## USE OF INERTIAL MEASUREMENT UNITS FOR THE ASSESSMENT OF RAIL TRACK GEOMETRY PARAMETERS

PhD (Tech) V. Vitolberg, postgraduate student S. Chesak

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351878>

*Анотація.* У статті наведено результати експериментального дослідження з реєстрації динамічних параметрів руху вантажного вагона для оцінювання геометричного стану залізничної колії. Інерціальні вимірювальні блоки (IMU) встановлювали на буксові вузли колісної пари за допомогою спеціально розроблених кріплень, конструкцію яких попередньо випробувано для забезпечення надійної фіксації та коректної орієнтації датчиків у трьох осях.

Дослідна ділянка включала прямі та криві, стрілочні переводи, стики і локальні дефекти, що забезпечило репрезентативність вимірювань. Просторова прив'язка здійснена за допомогою GPS/GNSS пристроїв, а попередня зйомка дослідної ділянки з фіксацією характерних елементів колії забезпечила точну ідентифікацію їхнього положення вздовж маршруту.

Отримані результати демонструють виразні сигнатури проходження стиків, стрілочних переводів і нерівностей, а також залежність прискорень від швидкості руху. Отриманий масив даних створює основу для проведення подальшого спектрального та часово-частотного аналізу.

**Ключові слова:** геометрія колії, IMU-датчики, акселерометри, динаміка рухомого складу, взаємодія колесо-рейка, колієвимірювальний вагон, нерівності колії.

**Abstract.** This article presents the development, testing, and practical implementation of an experimental system for collecting inertial data on a freight wagon to assess the geometric condition of railway tracks. Compact inertial measurement units (IMU) were installed directly on the axle-box assemblies of a 18–100 bogie, enabling the registration of dynamic responses of the vehicle to track irregularities under real operating conditions. Unlike traditional Ukrainian diagnostic practices relying solely on specialised track-measurement wagons, the proposed approach allows obtaining primary acceleration signals from standard rolling stock without the need for dedicated measuring equipment.

The experiment was carried out on an operational railway section that included straight segments, curves of various radii, turnouts, joints, and areas with local surface defects, ensuring the representativeness of the collected data. To provide accurate spatial reference, the track was geodetically surveyed using a GNSS tracker, with more than 500 control points recorded and subsequently refined in QGIS. During the experimental run, an additional IMU sensor was mounted on the rail joint to capture impact loads and enable simultaneous observation of the track and wheelset responses.

Sensor mountings were specially designed and pre-tested on access tracks to ensure stable fixation, resistance to vibration, and correct orientation in real-life conditions. Two positioning

*devices were applied: the ibag Dakar Pro for geodetic referencing and the Columbus P-1 Mark II for continuous tracking of wagon movement during the experiment. Data collection involved autonomous recording of IMU signals and GNSS coordinates, followed by initial processing that included time synchronisation, data trimming, resampling, and segmentation by track markers.*

*The acquired dataset demonstrates clear acceleration signatures corresponding to rail joints, turnouts, and local surface defects, as well as a consistent relation between peak amplitudes and train speed. These results confirm the feasibility of using axle-box IMU measurements on freight rolling stock as a basis for further development of indirect diagnostic methods. The obtained primary data form a foundation for subsequent detailed analysis of vibrations and for future research aimed at deriving track geometry parameters and identifying early signs of infrastructure degradation.*

**Keywords:** *track geometry, IMU sensors, accelerometers, rolling stock dynamics, wheel–rail interaction, track measuring vehicle, track irregularities.*

**Вступ.** Забезпечення належного технічного стану залізничної колії є важливою умовою безпеки руху та ефективності функціонування залізничного транспорту. Традиційні методи оцінювання геометрії колії в Україні та багатьох інших країнах ґрунтовані на використанні спеціалізованих вагонів-колієвимірювачів, які забезпечують високу точність, але мають низку обмежень: значна вартість, складність експлуатації та низька періодичність [1, 2, 4]. У сучасних дослідженнях спостерігають стійку тенденцію щодо впровадження бортових сенсорних систем, які допомагають отримувати дані під час звичайної експлуатації рухомого складу та забезпечують більшу частоту моніторингу [4-6, 11-13].

У зв'язку з цим виникла ідея створення і тестування вимірювальної системи, здатної реєструвати динамічну реакцію вантажного вагона на нерівності колії в режимі реальної експлуатації. Висока періодичність вимірювань є важливою, оскільки стан колії може змінюватися навіть після коротких інтервалів пропускання поїздів через накопичення залишкових деформацій баласту і розвиток локальних дефектів. Крім того, встановлення датчиків на вантажний вагон дає змогу оцінювати колію за умов реального осьового навантаження та реальної динаміки взаємодії «колесо-рейка», що є принциповою перевагою порівняно з безвантаженими методами. Простота і

швидкість монтажу IMU, відносно невисока вартість обладнання та можливість повторного використання конструкції роблять запропонований підхід не лише діагностичним інструментом, але й універсальною дослідницькою платформою для подальших експериментів і аналізу взаємодії «колесо-рейка».

Важливою складовою сучасних систем збору динамічних сигналів є точна прив'язка вимірювань до місцевості. Для цього в багатьох дослідженнях застосовано GPS/GNSS-приймачі [1, 3-7, 9, 11, 14-16], які забезпечують синхронізацію IMU-даних із положенням вагона на колії та допомагають виявляти просторові закономірності між показниками прискорень і фактичними елементами залізничної колії. Це підтверджує, що інтеграція інерціальних вимірювань із навігаційними даними є одним з актуальних напрямів розвитку непрямих методів контролю геометричного стану колії.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У сучасних наукових дослідженнях, присвячених контролю стану залізничної колії, усе частіше застосовують інерціальні вимірювальні блоки (IMU), які дають змогу реєструвати реакцію рухомого складу на нерівності колії в реальних умовах експлуатації. У низці оглядових робіт відзначено підвищений інтерес до компактних акселерометрів і гіроскопів, що можна використовувати як на спеціалізованих вимірювальних

платформах, так і звичайному рухомому складі [1, 7, 15]. Перевагою таких систем є регулярний моніторинг без використання вагонів-колієвимірювачів, що значно знижує вартість діагностування інфраструктури.

У роботах [1, 7, 16] зазначено, що акселерометри є одним з основних інструментів для діагностики широкого спектра елементів інфраструктури: дефектів поверхні кочення, пошкоджень коліс і буксових вузлів; оцінювання профілю рейок і проявів втомних пошкоджень від кочення; контролю геометрії колії та реєстрації прискорень, пов'язаних із взаємодією «колесо–рейка». Додатково, згідно з аналізом, наведеним у роботі [16], акселерометри є найпоширенішими сенсорами в сучасних дослідженнях — їх застосовують приблизно в 30 % публікацій. Також там зазначено, що 39 % робіт базовані на використанні бортового обладнання на рухомому складі, що підтверджує актуальність підходів, орієнтованих на встановлення сенсорів на вагони або локомотиви.

У частині досліджень для підвищення точності просторової прив'язки даних IMU застосовують супутникові системи позиціонування — GPS або багатосистемні GNSS-приймачі — для визначення положення вагона вздовж колії, фіксації моментів проходження стиків, стрілочних переводів, кривих та інших характерних елементів інфраструктури [1, 3-7, 9, 11, 14-16]. GPS використовують значно рідше, ніж акселерометри, — приблизно у 8 % наукових публікацій із моніторингу колії, проте саме комбінацію GPS та IMU визнано оптимальною для синхронізації сигналів і забезпечення коректної геодезичної прив'язки динамічних даних до координат колії [16]. Такий підхід є актуальним і для цього дослідження, де GNSS-трекер застосовано для точного визначення положення вагона та зіставлення IMU-сигналів із фактичними геометричними параметрами колії.

У наявних дослідженнях застосовують різні підходи щодо встановлення IMU-датчиків: їх монтують на буксових вузлах, елементах візка або кузові вагона [4]. Вибір точки встановлення суттєво впливає на характер отриманих сигналів, оскільки всі частини вагона по-різному сприймають вертикальні та горизонтальні навантаження і гасять коливання, що виникають зі взаємодією «колесо–рейка».

Серед наведених підходів монтаж IMU на буксовому вузлі вважають одним із найбільш ефективних для реєстрації динаміки, пов'язаної саме з нерівностями колії. Це пояснюють тим, що букса розташована найближче до точки контакту колеса з рейкою, а вплив ресорної підвіски на сигнали в цій зоні мінімальний [4, 6, 12].

Інший напрям досліджень передбачає встановлення акселерометрів безпосередньо на елементи верхньої будови колії. Так, у роботі [17] розглянуто застосування сенсорів для тривалого моніторингу стану рейок і шпал. Це дає змогу безпосередньо вимірювати ударно-вібраційні процеси в конструкції колії та визначати її фактичні демпфувальні властивості.

В актуальних роботах із моніторингу стану колії зазначено, що бортові сенсори можуть бути ефективно використані для виявлення стиків, стрілочних переводів, локальних дефектів поверхні кочення та інших аномалій [2, 3, 8, 16]. Публікації також показують, що монтаж IMU на рухомому складі забезпечує достатню точність порівняно зі спеціалізованими вимірювальними вагонами, хоча більшість таких досліджень виконано на пасажирських поїздах або спеціалізованому рухомому складі [4, 6, 11, 12].

Разом із тим питання практичної реалізації системи — вибір оптимального обладнання, конструкція кріплення, умови монтажу, стабільність роботи датчиків у жорстких умовах вантажного руху — у літературі розкриті недостатньо. Окремі роботи висвітлюють загальні підходи щодо збору даних [5, 13], однак практичні

експерименти безпосередньо на вантажних вагонах висвітлені обмежено.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є експериментальна перевірка можливості використання інерціальних вимірювальних блоків (IMU), що включають акселерометри, гіроскопи та інклінометри, встановлених на буксах колісної пари візка моделі 18-100 вантажного вагона, для оцінювання стану геометрії колії на основі аналізу динамічних параметрів руху.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі основні завдання:

1. Визначили оптимальні місця встановлення IMU-датчиків і розробили конструкцію кріплення для їх монтажу.

2. Проаналізували план і профіль дослідної ділянки колії, провели її зйомку з фіксацією довготи і широти меж пікетів, кілометрів, дефектів, стиків, меж кривих, переїздів, стрілочних переводів та інших характерних елементів.

3. Провели експериментальні вимірювання під час руху вагона по дослідній ділянці колії.

4. Виконали попередню обробку отриманих сигналів.

### Основна частина дослідження

#### 1. Вибір і технічні характеристики вимірювального обладнання

Сучасний ринок обладнання для вимірювання прискорень і просторового положення об'єктів представлений широким спектром датчиків різного рівня інтеграції, функціональності та вартості. Умовно їх можна поділити на три основні групи:

- низькорівневі (сирі) сенсори — це окремі плати тільки з акселерометрами або комбінованими датчиками типу інерціального вимірювального блока, що включає акселерометри, гіроскопи та інклінометри. Такі рішення потребують окремого контролера (наприклад на базі Arduino Uno чи ESP32) для збору та обробки даних, а також зовнішнього живлення. Перевагою є гнучкість конфігурації, але це

потребує значних витрат часу на розроблення системи;

- модулі з логером (реєстратором) — сенсори в захищеному корпусі, які не мають власної пам'яті та передають дані на зовнішній пристрій зберігання. Такі системи можуть підключати велику кількість датчиків одночасно, мають виходи під різні інтерфейси (CAN, UART тощо), але потребують зовнішнього живлення та мікропроцесора для реєстрації даних. Вони високоточні і стабільні, проте складніші в монтажі та експлуатації;

- готові автономні рішення — це повнофункціональні IMU-блоки з вбудованим живленням і внутрішньою пам'яттю, що допомагають вимірювати без підключення до комп'ютера або зовнішнього логера, мають компактний захищений корпус і забезпечують зручність монтажу. Основним обмеженням є обсяг пам'яті та час автономної роботи, але для короткотривалих експериментів такі системи є найбільш практичними.

З огляду на вимоги щодо мобільності, точності та надійності, для цього експерименту були вибрані автономні IMU-блоки WitMotion WT901SDCL, які мають такі основні характеристики:

- триосьовий акселерометр із діапазоном вимірювання  $\pm 16$  g;
- триосьовий гіроскоп із діапазоном до  $2000$  °/с;
- інклінометр із точністю  $0,05^\circ$ ;
- частота дискретизації до  $200$  Гц;
- запис даних на microSD карту для автономного збереження даних;
- підтримка калібрування та цифрової фільтрації (у тому числі фільтра Калмана);
- робочий діапазон температур від  $-40$  °C до  $+85$  °C;
- час автономної роботи до  $5$  год.

Для реєстрації динамічних параметрів руху два IMU-блоки було встановлено на буксах першої по ходу руху колісної пари вагона, симетрично з лівого та правого боку. Така конфігурація забезпечує можливість фіксації як вертикальних, так і

горизонтальних відхилень, а також допомагає аналізувати асиметрію реакцій на лівій і правій рейках під час проходження нерівностей колії. Це особливо важливо для оцінювання ізольованих дефектів і зміни геометрії колії в зоні підвищених динамічних навантажень.

Для збільшення часу автономної роботи внутрішню батарею датчиків, встановлених на буксах, було замінено на зовнішню енергетичну комірку від електромобіля Tesla. Це рішення дало змогу збільшити час безперервного функціонування з п'яти годин до приблизно трьох діб, що особливо важливо для тривалих польових експериментів.

Крім того, один додатковий IMU-датчик моделі WitMotion BWT901CL було закріплено безпосередньо в зоні рейкового стику. Завдяки цьому стало можливим фіксувати динамічну реакцію самої колії в момент проходження вагона через стик і безпосередньо порівнювати параметри коливань у рейці та колісній парі. Такий підхід підвищує точність і достовірність аналізу взаємодії системи «колесо–рейка», даючи змогу ідентифікувати вплив окремих нерівностей колії на рухомий склад.

Технічні характеристики датчика WitMotion BWT901CL:

- bluetooth IMU-датчик для бездротового передавання даних;
- триосьовий акселерометр із діапазоном вимірювання  $\pm 16$  g;

- триосьовий гіроскоп із діапазоном до 2000  $^{\circ}/\text{с}$ ;
- інклінометр із точністю 0,05 $^{\circ}$ ;
- частота дискретизації до 200 Гц;
- підтримка калібрування та цифрової фільтрації (у тому числі фільтра Калмана);
- робоча температура: -40...+85  $^{\circ}\text{C}$ ;
- час автономної роботи: до 4 год (за необхідності можливе підключення зовнішнього джерела).

## 2. Характеристика дослідної ділянки колії та прив'язка колії до системи координат

Дослідна ділянка колії – одна з найбільш поширених конструкцій залізничної колії в Україні, експлуатована в умовах, близьких до типових для вантажного руху. Ділянка, загальною довжиною 12,433 км, включає як прямі, так і криві відрізки, щоб дослідити реакцію системи «колесо–рейка» в різних умовах взаємодії та забезпечити репрезентативність отриманих даних. Основні характеристики кривих ділянок колії наведено в таблиці.

Конструкція верхньої будови колії на більшій частині ділянки – це рейки типу Р65, укладені на залізобетонних шпалах із використанням скріплень типу КБ65. Баласт – щебневий, із різним ступенем засміченості. На кривій малого радіуса (250 м) вкладено дерев'яні шпали та збільшено ширину колії до 1540 мм.

Таблиця

Технічні характеристики кривих ділянок колії на дослідній ділянці

Характеристика	Крива 1	Крива 2	Крива 3	Крива 4	Крива 5	Крива 6	Крива 7
Радіус кривої, м	501	822	250	963	526	975	931
Довжина кругової кривої, м	372,4	220	296,4	285,8	120,6	319,6	153,6
Довжина перехідних кривих, м	60 95	105 75	75 120	90 120	105 90	90 90	115 105
Підвищення зовнішньої рейки, мм	75	40	60	65	65	75	30
Ширина колії в кривій, мм	1520	1520	1540	1520	1520	1520	1520

Дослідну колію складають як безстикові, так і ланкові ділянки. Безстикова колія має велику кількість тимчасово відновлених місць. Така комбінація дає змогу простежити вплив різних конструктивних особливостей на динамічну взаємодію рухомого складу з колією, зокрема в зоні стиків. Пропущений тоннаж на різних відрізках ділянки становить від 320 до 850 млн т, що зумовлює різний технічний стан рейкової решітки та наявність дефектів на поверхні кочення рейок.

Вантажонапруженість становить 10,2 млн ткм/км на рік. Встановлена експлуатаційна швидкість пасажирських і вантажних поїздів — 80/60 км/год, на окремих ділянках — 40/40 км/год.

Через пропущений тоннаж і відсутність капітальних ремонтів у попередні роки на окремих відрізках колії зафіксовано значну кількість локальних дефектів поверхні кочення рейок — дефекти 17.1, 17.2, 18.1, 37.2. Очікують, що ці дефекти будуть чітко відображені на графіках прискорень у вигляді пікових значень під час проходження колісної пари через зону дефекту.

Додатковими інфраструктурними елементами є стрілочні переводи марки 1/11, які також є зонами підвищених динамічних навантажень і будуть зафіксовані ІМУ-датчиками як характерні сигнатури.

Для забезпечення високої точності аналізу динамічних параметрів руху було виконано геодезичну прив'язку всієї дослідної ділянки колії до системи географічних координат. Усі характерні елементи — пікети, кілометрові знаки, рейкові стики, початки та кінці кривих, стрілочні переводи, переїзди та інші контрольні точки — були промарковані із зазначенням широти і довготи в єдиній системі координат WGS84. Це допомогло синхронізувати показання ІМУ-датчиків із точним положенням вагона на колії та виконати коректне співставлення з

результатами вимірювань колієвимірювального вагона.

Для виконання зйомки застосовано трекер українського виробництва Dakar Pro від компанії IBAG, який забезпечує визначення положення об'єкта з високою точністю і відображення супутникових знімків місцевості в режимі реального часу. У процесі робіт було зафіксовано 500 геодезичних точок уздовж дослідної ділянки. Подальше корегування положення точок і побудову траси виконували в середовищі QGIS, що дало змогу уточнити просторові координати 113 точок із точністю до 0,5 м.

Для визначення просторового положення вагона під час експерименту використовували професійний GNSS-логер Columbus P-1 Mark II. Цей пристрій підтримує одночасну роботу з 89 супутниками, включаючи GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou і QZSS, що забезпечує високу точність позиціонування в будь-яких умовах.

Перед проведенням експерименту протестували різні режими роботи пристрою. Встановлено, що максимальна робоча частота логера становить 10 Гц, проте в цьому режимі пристрій використовує лише супутники GPS, що зменшує кількість видимих супутників і може погіршувати стабільність і точність визначення координат.

Натомість режим 5 Гц забезпечує одночасне використання всіх доступних супутникових угруповань (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS), що суттєво підвищує точність і надійність просторової прив'язки вагона. Через це для експериментальних вимірювань вибрали саме режим 5 Гц, який забезпечував оптимальний баланс між частотою оновлення та якістю позиціонування. У цьому режимі логер записував дані у форматі NMEA, включаючи повідомлення GGA, RMC, GSV і GSA, що містять координати, висоту, час, кількість задіяних супутників, HDOP/PDOP, швидкість і курс

руху. Така конфігурація забезпечила необхідну деталізацію та надійність вимірювань для подальшого аналізу.

### 3. Підготовка до проведення експерименту, розроблення кріплень і тестові вимірювання

Для забезпечення надійної фіксації датчиків на брусах колісної пари та точності отриманих вимірювань була розроблена спеціальна конструкція кріплення (рис. 1). ІМУ-датчики встановлювали на сталевій пластині, яка надійно зафіксована до букси колісної пари за допомогою трьох неодимових магнітів у корпусі С48, кожен магніт забезпечує зусилля на відрив до 92 кг. Між магнітами та пластиною розташовували поліуретанові шайби товщиною 4 мм. Таке рішення виконувало одразу кілька важливих функцій: по-перше, поліуретан частково гасив шум і шкідливі вібрації, що виникають під час проходження коліс по нерівній колії, зменшуючи вплив вторинних коливань на показання датчиків. По-друге, пружна деформація шайб давала змогу точно позиціонувати датчик під час монтажу, а також регулювати нахил пластини під час затягування гайок, що забезпечувало коректне орієнтування сенсора у трьох площинах.

Конструкція кріплення GPS-трекера була виконана за аналогічним принципом. Трекер монтували на сталевій пластині, яку утримували два магніти, і встановлювали на

середньому обв'язувальному брусі торцевої стінки вагона, по осі колії (рис. 2). Усі магніти в конструкціях закріплювали самоконтрлювальними гайками, що виключало їх розгвинчування під дією вібрацій, характерних для руху рухомого складу.

Таке технічне рішення виявилось надзвичайно практичним. Воно поєднувало простоту монтажу і демонтажу з високою надійністю фіксації, а також давало змогу корегувати положення датчиків без ризику їх зміщення під час руху. Крім того, універсальність конструкції сприяє її використанню для різних типів датчиків і трекерів, що робить її придатною для подальших експериментів на інших вагонах або візках.

Перед проведенням основного експерименту було виконано серію тестових вимірювань, спрямованих на перевірку роботи системи та відпрацювання процедур монтажу. Тести проводили на під'їзних коліях приватного підприємства. Датчики були встановлені на вагон, а рух здійснював трактор Т-241 К, обладнаний комбінованим колісно-рейковим ходом, автозчепними пристроями та пневматичними гальмами. Для тестів використана ділянка довжиною близько 300 м, що давало змогу безпечно і повторювано перевіряти конструкцію кріплення та поведінку датчиків за різних умов руху (рис. 1).



Рис. 1. Тестування надійності кріплення та режимів роботи датчиків



Рис. 2. Зліва IMU-датчик, встановлений на ліву буксу колісної пари; справа GNSS-трекер, встановлений на торцеву стінку напіввагона

Під час тестових заїздів були відпрацьовані всі важливі аспекти експериментальної установки. Було визначено остаточну конструкцію кріплення датчиків, вироблено покрокові процедури монтажу і налаштування, протестовані різні режими роботи ІМУ. Особливу увагу приділяли перевірці надійності фіксації під час ударно-динамічних навантажень, контролювали відсутність зміщень датчиків, що могло б спотворити результати вимірювань.

Одним із результатів тестів стало отримання перших даних про реакцію колісних пар на нерівності колії. Виявилося, що пікові значення сигналів датчиків чітко співпадають із моментами ударів коліс у стиках рейок. Проходження стрілочних переводів також відображено було на сигналах у вигляді характерної сигнатури, яку заплановано детально дослідити в основному експерименті. Було також зафіксовано закономірне збільшення амплітуди сигналу зі зростанням швидкості руху. Крім того, під час тестів накопичено важливий досвід роботи з первинними файлами даних, які записують датчики, що значно спрощує подальшу обробку та аналіз вимірювань.

Отже, проведені попередні тестові заїзди дали змогу не лише відпрацювати технічні аспекти кріплення та налаштування датчиків, а й отримати перші надійні сигнали, що демонструють коректну роботу

системи та готовність її до основного експерименту на дослідній ділянці колії.

#### **4. Проведення основного експерименту, збір і первинна обробка даних**

Експериментальні дослідження проводили на вантажному напіввагоні моделі 12-7019, виготовленому на Крюківському вагонобудівному заводі 19.10.2019 року. Перед початком вимірювань вагон мав свіжий деповський ремонт (08.10.2025), у рамках якого було виконано відновлення робочих поверхонь литих деталей візка, заміну п'ятників, встановлено нові колісні пари, а також увесь комплекс регламентних робіт відповідно до вимог СТП 04-032:2020. Технічний стан вагона відповідав нормативним показникам, що забезпечувало достовірність отриманих результатів. Обладнання, встановлене на дослідному вагоні, показано на рис. 2.

Усі вимірювання виконували на порожньому вагоні з тарою 21,5 т, що давало змогу дослідити реакцію системи «колесо–рейка» за умов мінімального статичного навантаження. Діаметр колісних пар становив: КП1 – 959 мм, КП2 – 959 мм, КП3 – 939 мм, КП4 – 939 мм. Пробіг вагона після ремонту на момент експерименту становив 3270 км, тобто візок і колісні пари перебували у справному технічному стані та мали мінімальний знос робочих поверхонь.

Вагон був оснащений візком моделі 18-100 – однією з найпоширеніших

конструкцій у вантажному русі на залізницях України. Візок має двовісну схему, класичну ресорну підвіску та бічні фрикційні гасники коливаль, які забезпечують базову стабільність руху, але водночас чутливо реагують на зміни геометрії колії. Така чутливість робить його зручним об'єктом для дослідження динаміки взаємодії «колесо–рейка» і формування сигналів, що реєструють інерціальні вимірювальні блоки.

Завдяки поєднанню справного технічного стану вагона, нових колісних пар і мінімального пробігу після останнього планового ремонту отримані під час експерименту дані можна вважати репрезентативними, оскільки мінімальний рівень власних коливаль рухомого складу забезпечив коректність фіксації динамічної реакції на нерівності колії.

На вибраний вагон, що прямував у напрямку дослідної ділянки, було встановлено IMU-датчики та GPS-трекер. Два датчики закріпили на боксах лівого і правого колеса першої по ходу руху колісної пари, а третій — у зоні рейкового стику. Для цього вибрали перший від пліти безстикової колії стик у зрівнювальному прогоні, що дало змогу однозначно ідентифікувати його та зіставити сигнали всіх трьох сенсорів.

Після монтажу виконали базове калібрування датчиків для фіксації їхнього початкового положення та синхронізували внутрішній час вимірювальних модулів, що забезпечило узгодженість записів і коректне порівняння сигналів між ними.

Після проходження поїзда по всій дослідній ділянці обладнання було демонтовано, а виміряні дані збережено для подальшої обробки. Первинну обробку даних виконували за таким алгоритмом:

1. Синхронізація з трекером – за записами GPS-трекера визначали часові мітки проходження вагоном пікетів, кілометрових знаків та інших контрольних точок.

2. Очищення даних – видалення з масивів даних інформації, зафіксованої до моменту прибуття поїзда на ділянку дослідження та після його повного проходження. Такий крок дає змогу зменшити обсяг даних, зосередитися лише на інформативній частині записів і підвищити ефективність подальшої обробки.

3. Ресемплінг – вирівнювання частоти дискретизації між усіма каналами даних. Оскільки різні датчики можуть мати різну частоту дискретизації або незначні часові зсуви між собою, ресемплінг дає змогу узгодити часові шкали та отримати єдину частоту вибірки.

4. Розбиття масиву даних – отримані масиви прискорень з IMU-датчиків поділяли на фрагменти відповідно до часових інтервалів окремих кілометрів колії.

5. Попередній аналіз сигналів – виявлення пікових значень, характерних для проходження стиків, стрілочних переводів і локальних дефектів поверхні кочення. На рис. 3 зображено фрагмент записаних значень вертикальних прискорень.

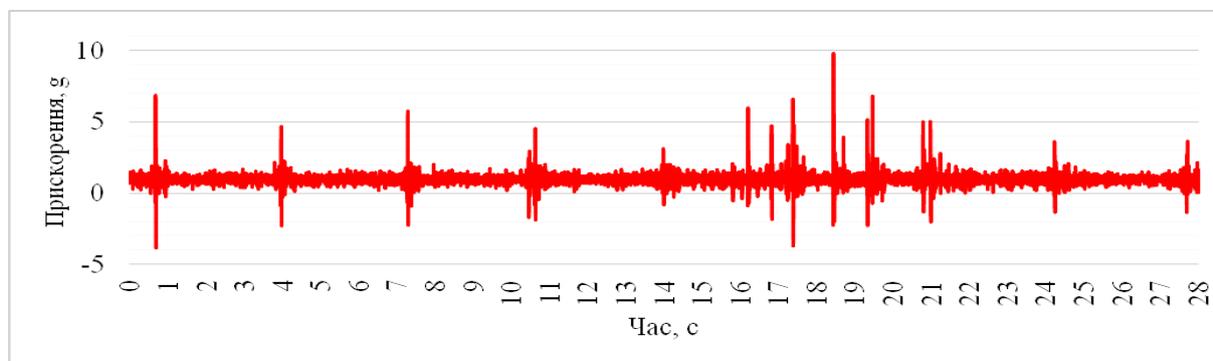


Рис. 3. Графік вертикальних прискорень, виміряних IMU-датчиком на правій буксі колісної пари

Окремо слід виділити можливості ІМУ-датчика, встановленого безпосередньо в зоні рейкового стику. У разі проходження поїзда з 54 вагонами цей датчик дає змогу зафіксувати:

- чітку послідовність імпульсних навантажень від кожної колісної пари, щоб точно визначити кількість осей і часові інтервали між ними;
- зміну амплітуди прискорень уздовж складу поїзда, що дає інформацію про зміну ударних навантажень у процесі проходження (наприклад порівняти дію локомотива, першого і останнього вагонів);
- характер затухання коливань у рейці після кожного удару, що може бути використано для оцінювання демпфувальних властивостей колії і стану баласту;
- різницю між динамічними силами, які виникають у рейковому стику та колісній парі в один момент часу;

- оцінити повторюваність сигналів, що важливо для побудови статистичних моделей накопичення пошкоджень за багаторазових навантажень.

Отже, датчик у стику не лише допомагає синхронізувати сигнали з буксовими датчиками, але й надає окремий масив даних, який можна використати для оцінювання ударного навантаження на елементи верхньої будови колії та порівняння поведінки різних вагонів. На рис. 4 зображено графік вертикальних прискорень, зафіксованих ІМУ, який було встановлено в зоні рейкового стику.

Завдяки такому підходу стало можливим не лише виявити і локалізувати ділянки з дефектами чи нерівностями, але і визначити характер їхнього впливу на динаміку руху вагона та розвиток залишкових деформацій колії.

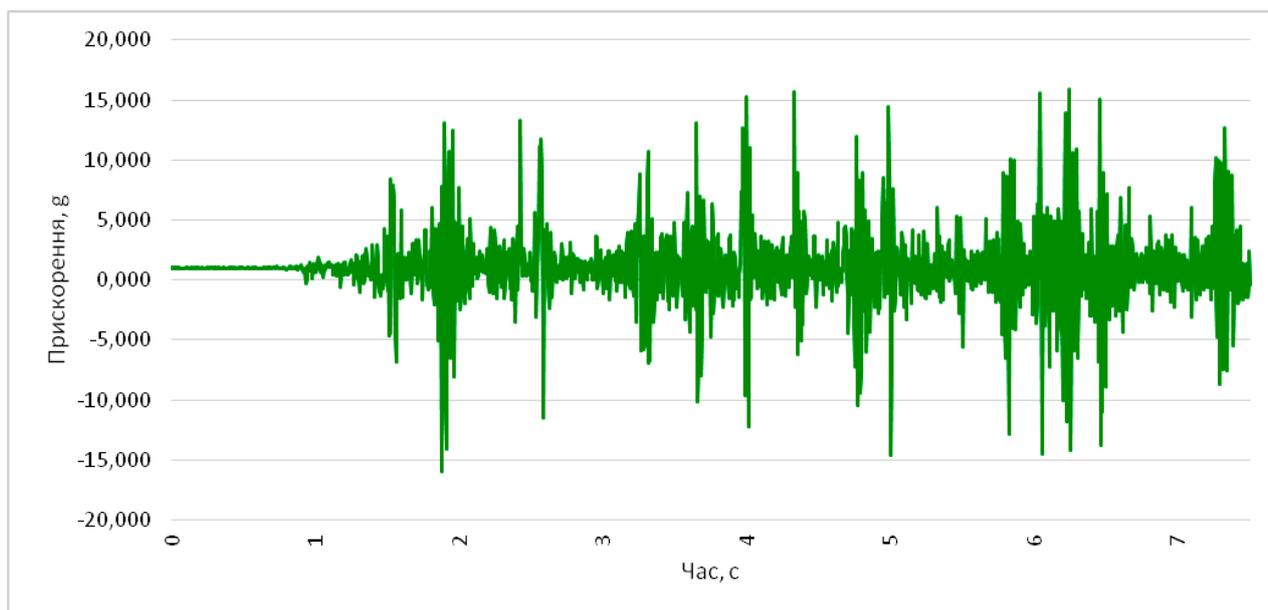


Рис. 4. Графік вертикальних прискорень, виміряних ІМУ-датчиком, установленим у рейковому стику

У результаті експерименту було отримано повний комплекс даних, необхідних для подальшого аналізу динамічної взаємодії «колесо–рейка» і оцінювання геометричних параметрів колії.

GNSS-трекер забезпечив точну фіксацію положення вагона з мінімальними похибками. Середня швидкість руху на дослідній ділянці становила 29,8 км/год,

максимальна – 50,5 км/год, мінімальна – 11,6 км/год.

Середня втрата даних із технічних причин під час запису IMU становила 0,24–0,31 %, що свідчить про стабільну роботу вимірювального обладнання та мінімальні технологічні втрати в реальних умовах руху. Середній просторовий крок вимірювання становив приблизно 4,1 см, що забезпечувало достатню деталізацію для реєстрації ударно-вібраційних процесів.

**Висновки.** Попередній аналіз сигналів, отриманих від інерціальних вимірювальних блоків (IMU), підтвердив працездатність створеної вимірювальної системи та її здатність стабільно реєструвати динамічну реакцію візка в реальних умовах руху вантажного вагона. Було зафіксовано характерні пікові компоненти прискорень у зонах стиків, стрілочних переводів і локальних нерівностей колії, а також чітко виявлено залежність амплітуди сигналів від швидкості руху та інфраструктурних умов.

Запропонована методика збору даних продемонструвала ефективність роботи автономних IMU-модулів і GPS/GNSS-пристроїв, а також коректність їхньої просторової прив'язки до координат маркерних точок, зафіксованих під час геодезичної зйомки дослідної ділянки. Отримані первинні дані мають достатню структуру та роздільну здатність для подальшої технічної інтерпретації та поглибленого аналізу.

Результати експерименту підтверджують можливість використання IMU-датчиків, установлених на буксових вузлах, для реєстрації коливань, зумовлених нерівностями колії, а також доцільність установлення додаткового датчика безпосередньо в рейковому стику для порівняння динамічних процесів у рейці та колісній парі. Така комбінація відкриває перспективи для формування комплексного масиву даних про стан колії під навантаженням.

Розроблену систему не можна вважати повноцінною заміною або альтернативою колієвимірювальному вагону, однак отримані результати можуть бути корисними для уточнення механізмів появи та розвитку несправностей, що в подальшому дасть змогу більш точно та ефективно прогнозувати зміну стану колії під час експлуатації.

Подальші дослідження передбачають поглиблений аналіз отриманих сигналів, включаючи спектральні та часово-частотні перетворення, визначення критичних частот, оцінювання нерівностей у поздовжньому і поперечному профілях, а також розроблення алгоритмів автоматизованого виявлення дефектів. У перспективі методика може бути використана як база для створення інструментів прогнозування розвитку дефектів і впровадження елементів систем превентивного утримання залізничної інфраструктури.

### Список використаних джерел

1. Falamarzi A., Moridpour S., Nazem M. A Review on Existing Sensors and Devices for Inspecting Railway Infrastructure. *Jurnal Kejuruteraan*. 2019. Vol. 31, No. 1. P. 1–10. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31\(1\)-01](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31(1)-01).
2. Kanis J., Zitrický V., Hebelka V., Lukáč P., Kubín M. Innovative Diagnostics of the Railway Track Superstructure. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 53. P. 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.017>.
3. Fortunato E., Pinelo A., Lobo da Costa J., Gonçalves D., Pratas A. Some Results of Performance Indicators of a Railway Track Obtained During Its Renewal Process. In: 4th International SIV Congress, Palermo, Italy, 12–14 September 2007.

4. Tsunashima H., Ono H., Takata T., Ogata S. Development and Operation of Track Condition Monitoring System Using In-Service Train. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 3835. <https://doi.org/10.3390/app13063835>.
5. Karis T. Correlation between Track Irregularities and Vehicle Dynamic Response Based on Measurements and Simulations. Licentiate thesis. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2018.
6. Chudzikiewicz A., Bogacz R., Kostrzewski M., Konowrocki R. Condition Monitoring of Railway Track Systems by Using Acceleration Signals on Wheelset Axle-Boxes. *Transport*. 2018. Vol. 33, No. 2. P. 555–566. <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1342101>.
7. Kostrzewski M., Melnik R. Condition Monitoring of Rail Transport Systems: A Bibliometric Performance Analysis and Systematic Literature Review. *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 4710. <https://doi.org/10.3390/s21144710>.
8. Wikaranadhi P., Alfian S. D., Handoko Y. A., Palar P. S. Railway Track Vertical Irregularities Classification Based on Vehicle Response Using Machine Learning Method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2739. P. 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2739/1/012054>.
9. Chen X., Chai X., Cao X. The Time-Frequency Analysis of the Train Axle Box Acceleration Signals Using Empirical Mode Decomposition. *Computer Modelling & New Technologies*. 2014. Vol. 18, No. 7. P. 356–360.
10. Istiar I., Widyastuti H. Review Study of Irregularity Track Monitoring Based on Inertial Measure Unit and Power Spectral Density Analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 650. P. 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/650/1/012046>.
11. Tsunashima H., Naganuma Y., Kobayashi T. Track Geometry Estimation from Car-Body Vibration. *Vehicle System Dynamics*. 2014. DOI: 10.1080/00423114.2014.889836.
12. Bosso N., Gliotta A., Magelli M., Zampieri N. Monitoring of Railway Freight Vehicles Using Onboard Systems. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 24. P. 692–705. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.061>.
13. Sysyn M., Gerber U., Kluge F., Nabochenko O., Kovalchuk V. Turnout Remaining Useful Life Prognosis by Means of On-Board Inertial Measurements on Operational Trains. *International Journal of Rail Transportation*. DOI: 10.1080/23248378.2019.1685918.
14. Chia L., Bhardwaj B., Lu P., Bridgelall R. Railroad Track Condition Monitoring Using Inertial Sensors and Digital Signal Processing: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2018. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2875600>.
15. Bravo I., Alvarado U., Nieto J., Ciaurriz P. On-Board Accelerometers in Railway Track Condition Monitoring: A Systematic Review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2025. Vol. 33. P. 101572. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101572>.
16. Gonzalo A. P., et al. Railway Track and Vehicle On-Board Monitoring: A Review. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 409. P. 02014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340902014>.
17. Kurhan D., Kovalchuk V., Markul K., Kovalskyi A. Development of Devices for Long-Term Railway Track Condition Monitoring: Review of Sensor Varieties. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2025.

---

Вітольберг Володимир Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730 10 60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Чесак Сергій Сергійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (098) 910 38 67. E-mail: serheychesak@gmail.com.

---

Vitolberg Volodymyr, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730 10 60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Chesak Serhii, postgraduate student of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (098) 910 38 67. E-mail: serheychesak@gmail.com.

Статтю прийнято 15.12.2025 р.

УДК 629.424:62-83:629.4.001.63:629.4.001.24

## АРХИТЕКТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ІНТЕГРАЦІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ У PLUG-IN ГІБРИДНІ ТЯГОВІ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Канд. техн. наук А. С. Маслій, д-р техн. наук С. Г. Буряковський, аспіранти В. А. Геврасьов, Р. М. Антоненко, канд. техн. наук А. С. Маслій, А. Ю. Жуков

## ARCHITECTURAL AND TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF INTEGRATING ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS INTO PLUG-IN HYBRID TRACTION SYSTEMS OF RAILWAY TRANSPORT

Ph.D. A. Maslii, Dr.Sc. S. Buriakovskiy, Ph.D Student V. Gevrasov, Ph.D Student R. Antonenko, Ph.D. A. Maslii, A. Zhukov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351906>

*Анотація.* Мета цієї наукової статті — систематичний архітектурно-технологічний аналіз інтеграції електрохімічних накопичувачів енергії (ESS) у тягові системи plug-in гібридного рухомого складу (РС) залізничного транспорту. Методологія ґрунтована на узагальненні схемотехнічних рішень, зокрема топологій двонаправлених DC-DC перетворювачів (BDC) і систем керування батареєю (BMS), а також порівняльному аналізі технічних параметрів літій-іонних електрохімічних елементів (Li-Ion). Отримані результати демонструють критичну важливість ізольованих BDC (наприклад Dual Active Bridge – DAB) для забезпечення та ефективності рекуперації у високовольтних системах. Підтверджено доцільність використання SiC-технологій для підвищення питомої потужності та необхідність високої точності BMS (1 %) для максимізації ефективного діапазону використання ємності батареї. Зроблено висновок, що оптимальна архітектура ESS для залізничних застосувань має ґрунтуватися на гібридизації елементів (NMC, LFP, LTO) і застосуванні проактивних систем керування (MPC). Сфера застосування результатів включає проектування та модернізацію енергоефективного залізничного РС із метою зниження споживання палива та експлуатаційних витрат.

*Ключові слова:* BMS, ESS, SiC MOSFET, plug-in гібридні тягові системи, DC-DC перетворювач, керування з прогнозуючою моделлю, літій-іонні технології.

*Abstract.* The global energy transition necessitates innovative solutions to reduce fossil fuel dependence in the railway sector. This paper analyzes the architectural integration of electrochemical On-board Energy Storage Systems into plug-in hybrid traction systems. The

*objective is to formulate an engineering approach for energy-efficient rolling stock operating on high-voltage networks (3 kilovolts) and autonomous power. The methodology synthesizes circuit designs, focusing on Bidirectional Direct Current converter topologies and Battery Management Systems. It compares Lithium-Ion cells (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide, Lithium Iron Phosphate, Lithium Titanate Oxide) to identify suitable heavy-duty configurations. The study identifies isolated Bidirectional Direct Current converters, specifically the Dual Active Bridge topology, as critical for safety in high-voltage environments. It substantiates the transition to Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors, reducing switching losses by 50–70 % versus Insulated-Gate Bipolar Transistors. However, switching frequencies must be limited to 1.5–2 kilohertz to comply with EN 50121 Electromagnetic Compatibility standards. The analysis shows mono-chemical Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide batteries are unsuitable due to thermal risks. Instead, a hybrid architecture combining Lithium Iron Phosphate for capacity and Lithium Titanate Oxide for peak power is proposed. Traditional Proportional-Integral-Derivative regulators are deemed insufficient for complex hybrids; the study advocates for Model Predictive Control to optimize energy flow based on route topography. Furthermore, a modular Battery Management System with high precision (1%) is required to maximize battery range. The optimal architecture integrates an isolated Silicon Carbide converter, a hybrid Lithium Iron Phosphate and Lithium Titanate Oxide battery, and Model Predictive Control, ensuring balanced safety, efficiency, and cost.*

**Keywords:** Battery Management Systems, Energy Storage Systems, plug-in hybrid traction systems, DC-DC converter, Model Predictive Control, Li-Ion technologies, Hybrid Energy Storage.

**Вступ.** Енергетичний перехід у транспортній галузі потребує впровадження інноваційних рішень, спрямованих на зменшення залежності від викопного палива, підвищення загальної енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат. Для залізничного транспорту перспективним напрямом вирішення цих завдань є розроблення та інтеграція гібридних тягових систем, зокрема plug-in конфігурацій. Головним в архітектурі таких систем є бортова система накопичення енергії (OESS), яка працює в тандемі з первинним джерелом (наприклад дизель-генераторною установкою – ДГУ, або контактною мережею).

Основна функціональність ESS полягає в утилізації кінетичної енергії, рекуперованої під час гальмування, і компенсації пікових навантажень (peak shaving) із розгоном. Ефективна реалізація цих функцій залежить від складної взаємодії між електрохімічними елементами, високоточними BMS і потужними BDC. Для використання на залізницях компоненти мають відповідати жорстким вимогам, наприклад через високі робочі напруги (до

3 кВ), значні струмові імпульси і необхідність безкомпромісної надійності та безпеки. Дослідження, наведене в цій статті, зосереджене на систематизації та аналізі цих важливих інженерних рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні тенденції в електрифікації та гібридизації залізничного транспорту потребують ґрунтовного аналізу архітектурних і технологічних рішень, що формують основу бортових систем накопичення енергії (OESS). Питанням загальної структури і термінології ESS присвячені фундаментальні праці, зокрема стандарт ІЕС 62933-1 [1] і дослідження Lawder et al. [2], які систематизують компоненти батарейних накопичувачів енергії (BESS) для великомасштабних застосувань, включаючи залізничні системи.

Схемотехнічні аспекти керування ESS розглянуто в роботах Gabbar et al. (2021) [3] і Lelie et al. (2018) [4], які деталізують архітектури BMS (централізована, модульна, розподілена) і вимоги щодо їхньої елементної бази, включаючи підвищення завадостійкості і точності вимірювань. Аналізували топології

гібридних силових установок, що визначають вимоги щодо енергетичних вузлів, Божко та Леонов (2016) [5] акцентуючи на послідовних, паралельних і послідовно-паралельних схемах.

Роль BDC як активного інтерфейсу для рекуперації висвітлена в роботах Krismer & Kolar (2011) [6] і Lee et al. (2015) [7], де досліджено ізольовані (DAB) і неізольовані топології. Окремим напрямом є впровадження SiC MOSFET, що дає змогу покращити характеристики перетворювачів, проте потребує суворого дотримання стандартів EMC (EN 50121) [8]. Вибір електрохімічної системи базований на компромісі між питомою енергією та безпекою, що підтверджено порівняльним аналізом NMC, LFP і LTO технологій.

Практичну реалізацію цих тенденцій демонструють комерційні рішення. Зокрема, Siemens SITRAC використовує інтегрований підхід із потужною ланкою постійного струму на базі високовольтних IGBT, тоді як Alstom MITRAC Energy Saver сфокусований на застосуванні суперконденсаторів, що забезпечує економію до 30 % енергії для інтенсивних циклів руху. Ефективність впровадження гібридних систем для приміського, магістрального та кар'єрного транспорту також детально проаналізована в роботах [9–11].

Проте, незважаючи на значну кількість публікацій і наявність комерційних продуктів, існує потреба в комплексному узагальненні архітектурних рішень, що охоплюють узгоджену роботу BMS, BDC і гібридизованих накопичувачів саме в жорстких експлуатаційних умовах залізничного транспорту, що і стало основою цього дослідження [12].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є комплексний архітектурно-технологічний аналіз сучасних рішень для інтеграції електрохімічних накопичувачів енергії у plug-in гібридний тяговий РС.

Для досягнення цієї мети було визначено такі завдання:

1. Систематизувати схемотехнічні рішення, які використовують у накопичувачах енергії, включаючи топології BMS та BDC.

2. Порівняльний аналіз технічних параметрів і властивостей основних елементів для накопичувачів енергії, обґрунтувавши їхню доцільність для залізничних застосувань.

### **Основна частина дослідження**

#### **1. Загальна структура підсистем електрохімічних накопичувачів енергії**

Відповідно до стандарту IEC 62933-1, архітектура BESS декомпована на функціональні підсистеми: акумулявання (батарейні модулі), перетворення енергії (PCS/BDC) і керування (BMS, Energy Management System). Для залізничних застосувань критичними є підсистеми захисту і комунікації, які забезпечують інтеграцію накопичувача у високовольтну тягову мережу та гарантують безпеку за аварійних режимів (тепловий розгін, надструми).

#### **2. Архітектурні принципи гібридних тягових систем і BDC**

**Топології гібридних силових установок.** Архітектура гібридної установки визначає режим роботи BDC: у послідовній схемі він працює в умовах відносно стабільної напруги, виконуючи прості завдання компенсації та рекуперації. Паралельна конфігурація є складнішою через прямий механічний зв'язок двигунів, змушуючи конвертор працювати з динамічними навантаженнями та значними коливаннями напруги. Найвищі вимоги має послідовно-паралельна схема, де BDC потребує інтелектуальної системи для координації енергопотоків у реальному часі [13].

**Роль двонаправленого DC-DC перетворювача (BDC).** BDC є активним інтерфейсом між високовольтною тяговою шиною (DC-Link) і низьковольтною шиною ESS. Його головна функція полягає у двонаправленому керуванні потоками потужності: у режимі рекуперації (Buck) він забезпечує стабілізований заряд

накопичувача, знижуючи напругу контактної мережі, а в режимі тяги (Boost) – компенсує пікові навантаження, стабілізуючи напругу на тягових двигунах. Це дає змогу зменшити встановлену потужність первинного джерела та оптимізувати масогабаритні показники силової установки. Інтеграція BDC перетворює накопичувач на активний керований елемент силової системи, що є важливим для оптимізації споживання палива та підвищення загального ККД РС.

### 3. Підсистема контролю та керування (BMS)

Надійна BMS (Battery Management System) є критичною умовою безпечної експлуатації літєвих накопичувачів, особливо для умов високих напруг залізничного транспорту. Вибір архітектури базований на аналізі вимог щодо відмовостійкості, вартості та складності монтажу. Порівняння основних топологій наведено в табл. 1, а їхнє схематичне зображення подано на рис. 1 [14].

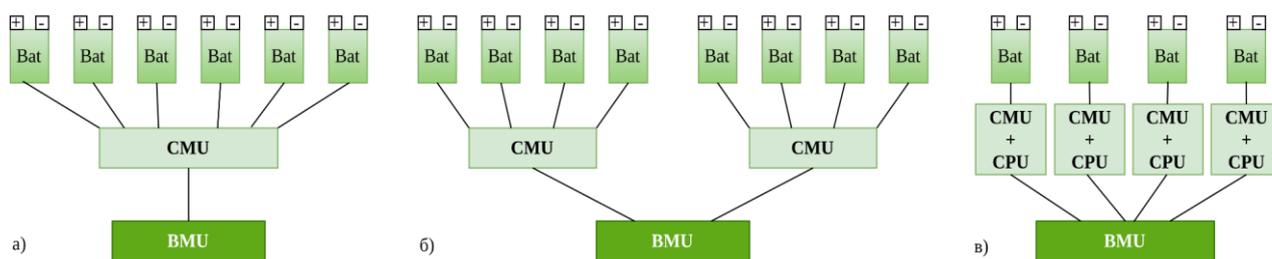


Рис. 1. Типи архітектур побудови BMS: а – централізована; б – модульна; в – розподілена

Таблиця 1

Основні топології BMS

Тип архітектури	Опис	Переваги	Недоліки
<b>Централізована</b>	Один контролер вимірює параметри всіх комірок через шлейфи проводів	Низька вартість компонентів, простота в малих системах	Низька завадостійкість, складність монтажу, погана масштабованість
<b>Розподілена</b>	Комірки мають локальні модулі моніторингу, які передають цифрові дані на центральний блок	Висока гнучкість, надійність, мінімум високовольтних проводів	Вища вартість, складність протоколів обміну даними
<b>Модульна</b>	Компромісний варіант: батарея поділена на модулі (наприклад 48В), кожен із яких має свій «Slave» BMS, що спілкується з «Master» блоком	Оптимальний баланс ціни та надійності, легкість масштабування та обслуговування	Потребує ізолюваних інтерфейсів зв'язку між модулями

Для потужних тягових систем доцільним є використання модульної або розподіленої архітектури. Типова структура такої системи, зображена на рис. 2, включає блоки моніторингу (CMU) і центральний блок керування (BMU).

Така декомпозиція допомагає мінімізувати довжину високовольтних шлейфів, а обмін даними між рознесеними блоками часто реалізований за завадостійкою кільцевою топологією, структурна схема якої показана на рис. 3.

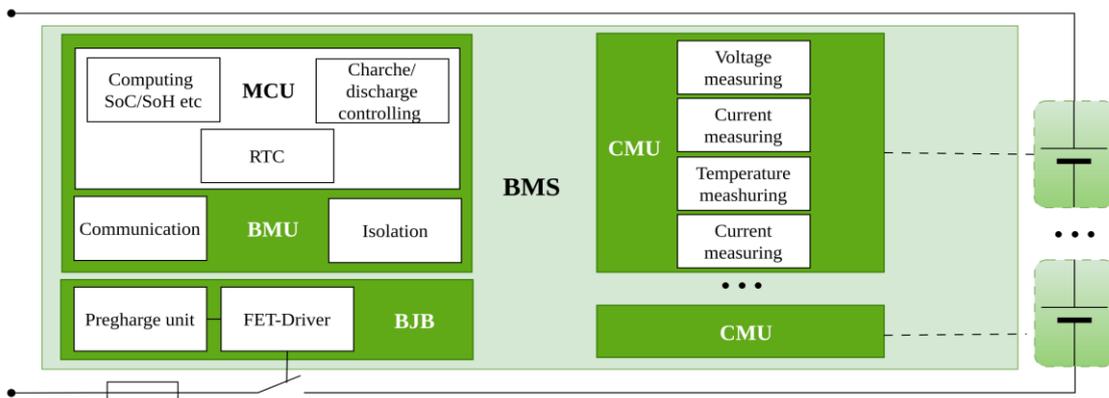


Рис. 2. Структура типової BMS



Рис. 3. Узагальнена структурна схема кільцевого з'єднання BMU

**Блок вимірювання комірок CMU.** Приклад під'єднання декількох CMU із додатковою гальванічною розв'язкою показано на рис. 3.

Основним технічним викликом із проектуванням CMU є забезпечення точності вимірювань і гальванічної розв'язки. Як показано на рис. 4, використання цифрових ізоляторів (ISO) є обов'язковим для захисту низьковольтної логіки від завад тягового привода та високої напруги.

Особливу увагу приділяють точності вимірвальних каналів. Аналіз показує

пряму залежність між похибкою вимірювання та ефективною ємністю батареї:

- за похибки 5 % система змушена встановлювати широкі захисні інтервали, що призводить до втрати 10–15 % корисної ємності через неможливість використання повного діапазону SoC;
- забезпечення точності на рівні 1 % дає змогу мінімізувати «мертві зони» захисту, збільшити ефективний пробіг РС на одному заряді без зниження рівня безпеки.

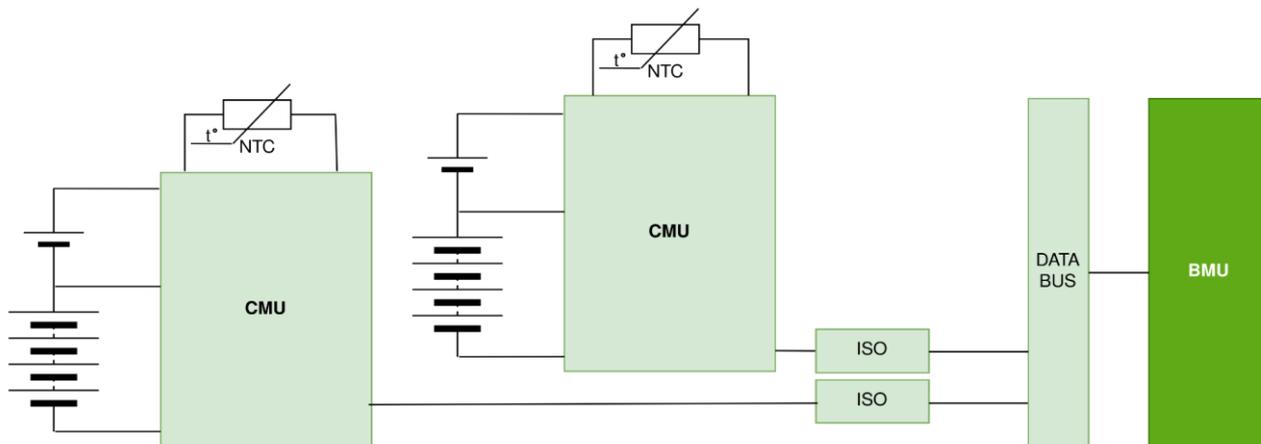


Рис. 4. Приклад під'єднання декількох CMU із додатковою гальванічною розв'язкою (ISO)

**Блок захисту ВЈВ.** Захист силових кіл від струмів короткого замикання та глибокого розряду реалізований блоком ВЈВ. При цьому вибір місця встановлення вимірювального шунта (у верхньому чи нижньому плечі) є компромісом між складністю схемотехніки (необхідність ізольованого АЦП для верхнього плеча) і повнотою діагностики аварійних станів.

#### 4. Топології BDC і вибір компонентів

**Неізовані BDC (NBDC).** NBDC, що мають прямий електричний зв'язок між колами, часто реалізовані за класичною

напівмостовою схемою (Buck/Boost) (рис. 5, а), яка, попри простоту, потребує масивного дроселя через високі пульсації струму. Ефективним шляхом для розв'язання цієї проблеми є застосування багатофазних (Interleaved) топологій (рис. 5, б), які завдяки зміщенню фаз ШІМ забезпечують взаємну компенсацію пульсацій. Це дає змогу суттєво зменшити габарити пасивних компонентів і підвищити питому потужність, роблячи таку архітектуру оптимальною для автономних гібридних систем, де відсутня жорстка вимога щодо гальванічної ізоляції.

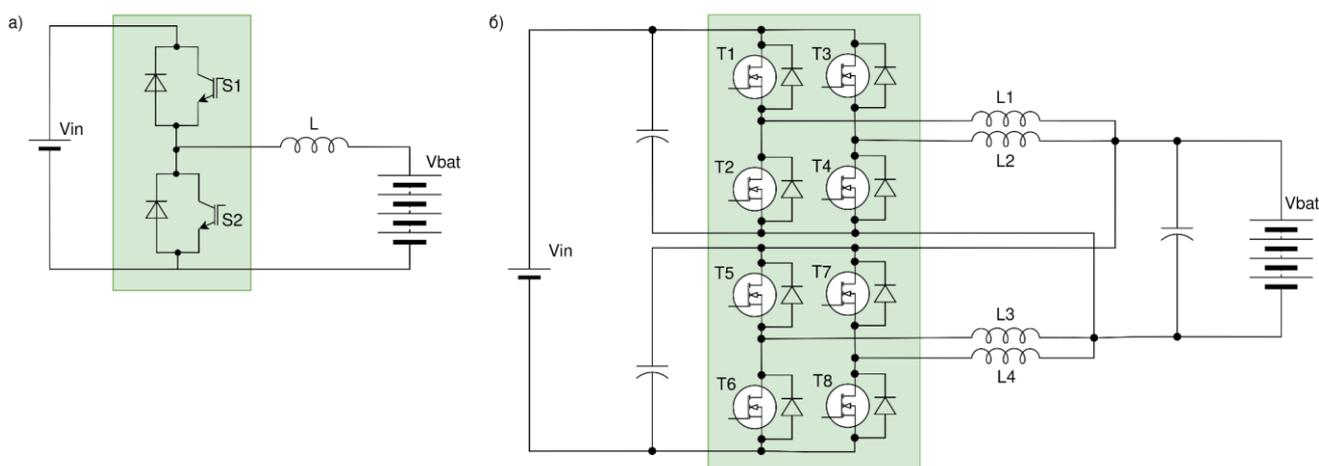


Рис. 5. Схеми двонаправленого перетворювача: а – класичний напівмостовий; б – двофазний перемережований;  $V_{in}$  – вхідна напруга;  $V_{bat}$  – напруга батареї;  $L$  – дросель;  $S, T$  – силові ключі

**Ізольовані ВДС (ІВДС).** ІВДС, що використовують високочастотний трансформатор для забезпечення гальванічної розв'язки, є критично важливими для РС через жорсткі вимоги стандартів безпеки щодо запобігання поширенню аварійних струмів від високовольтної контактної мережі. Де-факто стандартом для реалізації

таких потужних систем є топологія двоактивномостового (DAB) перетворювача (рис. 6). Ця схема складається з двох H-мостів, з'єднаних через трансформатор, керується за методом зсуву фаз і вирізняється високою питомою потужністю і здатністю до м'якої комутації, що суттєво знижує енергетичні втрати.

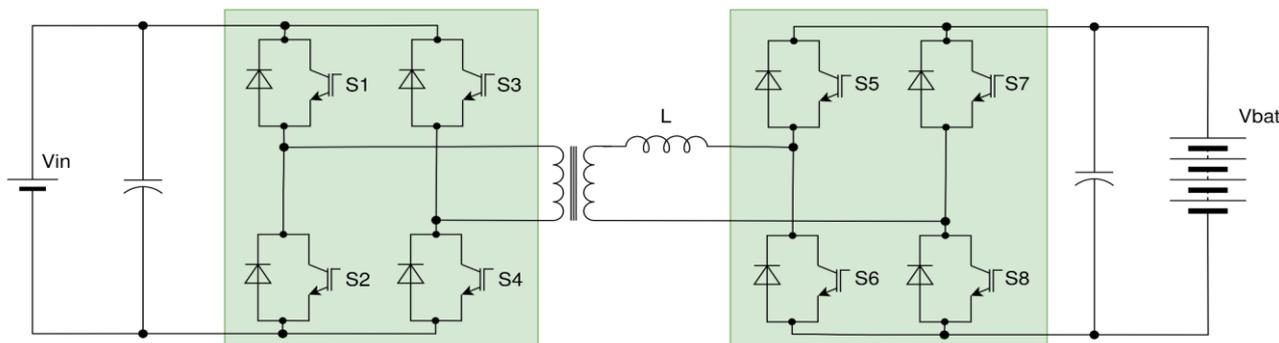


Рис. 6. Схема двоактивномостового (DAB) перетворювача:  $V_{in}$  – вхідна напруга;  $V_{bat}$  – напруга батареї;  $L$  – дросель;  $S$  – силові ключі

**Вибір силових напівпровідникових компонентів.** Впровадження технології SiC MOSFET змінює парадигму проектування тягових перетворювачів. Порівняно з Si

IGBT (табл. 2) карбід-кремнієві ключі забезпечують зниження динамічних втрат на 50–70 % і вищу температурну стійкість.

Таблиця 2

Порівняння властивостей Si IGBT і SiC MOSFET для тягових застосувань

Характеристика	Si IGBT	SiC MOSFET	Перевага SiC
Втрати на перемикання ( $E_{on}/E_{off}$ )	Високі	Дуже низькі	Зниження втрат на 50-70 %
Максимальна робоча частота, кГц	1 – 3	20 – 100	Зменшення розмірів фільтрів у 5-10 разів
Теплопровідність, Вт/см·К	1.5	4.9	Краще відведення тепла, менші радіатори
Робоча температура кристалу, не вище, °С	150	175-200	Вища надійність у разі перевантажень
Напруга пробою	Добре масштабована	Відмінна (високе поле пробою)	Можливість створення високовольтних модулів 3.3 кВ

Однак специфіка залізничних стандартів (EN 50121) накладає обмеження щодо швидкості перемикання  $dV/dt$  через ризику пошкодження ізоляції двигунів і генерації електромагнітних завад. Тому в залізничних BDC потенціал SiC реалізований не стільки через підвищення частоти комутації ( $> 20$  кГц), скільки через підвищення ККД у чутливому діапазоні частот (2–10 кГц) і зменшення вимог для системи охолодження.

### 5. Передові стратегії керування

Ефективність гібридної силової установки залежить не лише від компонентної бази, а і стратегії керування. Традиційні ПД-регулятори мають обмежену ефективність у нелінійних системах із багатьма джерелами енергії. Для врахування насичення двигунів [15] і асиметрії обмоток [16] застосовують адаптивні методи. Перспективним є застосування Model Predictive Control (MPC) [17], що дає змогу реалізувати проактивну стратегію енергоменеджменту. На відміну від реактивних систем, MPC аналізує прогноз профілю колії та обмеження стану батареї (SoC, температура), оптимізуючи розподіл потоків потужності між ДГУ та

ESS в реальному часі. Це допомагає мінімізувати цикли мікрозаряду/розряду, продовжуючи ресурс батареї.

### 6. Елементна база для plug-in накопичувачів

**Загальна характеристика Li-Ion накопичувачів.** Li-Ion батареї (LIB) визнані домінуючою технологією [18] для тягових застосувань завдяки оптимальному поєднанню високої питомої енергії ( $\approx 200$  Вт·год/кг), тривалого циклічного ресурсу та енергоефективності, що забезпечує суттєві експлуатаційні переваги порівняно з традиційними аналогами.

**Порівняльний аналіз типів літєвих комірок.** Вибір електрохімічної системи є критичним, оскільки визначає компроміс між енергією, потужністю, безпекою та ресурсом [19]. Основні типи комірок (літій-кобальт-оксидна LCO, літій-марганець-оксидна LMO, літій-нікель-марганець-кобальт-оксидна NMC, літій-залізо-фосфатна LFP, літій-титанат-оксидна LTO) мають суттєві відмінності. Порівняльний аналіз подано в табл. 3, яка підсумовує основні параметри, такі як номінальна напруга, питома енергія, максимальний струм розряду та кількість циклів.

Таблиця 3

Порівняльні характеристики основних Li-Ion електрохімічних технологій

Параметр	LCO	LMO	NMC	LFP	LTO
Номінальна напруга, В	3.6	3.7 (3.8)	3.6 (3.7)	3.2 (3.3)	2.4
Питома енергія, Вт·год/кг	150-200	100-150	150-220	90-120	70-80
C-рейтинг (розряд, Pulse)	1C	10C (30C)	2C	25C (40C)	10C (30C)
Кількість циклів	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	3000-7000
Безпека	Низька	Помірна	Помірна	Висока	Найбезпечніший
Вартість	Висока	Помірна	Висока	Помірна	Найвища

1. **LFP** вирізняються високою безпекою (температура теплового розгону  $270^{\circ}\text{C}$ ), здатністю витримувати високі струми ( $25\text{C Max}$ ) і тривалим ресурсом.

2. **LTO** є найбезпечнішими та найбільш довговічними (3000-7000 циклів), мають надзвичайно високу швидкість заряду/розряду ( $10\text{C Max}$ ) і гарні характеристики за низьких температур, але їхня питома енергоємність найнижча, а вартість — найвища.

3. **NMC** є збалансованим вибором, що поєднує високу енергоємність із помірною потужністю і ресурсом, що робить їх придатними для забезпечення основної дальності ходу.

**Обґрунтування вибору технологій для залізничного транспорту.** Для plug-in гібридних установок на залізничному транспорті найбільш доцільним є використання технологій LFP і LTO. Використання технології NMC у цьому контексті є економічно невиправданим через високу початкову вартість, схильність до теплового розгону (пожежонебезпечність) та обмежений календарний ресурс (необхідність заміни кожні чотири-п'ять років). Такі фактори призводять до критичного зростання вартості володіння протягом усього терміну експлуатації локомотива [19].

Оскільки тягові системи потребують як високої енергії для забезпечення тривалого пробігу, так і високої потужності та циклічного ресурсу для ефективного поглинання енергії рекуперації, оптимальним рішенням є гібридизація накопичувача. Це передбачає поєднання різних хімічних складів, наприклад використання LFP для забезпечення основної ємності та безпеки в поєднанні з LTO для гарантування необхідної пікової потужності, тривалого терміну служби та підвищеної безпеки. Таке поєднання дає змогу отримати збалансовані характеристики, необхідні для роботи гібридного привода. При цьому варіант гібридизації визначають за результатами

розрахунків для конкретного сценарію використання рухомого складу.

## 7. Системна інтеграція та експлуатаційна стійкість

### Системи теплового керування.

Ефективне відведення тепла є критичним для забезпечення довговічності силових напівпровідників і батарейних комірок. Основною причиною відмов силових модулів є термомеханічна втома, спричинена циклічними змінами температури, особливо в умовах циклічних навантажень.

Передові системи керування тепловим режимом (рідинне або примусове повітряне охолодження) не лише відводять тепло, але і стабілізують робочу температуру кристалів, мінімізуючи амплітуду та кількість теплових циклів, що значно підвищує довготривалу надійність ESS і BDC.

### Електромагнітна сумісність (ЕМС).

Для залізничного середовища характерний високий рівень ЕМІ. Тягове обладнання має відповідати жорстким вимогам стандартів серії EN 50121, які регламентують як емісію (рівень випромінюваних завад), так і завадостійкість обладнання.

Для дотримання цих стандартів потрібні комплексні заходи: ретельне екранування, встановлення ЕМІ-фільтрів і, як було зазначено, оптимізація швидкості перемикання силових ключів (навіть SiC MOSFET) для обмеження генерації високо-частотних гармонік, які можуть спричинити збої в системах зв'язку та сигналізації.

**Висновки.** У роботі комплексно проаналізовано системи накопичення енергії для залізничного транспорту. На основі отриманих результатів сформульовано концепцію оптимальної цільової архітектури plug-in гібридної системи, що базована на таких принципах:

1. Архітектура силового інтерфейсу. Визначено, що для високовольтних plug-in систем, які живляться від контактної мережі (3 кВ), безальтернативним рішенням є використання IBDC. Рекомендовано застосування схеми Dual Active Bridge (DAB), яка забезпечує гальванічну

розв'язку, м'яку комутацію та двонаправленість потоків енергії. Елементна база: обґрунтовано перехід на SiC MOSFET, що дає змогу підвищити ККД і теплову стійкість. При цьому встановлено, що робоча частота комутації має бути обмежена діапазоном до 1.5–2 кГц для дотримання стандартів електромагнітної сумісності (EN 50121) у специфічних умовах залізниці.

2. Гібридизація накопичувача енергії. Доведено неефективність використання монохімічних батарей для змішаних циклів руху, а також недоцільність використання хімії NMC через високі експлуатаційні витрати і ризики займання. Оптимальна структура ESS має бути базована на гібридизації електрохімічних елементів. Рекомендовано поєднання комірок LFP (для забезпечення базової енергоємності, низької вартості кіловат-години та пожежної безпеки) із комірками LTO (для забезпечення пікової потужності з розгоном і високого циклічного ресурсу). Така конфігурація допомагає нівелювати недоліки окремих технологій і максимізувати ефективність рекуперації та забезпечити роботу системи без заміни модулів протягом усього життєвого циклу локомотива. Остаточний варіант гібридизації визначають за результатами розрахунків для конкретного сценарію використання рухомого складу.

3. Архітектура системи керування (BMS). Для гарантування надійності та безпеки високовольтних збірок рекомендовано відмовитися від централізованих схем на користь модульної або розподіленої архітектури BMS із кільцевим інтерфейсом зв'язку та обов'язковою гальванічною ізоляцією вимірювальних каналів (ISO). Критичною вимогою визначено точність вимірювання на рівні не гірше 1 % (через прецизійні СМУ), що дає змогу зменшити «мертві зони» захисних інтервалів і збільшити ефективний діапазон використання ємності батареї.

4. Стратегія керування енергопотоками. Замість реактивних ПД-регуляторів для складної послідовно-паралельної схеми гібрида запропоновано впровадження керування з прогнозуючою моделлю (MPC). Це дає змогу здійснювати проактивну координацію роботи ДГУ, ВДС і ESS, ураховуючи профіль маршруту і мінімізуючи загальне споживання палива.

Перспективною для впровадження є інтегрована архітектура, що поєднує ізольований SiC-перетворювач DAB, безпечний гібридний накопичувач (LFP+LTO) за керування модульної BMS та алгоритмів MPC. Саме така конфігурація гарантує необхідний баланс між безпекою, питомою потужністю і економічною ефективністю модернізації РС.

### Список використаних джерел

1. IEC 62933-1-1: Electrical energy storage (EES) systems – Part 1-1: Terminology. International Electrotechnical Commission (IEC), 2017.
2. Lawder M. T., Suthar B., Northrop P. W. C., De S., Hoff C. M., Leitermann O., Crow M. L., Santhanagopalan S., Subramanian V. R. Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Application. *Proceedings of the IEEE*. 2014. Vol. 102 (6). P. 1014–1030. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2317451.
3. Gabbar H. A., Othman A. M., Abdussami M. R. Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards. *Technologies*. 2021. Vol. 9 (2). P. 28. DOI: 10.3390/technologies9020028.
4. Lelie M., Braun T., Knips M., Nordmann H., Ringbeck F., Zappen H., Sauer D. U. Battery Management System Hardware Concepts: An Overview. *Appl. Sci*. 2018. Vol. 8 (4). P. 534. DOI: 10.3390/app8040534.

5. Божко С. В., Леонов С. Ю. Аналіз структурних схем гібридних силових установок автомобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2016. № 9. URL: <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/bitstreams/711b3179-411b-4eb4-9f37-be23f9d5733c/download>.
6. Krismer F., Kolar J. W. Bidirectional DC-DC Converters for Energy Storage Systems. *InTech*. 2011. URL: <https://scispace.com/pdf/bidirectional-dc-dc-converters-for-energy-storage-systems-23q7akc7ji.pdf>.
7. Lee D., Lee P.-Y., Baek I., Kwon S., Kim J. Deriving the optimized battery model for battery pack and anomaly detection based on the cloud battery management system. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 74 (Part A). 109338. DOI: 10.1016/j.est.2023.109338.
8. EN 50121-3-2: Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 3-2: Rolling stock – Apparatus. CENELEC.
9. Riabov I., Overianova L., Iakunin D., Neshcheret V., Ivanov K. Equipping suburban diesel–electric multiple unit with a hybrid power unit. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 11. Art. 100949. DOI: 10.1016/j.prime.2025.100949.
10. Riabov I., Goolak S., Neduzha L. An Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*. 2024. Vol. 6, no. 2. P. 611–631. DOI: 10.3390/vehicles6020028.
11. Kondratieva L., Bogdanovs A., Overianova L., Riabov L., Goolak S. Determination of the working energy capacity of the on-board energy storage system of an electric locomotive for quarry railway transport during working with a limitation of consumed power. *Archives of Transport*. 2023. Vol. 65, No. 1. P. 119–154. DOI: 10.5604/01.3001.0016.2631.
12. Maslii A., Buriakovskiy S., Antonenko R., Gevrasov V., Maslii A. Assessing the applicability of energy storage system for plug-in hybrid traction system in rail rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4/1 (136). DOI: 10.15587/1729-4061.2025.337731.
13. Підвищення енергоефективності тягового рухомого складу шляхом впровадження гібридних plug-in систем / А. С. Маслій, С. Г. Буряковський, В. А. Геврасьов та ін. *Залізничний транспорт України: наук.-практ. журнал*. 2025. Вип. 3 (156). С. 13–22. DOI: 10.34029/2311-4061-2025-156-3-3-13-22.
14. IEEE Recommended Practice for Battery Management Systems in Stationary Energy Storage Applications. IEEE 2686-2024. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2024. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/2686/7394/>.
15. Goolak S., Liubarskyi B. Vector Control System Taking into Account the Saturation of an Induction Motor. *Tehnički vjesnik*. 2024. Vol. 31, No. 4. P. 1170–1178. DOI: 10.17559/TV-20221015124239.
16. Goolak S. et al. Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor. *Engineering Research Express*. 2023. Vol. 5. Art. 025070. DOI: 10.1088/2631-8695/acde46.
17. Guzzella L., Sciarretta A. Model Predictive Control as an Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles. Stanford University. 2005. URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/OnoriPDF/Conferences/12.pdf>.
18. Miao Y., Hynan P., von Jouanne A., Yokochi A. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*. 2019. Vol. 12 (6). P. 1074. DOI: 10.3390/en12061074.
19. Buriak S., Gololobova O., Havryliuk V., Serdiuk T., Voznyak O., Manachyn I. Analysis and research of the causes and course of degradation of lithium batteries. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. DOI: 10.1051/mateconf/202439001003.

20. Buriak S., Gololobova O., Serdiuk T., Voznyak O., Yehorov O., Manachyn I., Radzikhovskiy K. Selection of Optimal Lithium Battery Technology for Backup Power Supply of Automatics Systems in Railway Transport. *Transport Means 2024 : Proc. of the 28th Intern. Sci. Conf. (Kaunas, 2024)*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2024. P. 203–211. DOI: 10.5755/e01.2351-7034.2024.P203-211.

---

Маслій Артем Сергійович, кандидат технічних наук, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-0554-8150. E-mail: maslij@kart.edu.ua.

Буряковський Сергій Геннадійович, доктор технічних наук, професор, директор Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID ID: 0000-0003-2469-7431. E-mail: ergbyr@i.ua.

Геврасов Валентин Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0009-0000-8910-5172. E-mail: gevasov\_phd@kart.edu.ua.

Антоненко Роман Миколайович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0009-0001-9241-5857. E-mail: antonenko\_phd@kart.edu.ua.

Маслій Андрій Сергійович, кандидат технічних наук, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 000-0001-7188-3638. E-mail: an\_com@ukr.net.

Жуков Антон Юрійович, ТОВ «Харківський електромашинобудівний завод», пр. Героїв Харкова, 199, 61037, Харків, Україна. ORCID ID: 0009-0001-5229-1685. E-mail: zukant83@gmail.com.

Artem Maslii, Ph.D., Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDUST). ORCID ID: 0000-0002-0554-8150. E-mail: maslij@kart.edu.ua.

Serhii Buriakovskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Research and Design Institute "Molniya" of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". ORCID ID: 0000-0003-2469-7431. E-mail: ergbyr@i.ua.

Valentyn Gevasov, PhD Student, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDUST). ORCID ID: 0009-0000-8910-5172. E-mail: gevasov\_phd@kart.edu.ua.

Roman Antonenko, PhD Student, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDUST). ORCID ID: 0009-0001-9241-5857. E-mail: antonenko\_phd@kart.edu.ua.

Andrii Maslii, Ph.D., Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDUST). ORCID ID: 0000-0001-7188-3638. E-mail: an\_com@ukr.net.

Anton Zhukov, LLC "Kharkiv Electric Machine Building Plant", 199 Heroiv Kharkova Ave., 61037, Kharkiv, Ukraine. ORCID ID: 0009-0001-5229-1685. E-mail: zukant83@gmail.com.

Статтю прийнято 25.12.2025 р.

УДК 629.4.027

## ДО ПИТАННЯ МІНІМІЗАЦІЇ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ У ПІДШИПНИКАХ БУКС ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, кандидати техн. наук А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, асп. О. М. Литовченко

## ON THE ISSUE OF MINIMIZING CONTACT STRESSES IN BEARINGS OF FREIGHT WAGON BOXES

Dr. Sc. I. Martynov, PhD (Tech.) A. Trufanova, PhD (Tech.) V. O. Shovkun, postgraduate student O. Lytovchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351914>

**Анотація.** У статті викладено результати дослідження напружено-деформованого стану циліндричних роликів підшипників буксових вузлів вантажних вагонів. Для розрахунків використовували методи механіки деформованого твердого тіла, реалізовані за допомогою методу скінченних елементів. Розмір сітки скінченних елементів у зоні контакту ролика та доріжок кілець вибрано за допомогою графоаналітичного методу. Для врахування складної форми елементів буксових вузлів і збільшення точності розрахунків використовували тетраедри з криволінійною формою ребер.

У розрахунках ураховано найбільш несприятливий варіант завантаження корпусу: сумісна дія вертикального статичного та динамічного навантаження. Зазначені навантаження моделювали через прикладення сили до верхніх приливів корпусу букси у вузлах.

Розподілення напружень уздовж твірної ролика має відносно нестабільний характер, причому в зоні переходу від твірної до торця ролика спостерігають різке збільшення напружень («крайковий» ефект).

Модернізація сталевого корпусу букси зі зміненою конструкцією опорної поверхні, де була розташована полімерна прокладка, дала змогу зменшити максимальні контактні напруження на 20 %.

**Ключові слова:** вантажний вагон, буксовий вузол, циліндричні підшипники, тіла кочення, контактні напруження, скінченні елементи.

**Abstract.** The article presents the results of a study of the stress–strain state of cylindrical roller bearings in the axleboxes of freight wagons. The calculation of contact stresses in the contact zone between the rings and rollers was performed on the basis of Hertzian contact theory. During the calculations, methods of solid-body deformation mechanics were used, implemented through the finite element method. The mesh size of the finite elements in the bearing raceway contact zone was selected using a graph-analytical method. To create a folding shape for the elements of the axle box units and to increase the accuracy of the alignments, tetrahedra with curved edges were formed.

The model of a typical freight wagon axlebox includes the axlebox housing, two cylindrical roller bearings, and an axle to simulate possible axle bending. The most unfavorable loading condition of the housing was considered: the combined action of vertical static and dynamic loads. These loads were simulated by applying a force to the upper part of the axlebox housing at the nodes.

The distribution of stresses along the roller generatrix is relatively unstable: in the transition zone from the generatrix to the roller end, a sharp increase in stresses («edge effect») is observed. This is also typical for other rollers in the contact zone.

*Modernizing the steel axlebox housing by altering the design of the support surface where the polymer liner was located made it possible to reduce the maximum contact stresses by 20 %. The loads between the rollers became evenly distributed in both the front and rear bearings, with peak values occurring on the central roller. The «edge effect» is practically absent. The difference in radial loads on the front and rear bearings was almost completely eliminated due to misalignment compensation by the polymer liner. Compared with the typical axlebox unit, a greater number of rollers were involved in absorbing external loads, which increases the bearing's service life.*

**Keywords:** freight car, axle boxes, cylindrical bearings, rolling elements, contact stresses, finite elements.

**Вступ.** Залізничний транспорт відіграє важливу роль у сучасній транспортній інфраструктурі та економіці України. Він є одним із найбільш ефективних і продуктивних способів перевезення вантажів і пасажирів. Залізниці України не просто виконують переважну частину вантажообігу для промисловості, але і забезпечують військові перевезення в умовах відсічі агресії.

Проведений аналіз вітчизняного вагонного парку свідчить, що переважна більшість вантажних вагонів відпрацювала не лише нормативний термін експлуатації, а і всі можливі продовження цього терміну. Парк вантажного рухомого складу потребує заміни застарілих моделей сучасними вагонами нового покоління. Вони мають забезпечувати збільшений міжремонтний пробіг, високу безвідмовність і ремонтпридатність, низьку собівартість перевезень. Тому завдання розроблення та впровадження інноваційних технічних рішень у конструкцію вантажних вагонів для вагонобудівників залишається вкрай актуальним завданням.

Проведені на початку ХХІ століття науковцями та фахівцями вагонобудівної промисловості науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи викликали появу на вітчизняних залізницях так званих вагонів «нового покоління», найбільш яскравим представником яких є універсальний напіввагон побудови ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» моделі 12-7023. Не обговорюючи переваги його кузова, необхідно зупинитися саме на ходових частинах. У візках моделі 18-7020

використано ряд передових технічних рішень, які суттєво впливають на ефективність експлуатації зазначених напіввагонів. Це повною мірою стосується і буксових вузлів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На залізницях України з початку 60-х років ХХ століття в бруксах як вантажних, так і пасажирських вагонів використано циліндричні роликові підшипники N 232726 [0]. Як свідчить багаторічний досвід експлуатації [2], їхня надійність недостатня для гарантування безпеки руху. Так, на залізницях України у вантажних вагонів під час руху на шляху прямування до 70 % загальної кількості відчеплень через відмови різних елементів конструкції були викликані саме відмовами та надмірним нагрівом роликових бруксів [3-5]. Крім того, тисячі випадків відмов бруксових вузлів вагонів виявлено засобами дистанційного контролю під час руху або оглядачами вагонів [6].

Аналіз результатів експлуатації бруксових вузлів із циліндричними роликовими підшипниками дав змогу встановити основні причини відмов [7, 8] і визначити напрями удосконалення конструкції. Науковцями, фахівцями вагонного господарства та підшипникової промисловості був запропонований ряд технічних рішень із вибору оптимальних значень радіальних та осьових зазорів у підшипниках, удосконалення технології проведення монтувально-демонтувальних робіт (впровадження автоматизованих стендів), удосконалення конструкції підшипників і технології їх виготовлення

(так званий «розвал» бортів, коли борти підшипників мають певний нахил до поверхні кочення кілець, заміна циліндричної форми твірної роликів на бочкоподібну, використання поліпшених марок сталей тощо) [9, 10]. Під керівництвом В. Г. Андрієвського був виконаний комплекс досліджень із розроблення та застосування в циліндричних роликів підшипниках поліамідного сепаратора удосконаленої конструкції з підвищеною міцністю [11].

Спостереження за результатами експлуатації буксових вузлів із циліндричними підшипниками були продовжені фахівцями УкрДУЗТ [6, 10, 12]. Проведений аналіз засвідчив, що частка відмов роликів букс вагонів зменшується в абсолютних значеннях. Але, якщо врахувати зменшення вантажообігу та кількості вагонів у робочому парку, надійність буксових вузлів залишається практично незмінною та потребує підвищення.

Подібний аналіз був проведений у дослідженнях [13-16]. Автори детально аналізують причини відмов буксових підшипників вантажних вагонів і пропонують заходи з їх усунення.

Буксовий вузол знаходиться в необресореній зоні вагона. Тому зменшення його маси обіцяло не лише зменшити тару вагона, а й знизити динамічні навантаження на підшипники. Реалізація цього напряму відбувалася через використання для виготовлення корпусів букс вантажних вагонів алюмінієвих сплавів [17]. Завдяки значно меншому порівняно зі сталлю модулю пружності такі корпуси забезпечували можливість знизити масу необресорених елементів, амортизацію та гасіння високочастотних динамічних впливів. Це допомагало збільшити довговічність підшипників через забезпечення оптимальної податливості верхньої частини корпусу букси і знизити рівень динамічного впливу вагона на колію [18].

Але постійний контакт алюмінієвої опорної поверхні верхньої частини корпусу букси зі сталлю боковою рамою візка моделі 18-100 призводив в експлуатації до інтенсивного спрацювання саме корпусів букс, що викликало необхідність їх частій заміни. Ураховуючи значну вартість алюмінію, це було неприйнятним [19].

Очевидно, що, незважаючи на значну кількість наукових робіт, присвячених аналізу різних аспектів експлуатації та надійності буксових вузлів вантажних вагонів із циліндричними роликів підшипниками, питання впливу конструкції корпусів букс на надійність циліндричних роликів підшипників висвітлено недостатньо.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є вибір раціональної конструкції корпусу букси для забезпечення мінімізації контактних напружень між тілами кочення в циліндричних роликів підшипниках. Для реалізації цієї мети необхідно створити 3D-модель типового буксового вузла вантажного вагона та буксового вузла з полімерною прокладкою, отримати розподілення контактних напружень уздовж твірної роликів у різних варіантів роликів букс і порівняти отримані результати.

**Основна частина дослідження.** Підшипники, що застосовують у буксах, є складними механічними системами. Традиційно для їх розрахунку використовували відносно прості математичні залежності. Однак у реальних умовах експлуатації фактичні навантаження на буксові підшипники формуються під впливом багатьох чинників і часто суттєво відрізняються від розрахункових величин.

У зв'язку з цим одним із найбільш перспективних підходів для розрахунку та вдосконалення буксових вузлів є створення і аналіз розрахункових моделей. При цьому до моделей вводять певні обмеження, параметри яких визначають на основі результатів експериментальних досліджень.

Як відомо, на буксовий вузол діють різні навантаження, що мають стохастичний характер. Напруження, які виникають у підшипниковому вузлі під час експлуатації вагонів, дуже великі. Це пов'язано з тим, що площа контакту між кільцем підшипника і тілом кочення (роликом) мала. При цьому виникають високі напруження, які концентруються тільки в зоні контакту і не поширюються на всю масу тіла кочення. Тому не лише геометрія підшипникового вузла, а й міцність самого підшипника безпосередньо впливають на безвідмовність і довговічність буксових вузлів вантажних вагонів.

Спираючись на класичну теорію Герца [20, 21], можна стверджувати, що взаємодія контактуючих поверхонь у підшипниковому вузлі має початково-лінійне торкання (ПЛТ). За величиною радіуси кривизни контактуючих тіл найчастіше значно перевищують ширину смуги контакту, а контактна міцність залежить переважно від напружень у зоні контакту. Проте пружні тіла, незалежно від їхньої номінальної геометрії, фактично мають певні розміри і початково-точкове торкання (ПТТ).

При цьому беруть такі припущення:

- напруження, що виникають у зоні контакту роликів і кілець, створюють тільки пружні деформації, що відповідають закону Гука;

- поверхні контакту малі порівняно з поверхнями тіл, що торкаються один одного;

- сили тиску, розподілені по поверхнях контакту, нормальні до цих поверхонь;

- матеріал контактуючих тіл є гомогенним та ізотропним;

- модуль пружності матеріалів є постійною величиною.

Але класична теорія Герца, попри те, що вона з успіхом використовується для визначення контактної міцності вже понад 100 років, має певні недоліки. Так, вона виходить із припущення, що осі тіл кочення,

що контактують, завжди паралельні (як перед прикладанням навантаження, так і після нього). У цьому випадку для двох тіл циліндричної форми поверхня контакту буде прямокутником (тобто розглядаємо ідеальний варіант взаємодії контактуючих тіл). Водночас доведено [22], що навіть незначний взаємний перекис осей суттєво змінює картину контакту, форма плями контакту фактично невідома та розподілення навантажень буде суттєво відрізнятись від теоретичного.

Не враховує теорія Герца і так званий «крайковий» ефект, відомий як теоретикам, так і практикам. Не зупиняючись у цій роботі на причинах виникнення цього явища, слід зазначити, що існуючі методи обчислення контактних напружень дають дуже велику похибку в зоні крайків роликів.

Тому для оцінювання напружено-деформованого стану буксового вузла доцільно використання методу скінченних елементів (МСЕ) [23, 24]. Цей чисельний метод розв'язування складних інженерних і фізичних задач базований на розбитті складної області (деталі, конструкції, простору) на велику кількість простіших елементів – скінченних елементів.

Ідея полягає в тому, що замість того, щоб шукати точний розв'язок для всієї області відразу (що часто неможливо аналітично), задачу розв'язують для кожного окремого маленького елемента, а потім результати об'єднують.

Перевагами методу скінченних елементів є універсальність, точність результатів для складної геометрії, можливість урахування різних матеріалів та умов.

Завдання математичного опису зведено до того, щоб зв'язати діючі у вузлах чинники. У механіці суцільного середовища це переміщення й зусилля.

Задача визначення поля переміщень у конструкції БВ може бути зведена до завдання мінімізації повної потенційної енергії по вузлових переміщеннях.

Оскільки буксовий вузол вагона складається з відносно масивних тіл

складної геометричної форми (циліндричні, прямокутні, з виточками та припливами) доцільно використовувати залежності для тривимірного напруженого стану.

Для вирішення завдань дослідження тривимірного напруженого стану найбільш часто використовують скінченні елементи у формі тетраедра і паралелепіпеда, що мають по три ступені вільності у вузлі, та полілінійну апроксимацію переміщень  $u_x, u_y, u_z$ .

Під час досліджень розроблено 3D-моделі буксових підшипникових вузлів вантажного вагона, які враховують не лише внутрішню геометрію підшипників, але й особливості передавання навантаження на них. Побудовані моделі допомагають імітувати різні варіанти навантаження з оцінюванням напружено-деформованого стану як самого підшипника, так і інших елементів буксового підшипникового вузла. Доцільно використовувати тетраедри з криволінійною формою ребер із десятьма вузлами, що дасть змогу врахувати складну форму елементів конструкції буксових вузлів і збільшити точність розрахунків.

Будували геометричну модель буксового вузла у програмному середовищі «ANSYS Discovery» (це програмний комплекс, призначений для інженерного моделювання, що поєднує інструменти для швидкого та інтерактивного моделювання, а також високоточного аналізу з використанням вирішувачів ANSYS. Він допомагає інженерам проводити віртуальні випробування на ранніх етапах розроблення, що сприяє підвищенню ефективності та якості проектування). ANSYS Mechanical APDL призначений для розв'язання задач механіки деформованого твердого тіла. ANSYS Mechanical надає інструменти для проведення розрахунків з урахуванням різних чинників, таких як нелінійні властивості матеріалів, пластичність, контактна взаємодія та ін.

Через складність моделей будували та розраховували підшипниковий вузол принципово в одному і тому самому

програмному комплексі. Це дало змогу уникнути проблем з імпортуванням геометричної моделі до розрахункового комплексу, які могли б вплинути на точність розрахунків.

Розмір сітки скінченних елементів у зоні контакту ролика та доріжок кілець вибирали за допомогою графоаналітичного методу (рис. 1).



Рис. 1. Уточнення сітки скінченних елементів в зоні контакту

Елемент Solid 92 визначений десятьма вузлами, що мають три ступені вільності в кожному вузлі: переміщення в напрямку осей X, Y, Z у системі координат вузла. Саме такі елементи є найкращими для моделювання машинобудівних конструкцій відносно малих розмірів, але складної форми.

Така особливість скінченно-елементної сітки дала змогу з більшою точністю обчислювати контактні напруження в зоні контакту і визначити характер розподілення напружень уздовж твірної роликів.

Під час створення моделі були прийняті припущення, що відповідали основним положенням теорії Герца. Крім того, не враховано вплив технологічних відхилень зі складанням елементів ходових частин на навантаження елементів підшипника, а також їхнє можливе спрацювання в експлуатації. Також не

розглядали вплив мастила на контактну міцність деталей підшипника.

Для розрахунків урахували найбільш несприятливий варіант завантаження корпусу: сумісна дія вертикального статичного та динамічного навантаження. Зазначені навантаження

модельовали через прикладення сили до верхніх приливів корпусу букси у вузлах.

Модель буксового вузла вантажного вагона включає корпус букси, два підшипники, вісь для моделювання можливого вигину осі (рис. 2). Ролики підшипників були «бомбінованими».

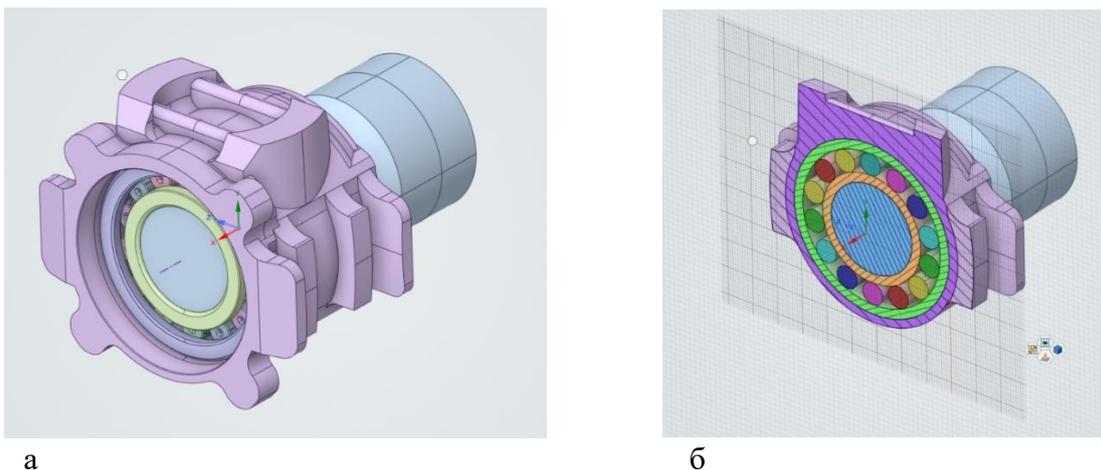


Рис. 2. Геометрична модель типового буксового вузла: а – вигляд буксового вузла без кріпильної кришки; б – розріз посередині заднього підшипника

У подальшому розроблена модель перетворена в скінченно-елементну.

Із розв'язанням були отримані максимальні контактні напруження, що виникають у зоні контакту, а також епюри розподілення зусиль на ролики.

Максимальні напруження в зоні контакту роликів із внутрішнім кільцем у задній частині підшипника (біля передпідматочинної частини) не перевищують 622 МПа (рис. 3) і нерівномірно розподілені для всіх роликів, що знаходяться в зоні навантаження.

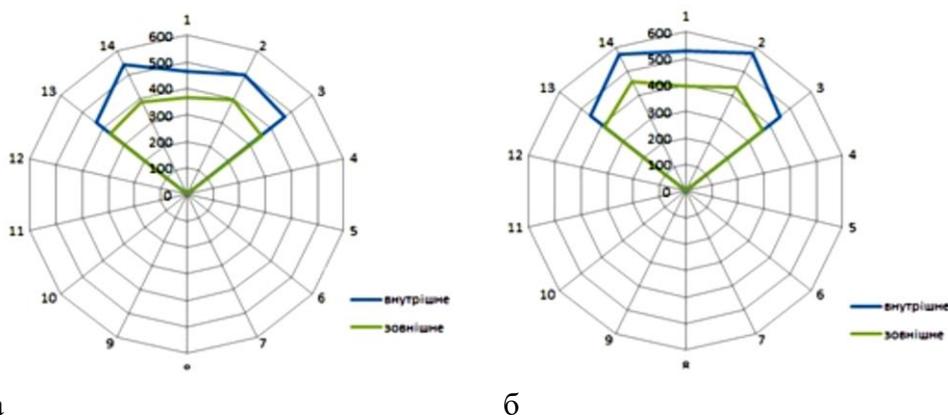


Рис. 3. Розподілення максимальних контактних напружень між роликами: а – передній підшипник; б – задній підшипник

Незважаючи на наявність «бомбіни» на роликах, розподілення напружень уздовж твірної ролика має відносно нестабільний характер, причому в зоні переходу від

твірної до торця ролика спостерігають різке збільшення напружень («крайковий» ефект). Це характерно також для інших роликів у зоні контакту (рис. 4).

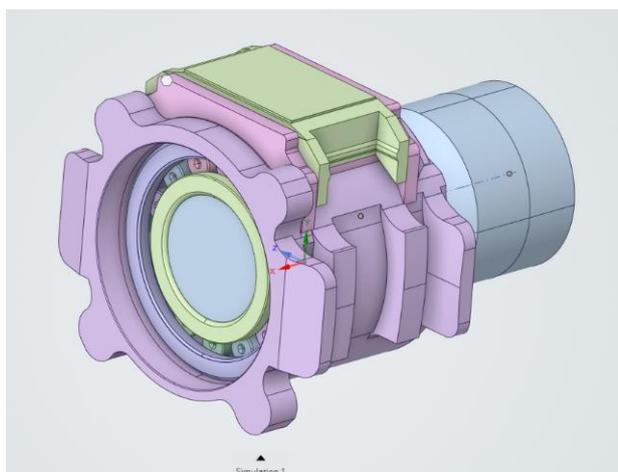


Рис. 4. Розподілення максимальних контактних напружень уздовж твірної ролика переднього підшипника

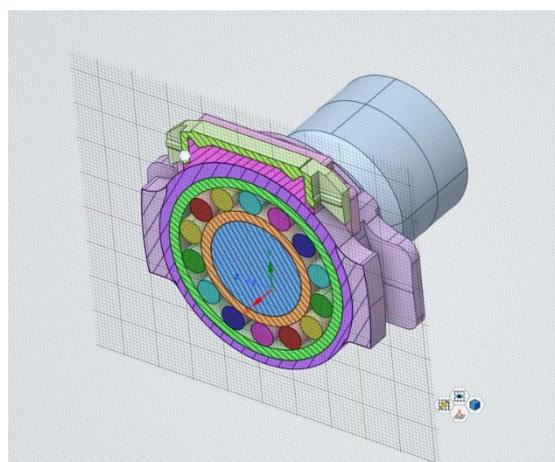
Тобто наявність «бомбіни» на роликах сприяє зменшенню контактних напружень, але не усуває нерівномірність їхнього розподілення уздовж твірної.

Для подальших досліджень була запропонована конструкція буксового вузла з корпусом букси, де у верхній частині

впресована полімерна прокладка - адаптер+. Відповідно, розроблена модель складається з частини характерного типового корпусу букси, у якому змінена конструкція верхньої частини для забезпечення надійного кріплення полімерної прокладки (рис. 5).



а



б

Рис. 5. Геометрична модель модернізованого буксового вузла: а – вигляд модернізованого буксового вузла без кріпильної кришки; б – розріз посередині заднього підшипника

Були отримані значення максимальних контактних напружень, що виникають у зоні контакту ролика і доріжок кільця підшипників (рис. 6), а також епюри розподілення зусиль на ролики.

Максимальні напруження в зоні контакту роликів із внутрішнім кільцем у

задній частині підшипника (біля передпідматочинної частини) не перевищують 500 МПа (рис. 7) і нерівномірно розподілені для всіх роликів, що знаходяться в зоні навантаження.

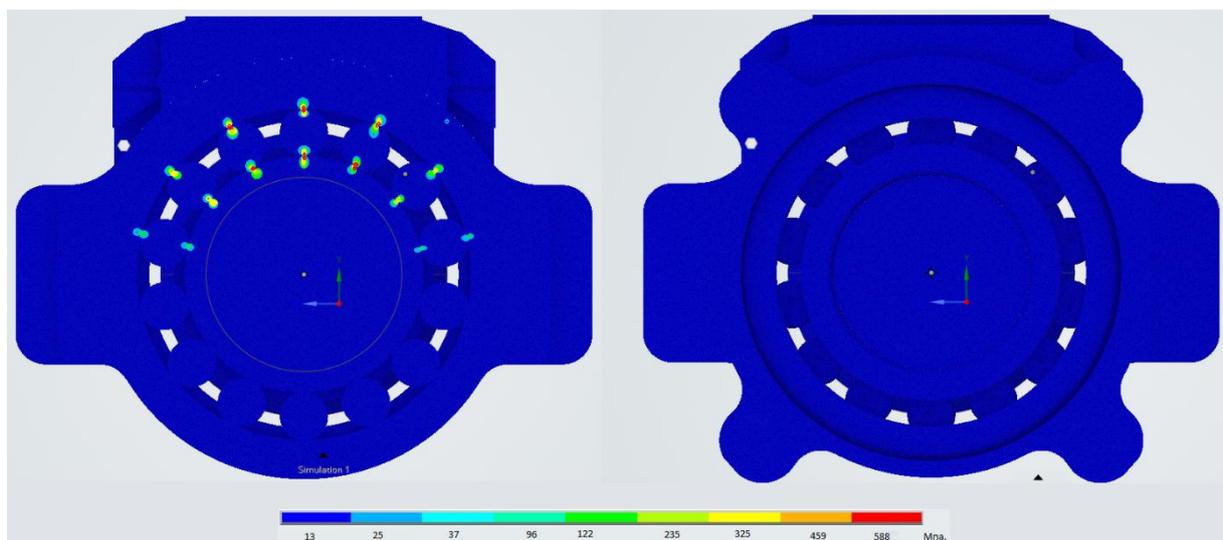


Рис. 6. Загальний вигляд напружено-деформованого стану роликів у підшипнику

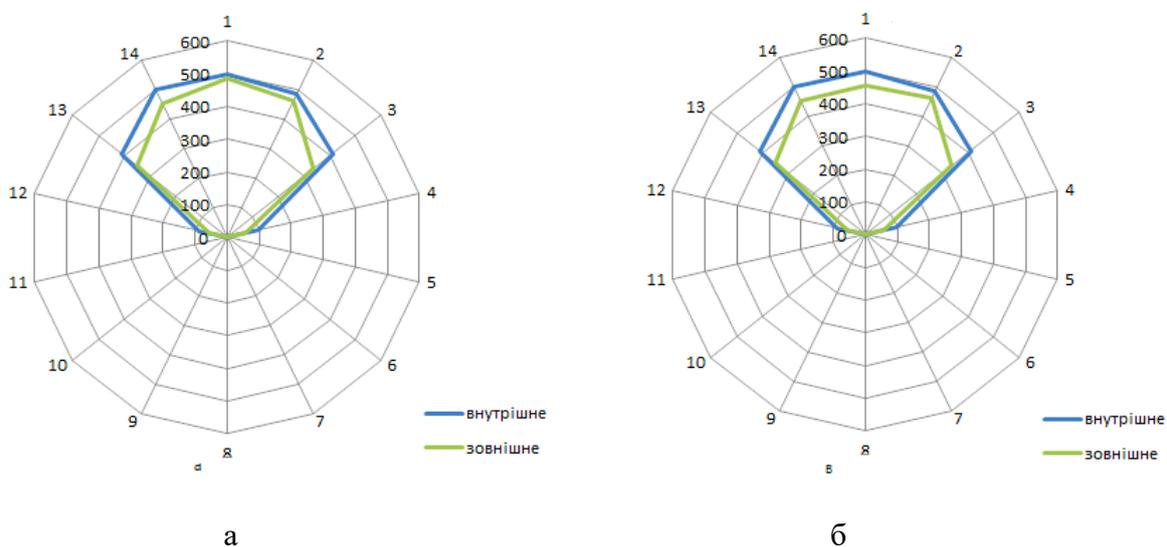


Рис. 7. Розподілення максимальних контактних напружень між роликами в передньому (а) і задньому (б) підшипниках

Розподілення напружень уздовж твірної ролика має відносно стабільний

характер, причому в зоні переходу від твірної до торця ролика спостерігають різке

зменшення напружень («крайковий» ефект майже відсутній). Це характерно також для інших роликів у зоні контакту.

Аналізуючи розподілення еквівалентного навантаження між роликами, можна побачити, що максимальних значень навантажень досягають на центральному ролику як у передньому, так і задньому підшипнику буксового вузла.

Різниця радіальних зусиль, що діють на задній і передній підшипники буксового вузла, практично нівельована можливістю компенсації перекосів полімерною прокладкою.

Очевидні переваги такої конструкції і для вирівнювання навантажень між роликами, зменшення напружень за рахунок перерозподілу навантажень між переднім і заднім підшипниками, а також включення в роботу більшого сектору роликів.

#### Висновки

1. Побудовано розрахункову модель буксового підшипникового вузла вантажного вагона з двома циліндричними підшипниками, яка враховує не лише внутрішню геометрію підшипників, але й особливості передавання навантаження на них. Ця модель дає змогу імітувати різні варіанти навантаження з оцінюванням напружено-деформованого стану як самого підшипника, так і інших елементів.

2. Максимальні напруження в зоні контакту роликів із внутрішнім кільцем у задній частині підшипника (біля передпідматочинної частини) не перевищують 622 МПа і нерівномірно розподілені між роликами, що знаходяться в зоні навантаження.

3. У зоні переходу від твірної до торця ролика спостерігають різке збільшення напружень («крайковий» ефект).

4. Запропоновано конструкцію буксового вузла з корпусом букси, де у верхній частині впресована полімерна прокладка.

5. Для такого буксового вузла максимальні напруження в зоні контакту роликів із внутрішнім кільцем у задній частині підшипника (біля передпідматочинної частини) не перевищують 500 МПа.

6. У зоні переходу від твірної до торця ролика спостерігають різке зменшення напружень («крайковий» ефект майже відсутній). Це характерно також для інших роликів у зоні контакту.

7. Різниця радіальних зусиль, що діють на задній і передній підшипники буксового вузла, практично нівельована можливістю компенсації перекосів полімерною прокладкою.

#### Список використаних джерел

1. Martynov I. E., Trufanova A. V., Safronov O. M. Axlebox roller bearings for railway vehicles: design and calculations: monograph. Kremenchug, 2022. 147 p.
2. Мартынов И. Э. Анализ опыта эксплуатации цилиндрических роликоподшипников букс грузовых вагонов. *Вісник Східноукраїнського державного університету*. 2000. № 5 (27). С. 157-159.
3. Гайдамака А. В. Надійність циліндричних роликопідшипників букс вагонів і локомотивів. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 139. С. 103-111.
4. Цюренко В. Н., Петров В. А. Надежность роликовых подшипников в буксах вагонов. Москва: Транспорт, 1982. 96 с.
5. До питання забезпечення працездатності буксових вузлів вантажних вагонів / І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. О. Шовкун та ін. *Комунальне господарство міст. Науково-технічний збірник. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2024. Т. 4, вип. 185. С. 228-234.

6. Пути повышения безопасности движения в вагонном хозяйстве / В. Н. Самсонкин, Н. Е. Вещева, А. В. Труфанова, А. Ф. Гаврилук. *Восточноукраинский журнал передовых технологий*. 2003. № 5. С. 30-32.
7. Прилепов Н. Н., Петров В. А. Что показал анализ отказов подшипников качения. *Железнодорожный транспорт*. 1976. № 4. С. 55-57.
8. Цюренко В. Н. Опыт эксплуатации вагонов с буксовыми узлами на подшипниках качения. *Труды ВНИИЖТ*. Москва, 1982. Вып. 654. С. 4-26.
9. Шавшишвили А. Д. Анализ опыта эксплуатации вагонных букс с роликовыми подшипниками. *Межвуз. темат. сб. / Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта*. Ростов-на-Дону, 1982. № 167. С. 13-18.
10. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Ільчишин В. М. До питання оцінки надійності буксових вузлів критичних вантажних вагонів. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 143. С. 69-74.
11. Андриевский В. Г. Буксовый роликоподшипник повышенной надежности. *Залізничний транспорт України*. 1998. № 1. С. 62-65.
12. Мартинов І. Е. До питання оцінки надійності буксових вузлів критичних універсальних вагонів. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип. 143. С. 69-74.
13. Аширбаев Г. К., Утепова А. У., Аширбаева И. А. Повышение надежности буксовых узлов колесных пар железнодорожных вагонов. *Вестник КазАТК*. 2021. № 2 (117). С. 7-12.
14. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life / D. V. Butorin, N. G. Filippenko, A. V. Livshits, S. I. Popov. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019)*. 2019. Vol. 760. P. 1-10.
15. Failures of bearings and axles in railway freight wagons / V. Gerdun, T. Sedmak, V. Sinkovec, I. Kovse, B. Cene. *Engineering Failure Analysis*. 2007. Vol. 14(5). P. 884-894.
16. Hermnio M. Analysis of failures of rolling stock railways rolling bearings. *Fernandes Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. Dissertation in Mestrado Integrado em Engenharia Mecanica. 2017. 107 p.
17. Корпус буксы из алюминиевого сплава / Н. А. Буше, О. М. Савчук, В. В. Новиков и др. *Ж.-д. трансп.* 1981. № 10. С. 53-55.
18. Савчук О. М. Влияние упругости корпуса буксы на работу подшипников. *Динамика механических систем: сб. науч. тр. ин-та техн. механики АН Украины*. Киев, 1983. С. 139-148.
19. Опыт эксплуатации роликовых буксовых узлов с корпусами из алюминиевого сплава / В. В. Копытько, С. Г. Иванов, О. М. Савчук и др. *Вестник ВНИИЖТа*. 1992. № 5. С. 45-47.
20. Перель Л. Я. Подшипники качения. Справочник. Москва: Машиностроение, 1983. 543 с.
21. Hertz H. Veber die Berührung fester elastischer Korper. *Gesamelte Werke*. Leipzig, 1895.
22. Савчук О. М. Теоретическое исследование нагруженности роликов в подшипниках буксовых узлов подвижного состава. *Проблемы механики железнодорожного транспорта: тезисы докладов Международной всесоюзной конференции*. Днепропетровск, 1980. С. 127.
23. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Москва: Мир, 1984. 428 с.
24. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Москва: Мир, 1975. 541 с.

---

Мартинов Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Тел.: 050 300-31-60. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

---

Труфанова Альона Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Тел.: +38 (050) 520-17-81. E-mail: [alena.hiit.vagons@gmail.com](mailto:alena.hiit.vagons@gmail.com).

Шовкун Вадим Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>. E-mail: [vadimshovkun62@gmail.com](mailto:vadimshovkun62@gmail.com).

Литовченко Олександр Миколайович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Тел.: +38 050 161-18-48. E-mail: [rokada\\_t@ukr.net](mailto:rokada_t@ukr.net).

Martynov Igor, Dr. Sc. (Tech). Professor, department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Тел.: (057) 730-10-36. E-mail: [martinov.hiit@gmail.com](mailto:martinov.hiit@gmail.com).

Trufanova Alena, Associate Professor, department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: [alena.hiit.vagons@gmail.com](mailto:alena.hiit.vagons@gmail.com).

Shovkun Vadim, Associate Professor, department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: (057) 730-10-35; <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>. E-mail: [vadimshovkun62@gmail.com](mailto:vadimshovkun62@gmail.com).

Lytovchenko Oleksandr, postgraduate student, department of wagon engineering and product quality. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Тел.: +38 050 161-18-48. E-mail: [rokada\\_t@ukr.net](mailto:rokada_t@ukr.net).

Статтю прийнято 25.12.2025 р.

УДК 621.3.017:621.331

## ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ

Канд. техн. наук Д. Л. Сушко

### PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MODERN METHODS AND MEANS OF MONITORING THE THERMAL STATE OF LOCOMOTIVE TRACTION MOTORS

PhD (Tech.) D. Sushko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351917>

*Анотація.* У статті розглянуто актуальні питання забезпечення надійної роботи тягових електродвигунів локомотивів в умовах підвищених теплових навантажень. Зазначено, що саме порушення теплового режиму є одним із головних чинників деградації ізоляції обмоток і зниження ресурсу двигуна. Стаття узагальнює існуючі наукові розробки та пропонує напрями подальших досліджень у сфері моніторингу теплового стану тягових двигунів локомотивів з урахуванням конструктивних особливостей, експлуатаційних умов і цифровізації систем управління.

*Ключові слова:* тяговий електродвигун, теплові втрати, тепловий моніторинг, температурна модель.

*Abstract.* This article examines the current challenges and future directions in monitoring the thermal state of locomotive traction electric motors, particularly in the context of increasing power

*demands and operational reliability requirements. Thermal overload is identified as a key factor contributing to insulation degradation and motor failure. A classification of the main sources of heat loss in DC traction motors is provided, along with an analysis of their impact on cooling efficiency and thermal stability. The paper presents a comparative overview of modern monitoring approaches, including direct methods (temperature sensors) and indirect methods (temperature estimation via electrical parameters). The specific challenges of applying these methods to DC traction motors are highlighted, especially the technical limitations of installing sensors in rotating components. The study emphasizes the role of thermal modeling, such as equivalent thermal circuit models and the finite element method, which allow detailed visualization of temperature distribution within motor components and support the design of effective thermal control systems. Special attention is given to the use of artificial neural networks and Digital Twin technologies for predictive monitoring. These intelligent systems, trained on operational or laboratory data, can accurately estimate internal temperatures in inaccessible zones and enable early fault detection. The integration of ANN-based models with real-time data from sensors and simulation results forms a foundation for adaptive condition-based maintenance. This work generalizes the latest research trends and outlines future prospects for developing hybrid monitoring systems that combine classical models, sensor technologies, and machine learning algorithms, considering the structural and operational features of traction motors used in domestic locomotive fleets.*

**Keywords:** traction motor; heat losses, thermal monitoring, temperature model.

**Вступ.** У сучасних умовах експлуатації залізничного транспорту суттєво зростають вимоги щодо надійності та енергоефективності тягових електродвигунів (ТЕД), які є основними елементами електроприводів локомотивів. Тяговий рухомий склад функціонує в умовах інтенсивних механічних і електричних навантажень, значних температурних коливань і перевантажень, що підвищує ризик виходу з ладу вузлів електрообладнання.

За статистичними даними, до 35 % усіх відмов електроустаткування локомотивів припадає саме на тягові двигуни. Найчастішими причинами несправностей ТЕД є пошкодження ізоляції (30 %), зниження її електричного опору (5 %), виникнення кругового вогню по колектору (15 %) і зношення якірних підшипників (15 %) [1]. Тобто надійність роботи ТЕД значною мірою визначена станом ізоляційної конструкції обмоток, яка в процесі експлуатації погіршується внаслідок дії термічних, електричних і механічних навантажень.

Одним із головних чинників, що обмежують ресурс ТЕД, є порушення

теплого режиму. Особливо вразливою залишається ізоляційна конструкція ТЕД, яка за умов перегріву швидко деградує. Надмірне підвищення температури спричиняє інтенсивне старіння ізоляційних матеріалів, зниження їхньої електричної міцності, що в підсумку призводить до електричного пробоя ізоляційної конструкції ТЕД.

За таких обставин актуальним є впровадження систем постійного моніторингу теплового стану ТЕД, які допомагають виявляти аномальні режими роботи, оперативно реагувати на відхилення та запобігати аварійним ситуаціям.

Отже, розроблення і удосконалення сучасних методів і технічних засобів моніторингу теплового стану тягових електродвигунів є важливим науково-практичним завданням, що має важливе значення для підвищення надійності, ефективності та безпеки експлуатації локомотивів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання моніторингу теплового стану тягових електродвигунів (ТЕД) уже тривалий час є предметом наукових досліджень у контексті

підвищення надійності та ефективності електротяги на залізничному транспорті. Серед широкого спектру підходів виділяють теплове моделювання, впровадження систем діагностики, сенсорні технології та інтелектуальні методи прогнозування стану електричних машин.

Серед вітчизняних публікацій потрібно зазначити дослідження [1], у якому обґрунтовано необхідність удосконалення методів контролю теплового стану ТЕД електровозів. У публікації проаналізовано переваги та недоліки як прямих, так і непрямих методів вимірювання температури обмоток. Автори підкреслюють доцільність побудови розрахункових моделей теплового балансу та використання даних струму, напруги і часу навантаження для оцінювання температурних характеристик у режимі реального часу.

Слід зазначити, що значна частка парку рухомого складу залізниць України обладнана тяговими електродвигунами постійного струму. Це обумовлює потребу у створенні та впровадженні таких систем моніторингу, які враховують особливості конструкції, теплоутворення та охолодження двигунів саме цього типу. Підходи, застосовані для асинхронних ТЕД, не завжди можуть бути ефективно перенесені на двигуни постійного струму без відповідної адаптації.

Серед зарубіжних досліджень заслуговує на увагу робота [2], у якій запропоновано двонаправлену електротермічну модель тягових двигунів, що враховує вплив електричного навантаження на тепловий стан, і навпаки. Такий підхід дає змогу підвищити точність оцінювання температури у внутрішніх вузлах, де неможливо встановити датчики, і реалізувати онлайн-прогнозування перегріву.

У дослідженні [3] подано фреймворк онлайн-моніторингу для високошвидкісних електропоїздів, що включає бездротові датчики температури, модулі обробки сигналів, хмарне сховище даних і засоби

візуалізації теплового навантаження в реальному часі. Така система дає змогу не лише діагностувати перегрів, а й управляти навантаженням для уникнення пікових режимів.

Варто також звернути увагу на роботу [4], присвячену застосуванню машинного навчання та нейронних мереж у задачах класифікації та прогнозування відмов електродвигунів. У цих дослідженнях розглянуто можливість комбінованої обробки температурних, вібраційних і електричних сигналів із метою створення універсальної системи діагностики технічного стану.

Отже, аналіз останніх публікацій свідчить про наявність значного наукового та прикладного зацікавлення щодо вдосконалення методів моніторингу теплового стану ТЕД. Проте більшість існуючих рішень або обмежені лабораторними умовами, або не враховують особливості експлуатації вітчизняного парку, зокрема широкого застосування двигунів постійного струму. Це відкриває перспективу для подальших досліджень у напрямі побудови адаптивних, точних і технологічно сумісних систем моніторингу.

**Визначення мети та завдання дослідження:** узагальнення сучасних підходів щодо моніторингу теплового стану тягових електродвигунів, виявлення основних проблем, що обмежують ефективність існуючих систем діагностики, а також визначення перспектив подальшого розвитку методів теплового контролю з урахуванням особливостей експлуатації тягового рухомого складу в Україні.

**Основна частина дослідження.** Як уже було зазначено, тягові електродвигуни локомотивів працюють в умовах підвищеного теплового навантаження. Основними зовнішніми чинниками є механічні навантаження, температурні коливання, вібрації та пил, що створюють несприятливі умови для тепловідведення. Однак головним джерелом нагріву є внутрішні втрати електричної енергії, що

виникають безпосередньо під час електромеханічного перетворення енергії.

Теплове навантаження у ТЕД формується саме внаслідок цих внутрішніх втрат, які мають суттєвий вплив як на температурний режим, так і довговічність ізоляції та загальну енергоефективність локомотива. Аналіз структури втрат є важливою передумовою для розроблення ефективних систем моніторингу та прогнозування технічного стану двигунів.

З урахуванням особливостей конструкції та режимів роботи основні типи втрат у тягових двигунах постійного струму (рис. 1) класифікують так [5]:

- втрати в обмотках (джоулеві втрати) – виникають внаслідок протікання струму через опір обмоток збудження та якоря і є основним джерелом нагріву обмоток та ізоляції;

- втрати в сталі (гістерезисні та вихрові струми) – зумовлені змінами

магнітного поля в осерді якоря під час обертання. Їхня величина залежить від частоти, магнітної індукції та властивостей матеріалу;

- механічні втрати – включають втрати на тертя в підшипниках і опір повітря під час вентиляції, знижують загальний ККД двигуна;

- щітково-колекторні втрати – пов’язані з контактним опором між щітками і ламелями колектора, посилюються внаслідок зносу, іскріння або поганого притискання щіток;

- додаткові (перехідні) втрати – виникають під час пуску, реверсу, зміни навантаження, їх важко точно розрахувати, але вони істотно впливають на тепловий стан у динаміці.

Розподіл втрат електричної енергії в ТЕД постійного струму локомотивів зображено на рис. 1.

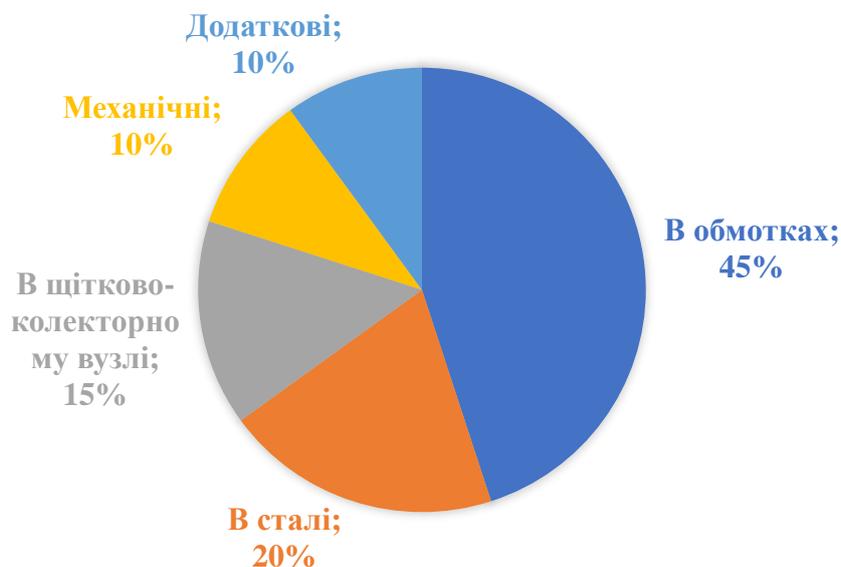


Рис. 1. Розподіл втрат електричної енергії в ТЕД постійного струму локомотивів

Особливості теплових втрат у ТЕД в умовах експлуатації мають важливе значення для побудови ефективних систем моніторингу:

- нерівномірний характер навантаження тягових двигунів, зокрема з рухом на ухилах або в умовах частих прискорень і гальмувань, призводить до зростання джоулевих і вихрових втрат;

- часті переходи між режимами (наприклад під час маневрової роботи або зміни напрямку руху) сприяють локальному перегріву щітково-колекторного вузла, що ускладнює теплову стабільність;

- неповне або непостійне навантаження викликає неефективне використання енергії, оскільки частина втрат не супроводжена корисною роботою, але створює теплове навантаження на двигун.

У цьому контексті аналіз втрат має важливе практичне значення для моніторингу теплового стану, оскільки:

- дає змогу точно моделювати тепловий баланс ТЕД, що необхідно для прогнозування граничних температур;

- сприяє оптимізації алгоритмів охолодження та адаптації режимів роботи для конкретних умов навантаження;

- стає основою для непрямих методів моніторингу температури, зокрема через розрахунок втрат за параметрами струму, напруги та часу навантаження.

Сучасні підходи щодо моніторингу теплового стану тягових електродвигунів поділяють на прямі, непрямі. Прямі методи передбачають безпосереднє вимірювання температури у вузлах електродвигуна за допомогою встановлених датчиків або зовнішніх засобів теплового контролю. Ці методи дають точну інформацію про локальні температурні значення та допомагають оперативно реагувати на критичні теплові навантаження.

До основних засобів прямого контролю температури належать термопари, термістори, RTD-датчики, а також інфрачервона термографія. Основним недоліком цих засобів є складність їх установлення у внутрішні вузли тягових електродвигунів.

Так, на електровозах серії ДСЗ, оснащених тяговими асинхронними двигунами типу СТА-1200У1, контролюють температуру обмоток статора за допомогою датчиків Pt100. Ці датчики належать до типу RTD (Resistance Temperature Detector) і

функціонують на основі зміни електричного опору платинового елемента залежно від температури (100 Ом за температури 0 °С).

Датчики встановлені безпосередньо в пази обмоток статора та з'єднані із загальною системою теплового захисту локомотива, яка виконує такі функції:

- реєстрація температури в режимі реального часу;

- подавання сигналу тривоги у випадку перегріву;

- автоматичне відключення живлення в аварійному режимі.

Інфрачервона термографія є безконтактною технологією вимірювання температури, що дає змогу оперативно візуалізувати розподіл теплових полів на поверхні об'єкта в режимі реального часу. У застосуванні для тягових електродвигунів інфрачервону термографію використовують насамперед для періодичного контролю температури зовнішніх елементів корпусу двигуна.

Це обмежує можливості методу щодо повноцінного контролю внутрішніх температурних зон, де, власне, і виникає найбільше теплових навантажень.

Цю методику можна застосовувати як допоміжний засіб контролю температури для проведення стендових випробувань ТЕД.

На вітчизняних електровозах серії ДЕ1 моніторинг теплового стану тягових електродвигунів постійного струму реалізовано за допомогою датчиків температури типу ТСП-0287. Ці датчики забезпечують вимірювання температури повітря на вході та виході з охолоджувального каналу ТЕД, а також температури навколишнього середовища.

Отже, система не контролює безпосередньо температуру внутрішніх вузлів двигуна, проте дає змогу опосередковано оцінювати ефективність тепловідведення та виявляти перегрів у динамічних режимах роботи.

Застосування вбудованих температурних датчиків у конструкції

тягових електродвигунів постійного струму суттєво ускладнене через конструктивні особливості цих машин. Зокрема, обмотка якоря є рухомим елементом, що обертається, тому вмонтувати датчик безпосередньо в її пази практично неможливо. Це пов'язано з відсутністю технологічно прийнятних способів надійного зчитування температурного сигналу з обертової частини без застосування складних телеметричних або контактних рішень.

Крім того, навіть у статичних частинах конструкції встановлення температурних датчиків потребує:

- високої точності інтеграції в зону максимального теплового навантаження;
- дотримання електричної ізоляції та надійності з'єднань;
- стійкості до вібрацій і динамічних навантажень;
- технологічної сумісності зі збіркою двигуна.

Через це пряме вимірювання температури в обмотках якоря ТЕД постійного струму в умовах експлуатації є технічно складним і обмеженим, що обумовлює необхідність застосування непрямих або комбінованих методів моніторингу, що базовані на опосередкованому оцінюванні температурного стану за допомогою електричних параметрів або математичних теплових моделей.

Непрямі методи контролю температури не передбачають встановлення датчиків безпосередньо в зонах нагріву, а використовують залежності між температурою і такими параметрами, як струм, напруга або тривалість навантаження. Це дає змогу оцінювати температуру навіть у важкодоступних або рухомих зонах двигуна. Основою таких підходів є побудова моделей теплового балансу, які дають змогу відстежувати динаміку нагріву в реальному часі.

Серед непрямих методів контролю температури, що застосовують в умовах експлуатації тягових електродвигунів, найбільш поширеним є метод оцінювання

температури за зміною електричного опору обмоток [5, 6]. Знаючи початкову температуру та фіксуючи зміни опору, можна обчислити значення перегріву обмотки за допомогою температурного коефіцієнта опору:

$$\Delta\Theta = \left(\frac{R_2 - R_1}{R_1}\right) \cdot (k + \Theta_1) + \Theta_1 - \Theta_\alpha, \quad (1)$$

де  $\Theta_1$  – температура, °С, холодної обмотки в першому моменті температурних вимірювань;

$\Theta_\alpha$  – температура, °С, обмотки наприкінці температурних вимірювань;

$R_1$  – опір обмотки за температури  $\Theta_1$  (холодної);

$R_2$  – опір обмотки наприкінці температурних вимірювань;

$k$  – величина, обернена до температурного коефіцієнта опору за температури 0 °С матеріалу провідника, для міді  $k = 235$ , алюмінію  $k = 225$ .

Такий метод широко використовується завдяки простоті реалізації, можливості інтеграції з існуючими системами контролю та відсутності потреби в безпосередньому встановленні датчиків у важкодоступних зонах. Однак його недоліком є те, що він дає усереднене значення температури всієї обмотки, не враховуючи локальних перегрівів, які можуть виникати в пазах або лобових частинах. Це знижує точність діагностики потенційно небезпечних температурних зон, особливо за нерівномірного теплового навантаження.

Для більш повного і гнучкого аналізу теплового стану ТЕД застосовують методи моделювання теплового балансу, які дають змогу враховувати різні джерела втрат, умови охолодження, інерційність теплових процесів і параметри навантаження. Такі моделі дають змогу не лише оцінювати температуру в недоступних зонах, а й реалізовувати прогностичний моніторинг і алгоритми попередження перегріву двигуна.

Для більш повного та гнучкого аналізу теплового стану тягових електродвигунів (ТЕД) застосовують методи моделювання теплового балансу. Вони дають змогу враховувати численні чинники: джерела теплових втрат, умови охолодження, інерційність теплових процесів, а також режими навантаження. Використання таких моделей дає змогу оцінювати температурні поля навіть у недоступних для встановлення датчиків зонах, реалізовувати прогнозний моніторинг, а також створювати алгоритми превентивного керування перегрівом двигуна.

Основою математичного опису є рівняння теплового балансу, яке відображає

зміну температури тіла в часі як результат надходження та відведення теплової енергії:

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = P_{\text{вх}} - P_{\text{втр}} \text{ ,} \quad (2)$$

де  $C$  – теплова ємність об’єкта;

$dT/dt$  – швидкість зміни температури;

$P_{\text{вх}}$  – теплова потужність, що надходить;

$P_{\text{втр}}$  – потужність тепловідведення.

На основі цього підходу можна формувати різні типи теплових моделей – від простих однозонних до складних багатозонних схем, зокрема таких, що описують теплові зв’язки всередині якоря. Одним із прикладів є еквівалентна теплова схема заміщення, зображена на рис. 2 і 3.

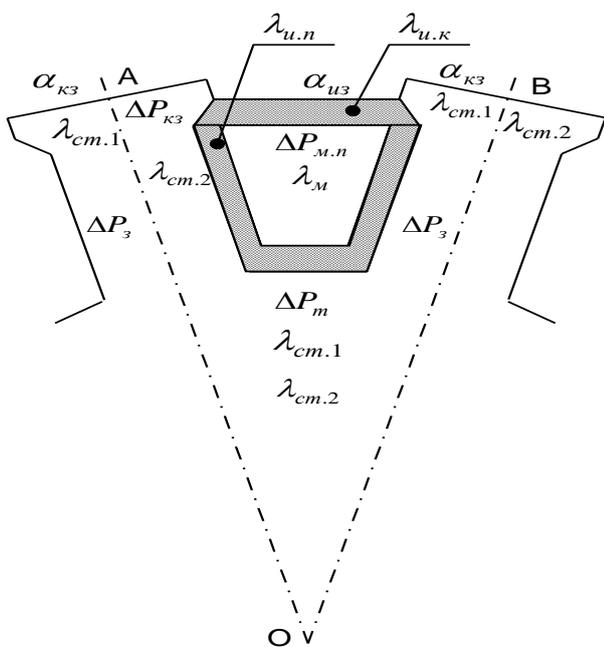


Рис. 2. Переріз якоря

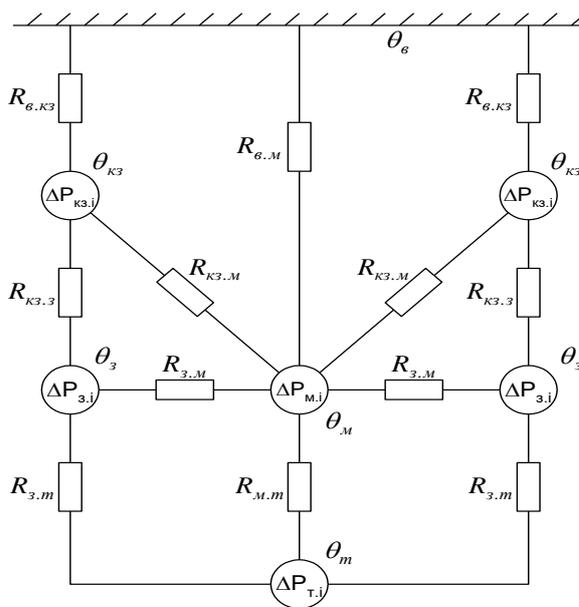


Рис. 3. Двомірна теплова схема перерізу якоря

За особливостями теплових процесів у ТЕД можна розглядати теплові процеси з урахуванням таких джерел тепла [7]:

- втрати в пазовій міді обмотки якоря  $\Delta P_{\text{м.п}}$ ;
- втрати в лобовій міді обмотки якоря  $\Delta P_{\text{м.л}}$ ;

- втрати в сталі коронок зубців  $\Delta P_{\text{к.з}}$ ;
- втрати в сталі зубців  $\Delta P_{\text{з}}$ ;
- втрати в тілі пакета стали якоря  $\Delta P_{\text{т}}$ ;
- втрати на поверхні колектора  $\Delta P_{\text{к}}$ ;

теплопровідність:  
 – теплопровідність пакета сталі уздовж листів  $\lambda_{ст.1}$ ;  
 – теплопровідність пакета сталі поперек листів  $\lambda_{ст.2}$ ;  
 – теплопровідність міді  $\lambda_m$ ;  
 – теплопровідність пазового клина  $\lambda_{i,k}$ ;  
 – теплопровідність пазової ізоляції  $\lambda_{i,p}$ ;  
 тепловіддачі:  
 – тепловіддача від коронок зубців до повітря  $\alpha_{к.з}$ ;  
 – тепловіддача від пазового клина до повітря  $\alpha_з$ .

Аналіз теплової схеми виконано матричним методом, при цьому розв'язок системи рівнянь (матриця температур) має вигляд [8]

$$\Theta = -\Lambda^{-1}P, \quad (3)$$

де  $\Lambda$  – матриця теплових провідностей;

$P$  – матриця потужності втрат і тепловіддачі до повітря в зазорі.

Із метою підвищення точності опосередкованого оцінювання температури в активних зонах ТЕД застосовують методи скінченних елементів (МСЕ), які допомагають детально розрахувати температурні поля в обмотках, сталевому магнітопроводі та елементах охолодження. Модель побудована на основі теплопровідності, теплоємності та джерел внутрішніх теплових втрат з урахуванням реальних граничних умов. Отримані розподіли температур є основою для ідентифікації критичних зон перегріву та оптимізації систем охолодження.

Основними етапами для побудови МСЕ-моделі є:

- геометричне моделювання елементів конструкції тягових двигунів – створення 2D- або 3D-моделі з урахуванням реальної конструкції;
- задавання теплових властивостей матеріалів – теплопровідність ( $\lambda$ ), теплоємність ( $C$ ), густина ( $\rho$ );

- визначення джерел тепла – втрати в обмотках, втрати в сталі, щітково-колекторні втрати;

- задавання граничних умов – температура охолоджувача, коефіцієнти тепловіддачі, симетрія;

- сітка скінченних елементів – дискретизація моделі для точного розрахунку;

- розв'язання рівняння теплопровідності;

- аналіз результатів – візуалізація температурних полів, виявлення перегрітих зон.

Переваги МСЕ:

- можливість моделювання складної геометрії;

- висока точність із правильним налаштуванням;

- урахування теплової інерції та реальних умов охолодження;

- поєднання з електромагнітними чи механічними аналізами.

Як приклад застосування методу скінченних елементів для теплового аналізу в роботах зарубіжних авторів можна навести дослідження, подане в публікації [9]. У цій роботі було змодельовано розподіл температурного поля в асинхронному електродвигуні за нормального режиму та за наявності міжвиткового замикання в обмотці статора.

На рис. 4 показано результати тривимірного аналізу температурного поля, отриманого за допомогою ANSYS, з урахуванням реальної конструкції двигуна, типу охолодження і теплових граничних умов [9]. Симуляція дала змогу виявити локальні зони перегріву, що відповідають місцям потенційних пошкоджень.

Із розвитком цифрових технологій з'являються інноваційні підходи щодо теплового моніторингу. Серед них концепція цифрових двійників (Digital Twin), що передбачає створення віртуальної копії тягового електродвигуна з постійним оновленням даних у реальному часі. Такі

моделі дають змогу не лише відслідковувати поточний стан, а і прогнозувати майбутні теплові перевантаження. На додачу застосування штучних нейронних мереж забезпечує можливість виявлення аномалій і прогнозування перегріву на основі накопичених і поточних експлуатаційних

даних, що суттєво підвищує ефективність технічного обслуговування.

Також активно розвиваються інтелектуальні методи, що використовують штучні нейронні мережі, машинне навчання та цифрові твіни для оцінювання температури внутрішніх вузлів двигуна.

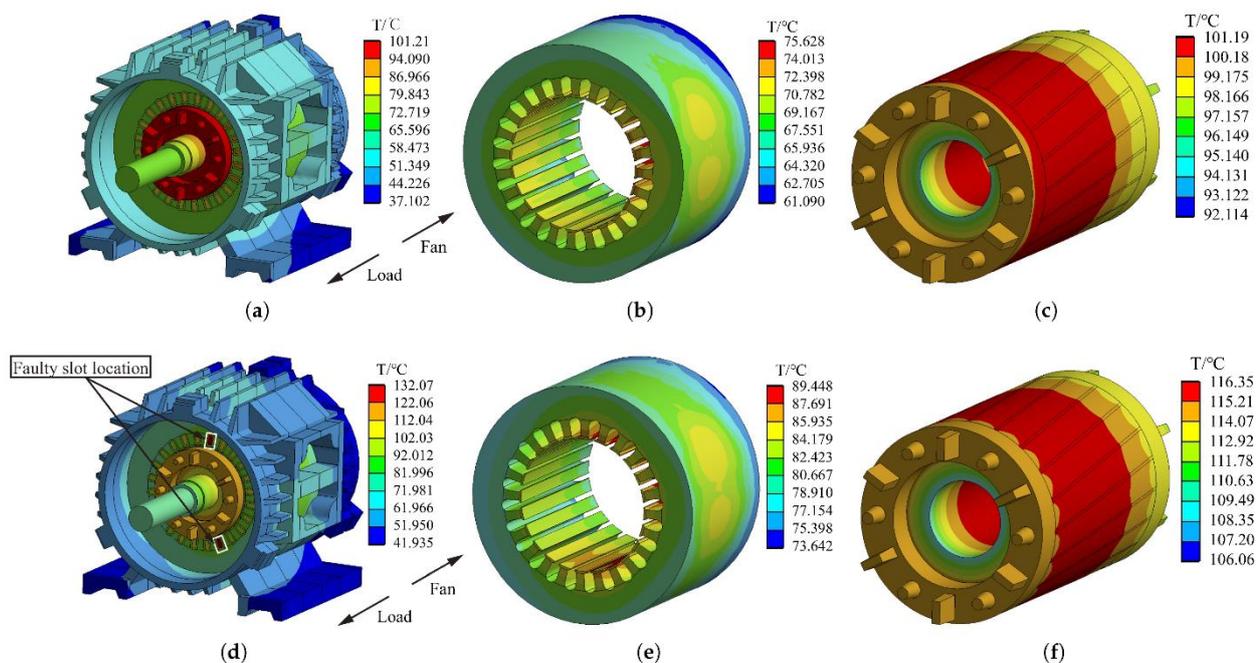


Рис. 4. Результати моделювання теплового поля:  
 а-с – нормальний режим роботи;  
 d-f – режим із міжвитковим замиканням

У дослідженні [10] було продемонстровано доцільність використання нейромережевих алгоритмів для прогнозування температури обмоток і підшипників асинхронного двигуна. Застосування глибоких нейронних мереж дало змогу досягти високої точності навіть в умовах перехідних режимів. Моделі були навчені на експериментальних даних з урахуванням струму, напруги, частоти обертання та інших параметрів.

Штучні нейронні мережі є не лише інструментом для оцінювання або прогнозування температурних режимів у тягових електродвигунах, але й важливим елементом у формуванні цифрових

двійників (Digital Twin). Завдяки здатності обробляти великі масиви експлуатаційних даних і навчатися на історичних профілях навантаження, ШНМ інтегровані в архітектуру цифрових моделей двигунів, допомагаючи створювати адаптивні системи моніторингу в реальному часі.

У низці сучасних робіт [11] зазначено, що нейромережеві алгоритми, поєднані з фізичними моделями, є основою концепції Digital Twin для тягових машин. Зокрема, у роботі [12] подано цифровий двійник електропривода електровоза з можливістю виявлення несправностей і моделювання теплових режимів у динаміці, а в роботі [13] реалізовано ієрархічний підхід щодо

побудови Digital Twin електродвигуна, у якому ШНМ відповідають за оцінювання складних параметрів, таких як внутрішня температура або втрати, на основі сигналів із мінімальною кількістю датчиків.

Отже, ШНМ є перспективним інструментом для створення систем інтелектуального теплового моніторингу тягових електродвигунів, які можуть не лише відслідковувати поточний тепловий стан, а й прогнозувати перегрів на ранніх етапах.

**Висновки.** У роботі проведено комплексний аналіз сучасних методів моніторингу теплового стану тягових електродвигунів (ТЕД) локомотивів.

Розглянуто можливості моделювання теплових процесів у ТЕД із використанням еквівалентних теплових схем і методу скінченних елементів (FEM). Ці підходи забезпечують більш глибоке уявлення про розподіл температури в конструктивних елементах двигуна і дають змогу точно оцінювати теплові навантаження в реальних умовах експлуатації.

Окрему увагу приділено перспективам застосування інтелектуальних методів, зокрема штучних нейронних мереж, які відкривають нові можливості для прогнозування перегрівів і створення цифрових двійників електричних машин. Такий підхід дає змогу підвищити надійність, ефективність і адаптивність систем обслуговування електрорухомого складу.

Системи теплового моніторингу ТЕД мають важливе значення для забезпечення надійності та довговічності тягових електродвигунів. Основні труднощі пов'язані з неможливістю безпосереднього контролю температури у критичних вузлах та обмеженнями традиційних моделей у динамічних умовах.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення цифрових моделей, розроблення нових датчиків та інтеграцію систем моніторингу в структури управління технічним обслуговуванням за станом.

### Список використаних джерел

1. Жалкін Д. С., Таран А. В. Удосконалення методів контролю теплового стану тягових електричних двигунів електровозів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2015. Вип. 158, т. 2. С. 74-82.
2. Nguyen T., Yang H., Park J. Bi-directional Coupled Electro-Thermal Behaviors of Traction Motors for High-Speed Railway Distributed Traction System. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 220. [https://www.researchgate.net/publication/372089818\\_Bi-directional\\_coupled\\_electro-thermal\\_behaviors\\_of\\_traction\\_motor\\_for\\_high-speed\\_railway\\_distributed\\_traction\\_system](https://www.researchgate.net/publication/372089818_Bi-directional_coupled_electro-thermal_behaviors_of_traction_motor_for_high-speed_railway_distributed_traction_system).
3. Dong H., Ma H., Wang Z., Man J., Jia L., Qin Y. An Online Health Monitoring Framework for Traction Motors in High Speed Trains Using Temperature Signals. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. Vol. 19. P. 1389-1400. <https://www.researchgate.net/publication/362865401>.
4. Huan WANG, Yan-Fu LI, Jianliang REN. Machine learning for fault diagnosis of high-speed train traction systems: A review. *Front. Eng.* 2024. 11(1): 62–78. DOI: 10.1007/s42524-023-0256-2. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0256-2>.
5. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019. Машини електричні обертові. Ч. 1. Номінальні та робочі характеристики (ІЕС 60034-1:2017, ІДТ). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 76 с.
6. Безрученко В. М., Варченко В. К., Чумак В. В. Тягові електричні машини електрорухомого складу. Дніпропетровськ: Вид-во ДНУЗТ, 2003. 252 с.
7. Сінчук О. М., Сушко Д. Л. Побудова математичної теплової моделі тягового електричного двигуна постійного струму. *Вісник Східноукраїнського національного*

університету ім. В. Даля. *Технічні науки. Серія Транспорт*. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2005. № 8 (90). Ч. 2. С. 50-54.

8. Сінчук О. М., Устенко О. В., Сушко Д. Л. Удосконалення системи післяремонтних випробувань тягових двигунів електрорухомого складу. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2008. Вип. 97. С. 50-59.

9. Chen P., Xie Y, Li D. Thermal Field and Stress Analysis of Induction Motor with Stator Inter-Turn Fault. *Machines*. 2022. 10(7). 504. <https://doi.org/10.3390/machines10070504>.

10. Li D., Kakosimos P. Temperature Estimation in Induction Motors using Machine Learning. *arXiv*. 2025. № arXiv:2504.18105. <https://doi.org/10.1109/APEC43580.2023.10131273>.

11. Hu J., Xiao H., Ye Z., Luo N., Zhou M. Research and Prospects of Digital Twin-Based Fault Diagnosis of Electric Machines. *Sensors*. 2025. Vol. 25 (8). Art. 2625. DOI:10.3390/s25082625. <https://doi.org/10.3390/s25082625>.

12. Cherifi K., Schulze P., Mehrmann V. et al. Hierarchical modeling for an industrial implementation of a Digital Twin for electrical drives. *arXiv preprint*. 2022. arXiv:2207.02171. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.02171>.

13. Boscaglia L., Boglietti A., Nategh S., Scema C. Numerically Based Reduced-Order Thermal Modeling of Traction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. 57(4). <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2021.3077553>.

---

Сушко Дмитро Леонідович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9747-3263. Тел.: +38 (066) 121-60-10. E-mail: dimals80@i.ua.

Sushko Dmytro, PhD (Tech). Associate Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9747-3263. Tel.: +38 (066) 121-60-10. E-mail: dimals80@i.ua.

Статтю прийнято 25.12.2025 р.

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

---

UDC 621.313

### ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF OPERATION OF MODERN CONTROL SYSTEMS FOR BRUSHLESS TRACTION MOTORS

Dr. Sc. (Tech.) S. V. Panchenko, Dr. Sc. (Tech.) M. M. Babaiev,  
Candidate of Technical Sciences V. P. Nerubatskyi

### АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУЧАСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БЕЗКОЛЕКТОРНИМИ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ

Доктори техн. наук С. В. Панченко, М. М. Бабаєв,  
канд. техн. наук В. П. Нерубацький

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352044>

***Abstract.** The further development of railway traction rolling stock is currently largely associated with the predominant use of brushless traction motors, primarily asynchronous ones. However, the efficiency of brushless traction drives largely depends on the control system, which forms the optimal current distribution, ensures smooth acceleration, reliable braking with recuperation, and stable operation in a wide range of modes. At the same time, the implementation of control systems in brushless traction drives of railway transport is accompanied by a number of technical and operational problems. The purpose of the article is to conduct a comprehensive analysis of operating conditions and assess the energy efficiency of modern brushless traction motor control systems used in traction rolling stock, in order to determine their advantages, disadvantages and promising areas of improvement, which will allow formulating recommendations for choosing optimal algorithms and technical solutions for specific operating conditions of traction rolling stock. The object of the study is the control processes of brushless traction electric motors in electric drives of traction rolling stock. The paper considers the main types of brushless traction machines (synchronous with permanent magnets, asynchronous), modern control algorithms (vector control, direct torque regulation, adaptive and optimizing approaches), as well as hardware solutions for converters and diagnostic systems. A comparative analysis of losses and efficiency indicators was carried out in typical driving modes (acceleration, steady driving, braking with recuperation) taking into account temperature and load factors. The proposed methodology includes modeling in a simulation computer environment, construction of efficiency maps, and experimental validation on a bench with an inverter and current/voltage/temperature sensors. The expected result of the work is recommendations for optimizing control algorithms and drive configurations to increase the efficiency of traction motors, as well as a set of criteria for selecting a drive depending on the operating mode of traction rolling stock. The practical value lies in the possibility of using the research results in the design and modernization of electric motors of traction rolling stock, which will increase the reliability of transport vehicles.*

***Keywords:** operational efficiency, brushless traction motor, traction rolling stock, control system, efficiency, recuperation.*

***Анотація.** Подальший розвиток тягового рухомого складу залізниць нині багато в чому пов'язаний із переважним використанням безколекторних тягових двигунів, насамперед*

асинхронних. Однак ефективність роботи безколекторних тягових приводів значною мірою залежить від системи керування, яка формує оптимальний розподіл струмів, забезпечує плавний розгін, надійне гальмування з рекуперацією і стабільність роботи в широкому діапазоні режимів. Водночас впровадження систем керування в безколекторних тягових приводах залізничного транспорту супроводжено низкою технічних та експлуатаційних проблем. Метою статті є проведення всебічного аналізу умов експлуатації та оцінювання енергоефективності сучасних систем керування безколекторними тяговими двигунами, які застосовують на тяговому рухомому складі, для визначення їхніх переваг, недоліків і перспективних напрямів вдосконалення, що дасть змогу сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальних алгоритмів і технічних рішень для конкретних умов роботи тягового рухомого складу. Об'єктом дослідження є процеси керування безколекторними тяговими електродвигунами в електроприводах тягового рухомого складу. У роботі розглянуто основні типи безколекторних тягових машин (синхронні з постійними магнітами, асинхронні), сучасні алгоритми керування (векторне керування, пряма регуляція моменту, адаптивні та оптимізуючі підходи), а також апаратні рішення перетворювачів і систем діагностики. Проведено порівняльний аналіз витрат і показників ефективності за типових режимів руху (розгін, сталий рух, гальмування з рекуперацією) з урахуванням температурних і навантажувальних факторів. Пропонована методика включає моделювання в імітаційному комп'ютерному середовищі, побудову карт ефективності, а також експериментальну валідацію на стенді з інвертором і датчиками струму/напруги/температури. Очікуваним результатом роботи є рекомендації щодо оптимізації алгоритмів керування і конфігурацій привода для підвищення ефективності роботи тягових двигунів, а також набір критеріїв для вибору привода залежно від режиму експлуатації тягового рухомого складу. Практична цінність полягає в можливості використання результатів дослідження для проектування та модернізації електродвигунів тягового рухомого складу, що дасть змогу підвищити надійність засобів транспорту.

**Ключові слова:** ефективність експлуатації, безколекторний тяговий двигун, тяговий рухомий склад, система керування, коефіцієнт корисної дії, рекуперація.

**Relevance of the research topic.** Further progress in railway traction rolling stock is largely due to the widespread introduction of brushless traction motors, primarily asynchronous ones. One of the main tasks that arises during the development of new locomotives is to improve their traction properties. In turn, one of the features of an asynchronous traction motor is the decisive influence of the control method on its characteristics. Therefore, the task of studying the algorithms and principles of the control system is one of the priorities in creating new locomotives with an asynchronous traction drive.

**Introduction.** The modern development of traction rolling stock is inextricably linked to the widespread implementation of energy-saving technologies in traction electric drive

systems. One of the key areas for increasing energy efficiency and reliability is the use of brushless traction motors – synchronous machines with permanent magnets and asynchronous motors with a squirrel-cage rotor. Such electric machines are characterized by a high efficiency, reduced maintenance requirements, and the ability to implement complex control algorithms due to the absence of a collector-brush assembly, which limited the operation of classic DC traction motors.

However, the efficiency of brushless traction drives largely depends on the control system, which forms the optimal current distribution, ensures smooth acceleration, reliable braking with recuperation, and stable operation in a wide range of modes. At the current stage of technology development, the most common are vector control (Field

Oriented Control, FOC) and Direct Torque Control (DTC). These methods allow you to maximize the energy potential of the machine, reduce losses, limit torque ripple, and improve the quality of current collection.

At the same time, the introduction of brushless control systems in traction drives of railway transport is accompanied by a number of technical and operational problems [1, 2]. Among them:

- increased requirements for the cooling system due to high specific loads;
- the need to ensure the stability of control parameters in conditions of temperature changes and aging of elements;
- the need for accurate current and voltage sensors, as well as the development of sensorless algorithms to improve reliability;
- complexity of hardware implementation based on powerful transistor converters and microprocessor controllers.

Thus, it is relevant to conduct a systematic analysis of operating conditions and assess the effectiveness of modern control systems for brushless traction motors, which will allow formulating recommendations for increasing efficiency in real driving modes.

**Analysis of recent research and publications.** In [3], an analysis of the operating conditions of traction drives of electric rolling stock with asynchronous traction motors was conducted, and the starting characteristics of traction electric drives with different control systems were obtained both in the absence and presence of power and load failures. It is shown that at frequencies lower than nominal, a traction electric drive with direct torque control has higher accuracy of speed and torque regulation, lower energy consumption from the power source, lower torque overshoot, but a higher level of torque ripple than a traction electric drive with vector control. At the same time, at frequencies higher than nominal, vector control has higher speed control accuracy, less torque overshoot, shorter transient duration, and less torque ripple than direct torque control. In addition, it was found that the traction drive with direct torque control

is more resistant to power and load failures. The disadvantage of the work is the lack of results of research into the operation of these systems in the electric braking mode, which could contribute to a more complete comparison of traction characteristics with different control systems.

In [4], a theoretical justification of the possibility of using the power factor as a criterion for developing optimized automatic control systems for traction drives of AC electric rolling stock is provided. An analytical time dependence of the power factor of the traction drive was obtained, which is a convolution of two time functions – efficiency and the coefficient of use of active power of the traction drive; an algorithm for eliminating stochastic effects of disturbances acting on the traction drive from the traction power supply system and mechanical load was developed. The significance of the results obtained lies in improving the quality of control of AC traction drives. However, the proposed scheme of optimized automatic control of the traction drive was not fully considered, in which the parameters of the sampling frequencies of the input and output parts of the traction drive are used as controlled parameters, and the efficiency is used as an optimization criterion, which would make it possible to improve the quality of regulation when building an optimal automatic control system for the traction drive.

The article [5] presents a method for optimizing the pulse-width modulation frequency in frequency converters, the load of which is an asynchronous motor, according to the criterion of minimum total power losses in the inverter power transistors and the resistance of the motor windings. The proposed calculation method allows, through the use of modern software environments (MATLAB/Simulink, NI Multisim, MelcoSim), to determine the dependence of static and dynamic losses in power IGBT transistors with fairly high accuracy (as shown in publications [6–8]). To calculate losses in the motor, it is shown that the switching frequency of the power switches affects the harmonic

distortion factor and the root-mean-square value of the phase current of the induction motor. Provided that only the first harmonic of the current performs a useful effect in the induction motor, the dependence of additional power losses on the switching frequency is given. The presented methodology allows to determine the optimal modulation frequency in frequency converters with asynchronous motors and to ensure minimal total power losses and maximum efficiency in the system “autonomous voltage inverter – asynchronous motor”. The limitation is that the practical application of analytical expressions that describe losses in the steel of induction motors from higher harmonics of the inverter is quite difficult due to the uncertainty of the calculation coefficients for different motor designs. In addition, the issue of determining the optimal switching frequency of power transistors at different values of load torque and motor speed remains unresolved.

In [9], control strategies for induction motors in railway systems are analyzed. The main focus is on drives operating with a low ratio of switching frequency to the fundamental frequency and in the remodulation region or six-step operation mode, as these are the most complex cases. Modulation methods, effective drive operating modes and their influence on its dynamic characteristics, as well as the design of the machine are considered. Extended modeling results are presented, as well as experimental results obtained using a traction drive. However, the impact of overheating, vibration and insulation aging on the motors service life is not sufficiently considered.

The materials [10] consider the main approaches to the control of complex objects. It is shown that today it is advisable to use approaches related to proactive supervision for the control of rolling stock with traction asynchronous electric motors. Using a mathematical model that describes the movement of a three-car diesel train, its application for implementing proactive control is demonstrated. To refine the parameters of the existing model in the control system,

approaches related to the identification of the parameters of the object during its operation are proposed. In this case, it is proposed to identify the parameters of the object in two stages: at the first (lower) level, determine the parameters related to traction asynchronous electric motors, and at the second (upper) level, the parameters related to train movement. However, the issue of economic feasibility of applying new approaches to the control system was left out.

The traction motor consumes a significant portion of the energy in railway rolling stock, so in [11] a comparative study was conducted between Indirect Field Oriented Control (IFOC) with sensors and sensorless IFOC in terms of both performance and energy, with the aim of determining which one has better efficiency. It is determined that the sensorless method using the Model-Referenced Adaptive System (MRAS) can be applied to railways. However, its performance decreases in the braking mode, which is manifested in acceleration fluctuations, although the speed characteristics are good. From an energy perspective, the sensor method provides more energy from regenerative braking. From the total energy consumption, the sensor method can save up to 33.76 % energy compared to the sensorless method on a fixed track. A disadvantage of the study can be considered the lack of statistical data on traction motor failures in industrial operation.

Article [12] is a technical review of methods for controlling brushless DC motors without position and speed sensors. The achievements of sensorless technology are reviewed and the latest developments in this field are presented with their advantages and disadvantages, including an analysis of practical implementation problems and applications. The most relevant estimation and model-based methods, such as the sliding-mode observer, the extended Kalman filter, the adaptive system with a reference model, adaptive observers (full-order and pseudo-reduced order), and artificial neural networks, are briefly analyzed. A drawback of the study is

the lack of consideration of the impact of digital technologies and Smart Grid on the development of electric drives.

In cases where frequency speed control is not required in an asynchronous electric drive (for example, in ventilation systems or pumps), the use of frequency converters is economically impractical. In such situations, it is more appropriate to use thyristor AC voltage regulators, known in the industry as soft starters [13, 14]. Soft starters, unlike frequency converters, provide worse speed and torque control capabilities of an asynchronous motor, but are characterized by a significantly lower cost, a simpler control system, and are the best option for driving motor-compressors, motor-fans, and other installations that do not require precise or deep speed and torque control [15].

Works [16, 17] consider a control system for a thyristor device for smooth starting of an asynchronous motor with constant load torque. During the simulation modeling, it was established that the operation of the soft starter allows to reduce the starting current and starting torque by almost half. The results of theoretical research are implemented in a real physical prototype of a soft starter. An image of the boards of the developed soft starter is provided and its technical characteristics are indicated.

In [18] it is noted that vector-controlled traction drives are widely used on mainline locomotives with induction motors. Traction motors can fail due to faults that occur during locomotive operation. To prevent the failure of traction motors, real-time functional diagnostic systems are needed. The implementation of such systems will allow detecting the occurrence of faults in the traction motor at an early stage and preventing further development of the defect. The paper proposes a structural diagram of functional diagnostics for monitoring the condition of the rotor of an asynchronous motor and develops an algorithm for its operation.

In [19] it is noted that in modern traction drive systems of rolling stock with asynchronous traction motors, vector systems have found the greatest application as control

systems. Reducing losses in the traction drive system and, as a result, reducing electricity consumption depends on the accuracy of regulation of controlled parameters. This study proposes a method for taking into account the saturation of the motor magnetic circuit through the main inductance of the motor as a function of the flux linkage of the magnetic circuit. Based on the proposed method, a simulation of a vector control system with and without saturation was carried out in the MATLAB software environment. Comparison of the simulation results showed that neglecting saturation leads to an increase in the motor rotor slip by 0.0111 relative units and, as a result, to a decrease in the rotor efficiency by 1.02 %. The disadvantage of the article is the lack of a comprehensive approach to considering the “motor – converter – load – control system” system.

In [20], all complex electrical machines, their control circuits, and embedded systems used for the practical implementation of these circuits are listed. It was determined that the induction motor and the permanent magnet synchronous motor were the most efficient and suitable alternative for driving electric vehicles. Furthermore, since torque and speed can be controlled simultaneously with minimal noise and ripple, the FOC approach remains an ideal control method. A limitation of the paper is the lack of actual motor load tests, comparing theoretical and practical performance.

The autonomous voltage inverter belongs to the most common types of power conductor converters used in various industries, which is due to the widespread use of asynchronous motors [21]. One of the key performance indicators of an autonomous voltage inverter is its energy efficiency, which largely depends on the sinusoidality of the output voltage and current. Additional losses caused by higher harmonics in the load, which is usually an asynchronous electric motor, depend on these parameters. The results of the study of the energy characteristics of autonomous voltage inverters when using various modulation

algorithms and in the remodulation mode are discussed in detail in [22–26].

In [27], a review of the advances in the field of brushless synchronous motors is presented, as there is a growing interest in advanced motor control and overcoming the shortcomings of traditional motor control. Traditional motor control strategies are simple and easy to maintain, however, they require fine tuning and are dependent on changes in motor parameters. To address these and many other issues (power factors, torque ripple, current limiting, voltage limiting, speed limiting), advanced control techniques are needed to improve the performance of motor drive control. Advanced control methods include predictive model control, sliding mode control, reinforcement learning, and fuzzy logic. This article provides a comprehensive review of advances in control methods and discusses the challenges and limitations associated with their practical application. The paper is limited by the lack of practical verification of the research results.

The publication [28] aims to improve high-performance control strategies for brushless direct current (BLDC) motors in electric vehicles, with a particular emphasis on the use of an electronic differential system (EDS) – a rear differential control system. The experimental results show that the inclusion of the electronic differential gives promising results. These results demonstrate the improved efficiency of the electric vehicle's propulsion system, highlighting the positive impact of electronic differentials on overall performance. A limitation of the publication is the lack of consideration of modern energy efficiency requirements.

The article [29] notes that the control characteristics of a brushless DC motor (BLDCM, a complex nonlinear system) significantly determine the control characteristics of an electromechanical drive. In order to find a more effective control method for it, this paper takes the Hall sensor-based BLDCM as the research object and presents three control methods: «single closed-loop

control method based on the speed loop», «double closed-loop control method based on the speed loop and current hysteresis loop», and «double closed-loop control method based on the fuzzy controlled speed loop and current hysteresis loop». Modeling, simulation, and comparison of control systems based on these three control methods show that the third method, which uses the deviation and deviation coefficient of the reference speed and feedback speed as inputs, and outputs the current reference value through fuzzy proportional-integral control and current hysteresis, has the best tracking performance (e.g., short regulation time and no overshoot in the regulation process) when the speed command or load changes suddenly. The results of this work provide a certain theoretical basis and reference value for the research, design, and practical application of the control method of BLDCM and electromechanical drive.

In [30], the use of a fuzzy logic-based closed-loop speed control approach for brushless direct current (BLDC) motors in electric vehicles is investigated to overcome the shortcomings of traditional control methods by improving dynamic performance, response time, and stability under varying load conditions and parameter uncertainties. This is achieved by using a state space modeling method for a BLDC motor incorporating a fuzzy logic controller (FLC) for precise speed control. The results show that the FLC provides smooth speed transitions, no overshoot, and zero steady-state error with a settling time of only 0.05 s, as opposed to 0.1 s for the PID controller. According to these results, FLC is a better option for controlling BLDC motor speed in electric vehicles, guaranteeing efficient driving force, less mechanical stress, and greater driving stability.

Publications [31–34] are devoted to the study of the energy efficiency of rolling stock with an asynchronous electric drive.

**Defining the purpose and objectives of the research.** The purpose of the article is to conduct a comprehensive analysis of operating conditions and assess the energy efficiency of

modern brushless traction motor control systems used in traction rolling stock, to determine their advantages, disadvantages and promising areas of improvement, which will allow formulating recommendations for choosing optimal algorithms and technical solutions for specific operating conditions of traction rolling stock. To achieve the goal, the following tasks were set:

- to review the design features and characteristics of modern brushless traction motors;
- analyze existing management methods and identify their strengths and weaknesses;
- to investigate methods for assessing the effectiveness of control systems in different operating modes;
- consider the hardware implementation of control systems and measuring instruments;
- to review the experimental part and model validation;
- compare and summarize the results obtained.

#### **The main part of the research.**

***Design features and characteristics of modern brushless traction motors.*** The development of electric traction over the past decades has led to the transition from DC collector machines to brushless electric motors, which are characterized by increased reliability and energy efficiency. Today, two main types of brushless motors are used in traction drives of rolling stock:

1. Induction Motors (IM), which are characterized by the fact that [35, 36]:

- is the most common type of traction machine due to its simple rotor design (short-circuited «squirrel cage»), lack of contact nodes, and low cost;
- have high reliability, the ability to operate in overload modes, and good dynamic properties;
- the disadvantage is the relatively lower efficiency compared to permanent magnet synchronous machines, especially in low load modes, as well as the need to implement

complex control algorithms to achieve high efficiency.

2. Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM), which are characterized by the fact that [37, 38]:

- magnets based on rare earth materials (NdFeB, SmCo) are used in the rotor, which ensures high power density and efficiency (up to 95–97 %);
- the advantages are compactness, low losses, and the ability to operate in a wide speed range;
- disadvantages are high cost due to the use of expensive magnets, complexity of thermal regime, sensitivity to demagnetization during overloads and high temperatures.

A relatively new type of brushless motor that combines simplicity of design with precision control capabilities are valve-inductor motors. They are highly reliable due to the absence of windings on the rotor and show excellent performance at low speeds. However, at present, valve-inductor motors have not yet become widespread in rail transport, and they can be found mostly only on experimental rolling stock.

The design features of brushless traction motors, first of all, can be summarized as follows [39, 40]:

- 1) stator – a three-phase winding with distributed or concentrated coils, made taking into account minimization of steel losses and increasing the slot filling factor;
- 2) rotor: for IM – aluminum or copper short-circuited cage; for PMSM – embedded or surface permanent magnets;
- 3) refrigeration – usually (oil, water) or wind – an important aspect for traction motors, motor parts operate at high temperatures;
- 4) diagnostic systems – temperature, vibration, flow and voltage sensors, which allow you to control the motor operation in real time.

Analysis of scientific works [41–45] makes it possible to equalize the characteristics of asynchronous motors and synchronous motors with permanent magnets (Table 1).

Table 1

Equalization of characteristics of asynchronous motors and synchronous motors  
with permanent magnets

Characteristic	IM	PMSM
Efficiency, %	90–94	95–97
Power density	Medium	High (up to 20–30 % more)
Cost	Lower	Higher (due to magnets)
Reliability	Very high (simple rotor)	High, but depends on the preservation of the magnets
Control algorithms	Need complex (FOC, DTC), especially for energy efficiency	FOC is widely used, provides high efficiency
Overloading capacity	Good, resistant to short-term overloads	Limited due to the risk of demagnetization of magnets
Service	Minimal, simple design	Minimal but necessary temperature control
Using	Locomotives, metro, electric trains	Light transport, high-speed trains, trams, electric buses

Regarding application, it can be noted that induction motors are widely used in locomotives of the Siemens, Alstom, Hyundai Rotem series, as well as in the Kyiv and Kharkiv metros after modernizations, induction motors with permanent magnets are increasingly being introduced in new models of trams, electric buses, and high-speed trains (for example, Shinkansen in Japan).

**Brushless traction motor control systems.** The efficiency of brushless traction electric motors is largely determined not only by their design characteristics, but also by the choice of control algorithm. Modern control systems provide [46]:

- precise torque and speed control;
- weak field mode to extend the speed range;
- energy efficiency optimization;
- possibility of regenerative braking;
- protection of power and electromechanical parts;
- generation of controlled voltage/current by the inverter and simulation to achieve the required physical values on the motor;
- reduction of torque ripple and noise, as well as improvement of dynamic response.

In the practice of traction rolling stock, the following algorithms are most common [47–50]:

1) vector control (FOC) – involves transition to the  $dq$  coordinate system, where the stator current is decomposed into two components:  $i_d$  – controls the magnetic flux,  $i_q$  – determines the electromagnetic torque. Thus, the control becomes similar to the control of a DC motor, which greatly simplifies the regulation. The advantages of vector control include high dynamic response, smooth torque regulation, high accuracy across the entire speed range, and the ability to implement energy-saving strategies (MTPA, MTPV). Disadvantages include requiring precise knowledge of motor parameters (inductances, resistances, magnetic fluxes), and complexity of real-time implementation (requires a DSP/FPGA controller);

2) Direct Torque Control (DTC) – directly controls torque and magnetic flux using the inverter voltage vector. This is done by measuring stator currents and estimating the flux state. The advantages of this algorithm include very fast dynamic response, simpler structure than FOC (fewer transformations), high stability when changing motor parameters.

Disadvantages include high torque and current ripple, noisy operation, limitations in the low-speed range;

3) optimizing algorithms (MTPA, MTPV, recovery):

- MTPA (Maximum Torque per Ampere) – a strategy that minimizes current consumption at a given torque, allowing to reduce losses in the windings;

- MTPV (Maximum Torque per Voltage) – used in high-speed modes when the inverter voltage is limited, allows you to obtain maximum torque at the available voltage value;

- regenerative braking – recuperation optimization algorithms allow for maximum energy return to the network or storage, which is critically important for urban transport (frequent starts/stops);

4) sensorless control methods – often used to increase reliability and reduce system cost (without a rotor speed/position sensor). These methods include:

- estimation of rotor position by electromotive force (EMF observer);

- adaptive state observers;

- MRAS-based methods (Model Reference Adaptive System).

The advantages of using sensorless control methods are a reduction in the number of sensors (and, as a result, higher reliability) and lower operating costs, the disadvantages are a decrease in accuracy at low speeds and the need for complex evaluation algorithms [51, 52].

Comparative characteristics of the considered control systems are given in Table 2.

Table 2

Comparative characteristics of control systems

Algorithm	Torque accuracy	Dynamics	Losses/efficiency	Realization	Typical applications
FOC	High	High	Low losses, MTPA/MTPV capability	Complicated	Trams, metro, electric trains
DTC	Medium	Very high	Slightly higher ripple losses	More simple	Locomotives, heavy duty
MTPA/MTPV	High	High	Optimized losses	Used together with FOC	High-speed transport
Sensorless	Medium	Medium	Sensor savings	Complex models	Electric buses, metro

Regarding promising areas of development of control systems, the following can be noted [53, 54]:

- adaptive and predictive control – allows you to predict the state of the drive several steps ahead and minimize losses in real time;

- artificial intelligence and neural networks – to optimize torque, reduce losses and identify motor parameters in operation;

- integration with the transport energy system – optimization of motor operation together with energy storage systems.

**Electric drive modeling and efficiency assessment methods.** Evaluating the efficiency of brushless traction motor control systems is impossible without the use of mathematical modeling [55]. It allows you to study the operation of the drive in different modes, obtain loss and efficiency maps, and determine optimal control algorithms for specific operating conditions.

A flow-oriented  $dq$  model (in synchronously rotating coordinates) is usually used to model brushless machines.

The stress equations in the  $dq$  coordinate system for PMSM have the form [56]:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_c L_q i_q; \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_c (L_d i_d + \psi_f), \end{cases} \quad (1)$$

where  $u_d$ ,  $u_q$  is the voltages on the  $d$  and  $q$  axes;

$i_d$ ,  $i_q$  is the currents on the  $d$  and  $q$  axes;

$L_d$ ,  $L_q$  is the inductances;

$R_s$  is the stator winding resistance;

$\psi_f$  is the magnetic flux;

$\omega_c$  is the electrical angular velocity.

The torque of an electric motor is defined as:

$$M_c = \frac{3}{2} p (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q), \quad (2)$$

where  $p$  is the number of pole pairs.

Similar models exist for induction motors taking into account slip and inductive currents in the rotor [57–60].

To correctly assess energy efficiency, the following losses are taken into account:

– losses in windings (copper):

$$P_{Cu} = 3I^2 R_s; \quad (3)$$

– losses in steel ( $P_{Fe}$ ) – hysteresis, eddy current (depend on frequency and induction);

– mechanical losses ( $P_{mech}$ ) – friction in bearings, ventilation/cooling;

– losses in the inverter ( $P_{inv}$ ) – losses due to switching transistors, losses due to conduction of power switches and diodes;

– additional losses ( $P_{add}$ ) – due to current harmonics, due to parasitic effects in the windings and magnetic core.

The total system losses can be defined as:

$$P_{loss} = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mech} + P_{inv} + P_{add}. \quad (4)$$

Then the efficiency can be defined as:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}}. \quad (5)$$

To obtain a generalized assessment, an efficiency map is constructed - a contour graph that displays the efficiency value in the «torque – speed» coordinates. The X axis shows the speed (revolutions/minute or rad/s), the Y axis shows the torque (N·m), and the cells show the efficiency contours (%). The map allows you to assess the ranges where the drive operates most efficiently and the modes where losses increase sharply.

Possible operating scenarios for simulation could be the following:

– acceleration – from 0 to operating speed, evaluation of dynamics and losses in transient modes;

– constant motion (cruise) – at different speeds and loads;

– regenerative braking – assessment of energy returned to the grid;

– frequent stops/starts – typical of urban transport;

– overload modes – operation with a torque higher than the nominal, heating assessment;

– temperature effect – increased winding resistance and degradation of PMSM magnets.

The following tools can act as modeling software:

– MATLAB/Simulink (Simscape Electrical) is the most common tool for modeling electric drives, allowing you to implement FOC/DTC and estimate losses;

– PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation) – convenient for modeling power circuits and thermal processes in power switches;

– ANSYS Maxwell/Motor-CAD – used for detailed electromagnetic analysis and calculation of losses in steel;

– LTspice/PSIM – used for analyzing inverter circuits.

The effectiveness assessment methodology includes:

– building a mathematical model of the motor and inverter in MATLAB/Simulink;

– implementation of the control algorithm (FOC or DTC);

– conducting simulations in typical modes (acceleration, steady motion, braking);

– calculation of losses (in copper, in steel, mechanical, inverter);

– construction of efficiency maps for each algorithm;

– comparison of results (FOC vs. DTC, with and without optimizations);

– determining modes in which energy consumption is minimal and formulating recommendations.

**Hardware implementation of control systems and measuring instruments.** The efficiency and reliability of brushless traction motors depend not only on the control algorithm, but also on the hardware of the drive. The main components are: power inverter, microprocessor controller, current and voltage sensors, position and temperature sensors, cooling and diagnostic systems.

The power inverter generates a three-phase voltage to power the motor from a DC source (catenary, battery, supercapacitor). The main requirements for traction system inverters are as follows [61]:

– high reliability during long-term operation;

– ability to work with high currents (hundreds of amperes);

– high switching frequency to minimize ripple;

– minimal losses on power switches.

Typical components are:

– IGBT modules (Insulated Gate Bipolar Transistor) are the standard in traction technology [62];

– SiC-MOSFETs (Silicon Carbide) are promising, allowing to increase the switching frequency and reduce losses, especially in urban transport [63, 64];

– LC filters – to reduce harmonics and electromagnetic interference [65, 66].

FOC, DTC and adaptive algorithms require high-performance computing platforms. The following microprocessor controllers can be used:

– DSP (Digital Signal Processor) – TI C2000 family, Infineon Aurix;

– FPGA (Field Programmable Gate Array) – for fast calculations, complex algorithms and parallel signal processing;

– ARM/Microcontroller – for auxiliary functions (protection, monitoring).

The main functions of the controller include:

– generation of PWM signals for inverter control;

– execution of control algorithms in real time;

– processing of signals from sensors;

– diagnostics and communication with the upper control level (CAN, Ethernet, MVB).

Sensors and measuring instruments include:

– current sensors – shunt resistors, Hall effect sensors, optical current sensors (in high-voltage circuits);

– voltage sensors – voltage dividers, isolated transformer sensors;

– rotor position sensors – encoders (optical, magnetic), resolvers (high accuracy, used in traction drives), sensorless estimators (based on electromotive force);

– temperature sensors – thermistors (Pt100, NTC), thermocouples in the winding and bearing area, infrared sensors for contactless monitoring.

Traction motors and inverters operate in harsh conditions and generate significant heat fluxes. Therefore, it is necessary to use appropriate cooling systems:

– air cooling – used in less powerful drives (trams, electric buses);

– liquid cooling is standard for locomotives and powerful electric trains, and can be water or oil;

– thermal sensors are a mandatory element for controlling modes and preventing overheating.

To ensure reliability and safety of operation, diagnostic and protection systems are used, which, in particular, provide for:

– insulation monitoring and leakage current control;

– diagnostics of the condition of the windings (assessment of partial discharges, analysis of current harmonics);

– overheating and overload detection;

– inverter self-diagnostic systems (key failure, abnormal currents);

– remote data transmission to the rolling stock technical monitoring system.

Examples of modern hardware solutions are:

– Siemens SITRAS – inverters for metro and trams on IGBT modules;

– Mitsubishi Electric – traction converters with SiC transistors for high-speed trains;

– Bombardier MITRAC – complex control systems with integrated diagnostics;

– Alstom ONIX – inverter with optimized cooling system.

#### ***Experimental part and model validation.***

Experimental studies are a necessary stage in confirming the correctness of mathematical modeling and the effectiveness of brushless traction motor control systems. They allow:

– check the accuracy of the calculated data;

– identify additional losses not accounted for in the model;

– assess the reliability of the hardware;

– to formulate recommendations for implementation in real operating conditions.

A typical stand for researching a traction electric drive consists of [67, 68]:

– brushless traction motor (PMSM or asynchronous) – the object of study;

– power inverter – controlled by a PWM controller that implements FOC or DTC;

– control systems – DSP/FPGA controller with data acquisition software;

– load module – electrodynamic brake, generator with rheostat or second motor that simulates the load;

– cooling systems – for stable operation during long-term tests;

– measuring equipment – current sensors (Hall effect), voltage sensors, encoders/resolvers for determining the rotor position, temperature sensors in the winding and bearing area, computer data acquisition system (DAQ).

The tests are carried out in several stages:

– no-load operation – estimation of steel losses and mechanical losses, measurement of magnetizing current;

– load characteristics – measurement of torque dependence on current, construction of mechanical characteristics at different rotation speeds;

– acceleration and braking mode – assessment of transient dynamics, analysis of recuperation performance;

– thermal tests – monitoring of heating of windings and power switches, determination of limit modes;

– energy indicators – calculation of instantaneous and average efficiency values, comparison of losses in different modes (FOC vs. DTC).

The most common measuring instruments used during testing are:

– oscilloscopes – for analyzing voltage and current waveforms;

– power analyzers (Yokogawa, HIOKI) – for accurate determination of efficiency;

– high-sampling-rate data acquisition (DAQ) systems;

– thermal imagers and thermocouples – for monitoring temperature fields;

– vibroacoustic sensors – for monitoring mechanical defects.

The model validation procedure consists of:

– comparison of mechanical characteristics – experimental results vs. simulation (torque–velocity);

– loss assessment – analysis of differences between calculated and measured losses, introduction of correction factors into the model;

– construction of efficiency maps – comparison of experimental efficiency maps with model ones, verification of optimal operation ranges;

– checking control algorithms – analysis of the quality of torque and speed regulation, assessment of system stability during transient processes.

The expected results of experimental studies are usually:

– confirmation of the adequacy of the mathematical model;

– determining the real limits of drive efficiency;

– clarification of the influence of parasitic losses and temperature factors;

– formation of practical recommendations for implementation on traction rolling stock.

**Comparison and generalization of results.** After conducting mathematical modeling and experimental studies, the results obtained are compared for different control systems for brushless traction motors [69–72].

1. Comparison of simulation and experimental results:

– mechanical characteristics (torque–speed) should practically coincide in the calculated and experimental data. The deviation should usually not exceed 5–7 %, which would confirm the adequacy of the mathematical model;

– losses in windings and steel in the model are usually slightly underestimated, since the experiment takes into account additional parasitic effects (harmonics, heating of conductors);

– the efficiency map from the experiment usually turns out to be more «narrowed», that is, the real area of maximum efficiency is slightly smaller than in the simulation.

2. Comparison of control algorithms:

– FOC – high accuracy of torque and speed regulation, smooth transients, stable

operation in a wide speed range, slightly lower efficiency at high speeds due to increased switching losses;

– DTC – very fast dynamics, simpler control algorithm, increased torque and current pulsations, higher value of losses in steel due to uneven flows;

– adaptive and optimization algorithms (taking into account temperature, minimizing losses) – the best energy performance, the ability to maintain optimal mode in real time, require more computing power of the controller.

3. Energy efficiency:

– on average, the efficiency of the traction electric drive on FOC is 92–94 %;

– for DTC – 90–92 %;

– for adaptive FOC with loss minimization – up to 95 %;

– regenerative braking modes are particularly effective – up to 25–30 % of the driving energy can be returned to the network or battery.

4. Reliability and performance:

– FOC provides the smoothest drive operation and lower vibration levels;

– DTC is more reliable in terms of simple control structure, but requires harmonic filtering;

– Adaptive methods require expensive hardware (FPGA, high-end DSP) and more complex debugging.

5. Practical recommendations:

– for urban electric transport (trams, electric buses) it is advisable to use FOC with recovery and optimization for minimum losses;

– for high-speed trains and locomotives, it is advisable to combine FOC with adaptive temperature and current control algorithms;

– DTC can be effective for systems where speed is critical, such as in magnetic levitation trains or specialized drives;

– the use of SiC transistors in inverters allows for an increase in efficiency by 2–3 % compared to traditional IGBTs;

– it is necessary to integrate online diagnostic systems to monitor temperature, insulation status and switching parameters.

Thus, the analysis showed that modern control systems for brushless traction motors provide a high level of energy efficiency and reliability. The best results are achieved when using FOC with adaptive loss optimization algorithms, as well as using inverters based on SiC elements. This allows you to reduce energy consumption by 5–10 %, increase efficiency up to 95 %, and increase the durability of equipment, which is critically important for rail transport and urban power systems.

**Conclusions.** Modern control systems for brushless traction motors provide a high level of energy efficiency (up to 95 %), reliability, and control flexibility. The combination of vector control algorithms with adaptive strategies and the use of the latest power electronics (SiC) opens up opportunities for further reducing energy consumption and increasing the resource of traction rolling stock. This makes such systems one of the key areas of development of modern means of transport.

Based on the research conducted, the following conclusions can be drawn:

– the analytical review showed that the most common control algorithms are FOC and DTC. They provide high dynamic and energy characteristics, but differ in control accuracy, ripple level, and hardware implementation requirements;

– performing mathematical modeling in the MATLAB/Simulink environment allows you to build efficiency maps, estimate losses in different modes (acceleration, steady state, regenerative braking) and confirms the effectiveness of FOC and DTC in different operating conditions;

– the main losses of an electric drive include: winding losses, steel losses, mechanical losses and inverter losses. Their accurate accounting is the key to improving efficiency;

– conducting experimental research is aimed at confirming the adequacy of the model: the differences between theoretical and practical results usually do not exceed 5–7 %.

### Reference

1. Biliuk I., Shareyko D., Savchenko O., Havrylov S., Fomenko A., Maiboroda O. Problems of brushless motors applying in electric drives. *Scientific Collection «InterConf+»*. 2022. Vol. 27, Iss. 133. P. 269–278. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.11.2022.025>.
2. Polater N., Tricoli P. (2022). Technical review of traction drive systems for light railways. *Energies*. Vol. 15, Iss. 9. 3187. <https://doi.org/10.3390/en15093187>.
3. Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Lukoševičius V., Keršys A., Kilikevičius S. Analysis of the efficiency of traction drive control systems of electric locomotives with asynchronous traction motors. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 9. 3689. <https://doi.org/10.3390/en16093689>.
4. Goolak S., Gorobchenko O., Holub H., Kulbovskiy I., Petrychenko O. Traction drive control system for railway electric rolling stock based on the application of power factor as an optimization criterion. *Problemele Energeticii Regionale*. 2025. Vol. 3, Iss. 67. P. 1–12. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.01>.
5. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1 (181). P. 103–110. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103>.
6. Підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, Д. А. Гордієнко та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 2. С. 22–35. <https://doi.org/10.18664/iksz.v28i2.283312>.

7. Дослідження точності моделювання втрат потужності в силових діодах і транзисторах / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, Д. А. Гордієнко та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Вип. 203. С. 73–87. DOI: 10.18664/1994-7852.203.2023.277905.
8. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Khoruzhevskiyi H. A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No. 2 (176). P. 82–88. DOI: 10.33271/nvngu/2020-82.
9. Fathy Abouzeid A., Guerrero J. M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control strategies for induction motors in railway traction applications. *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 3. 700. <https://doi.org/10.3390/en13030700>.
10. Dmitrienko V., Noskov V., Zakovorotniy A., Mezentsev N., Leonov S., Gasanov M. Proactive control of rolling stock with traction asynchronous electric motors. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570017>.
11. Maghfiroh H., Hermanu C., Nizam M. Sensorless control of railway traction motor in the energy point of view. *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICEVT48285.2019.8993990>.
12. Gamazo-Real J. C., Vázquez-Sánchez E., Gómez-Gil J. Position and speed control of brushless DC motors using sensorless techniques and application trends. *Sensors*. 2010. Vol. 10, Iss. 7. P. 6901–6947. <https://doi.org/10.3390/s100706901>.
13. Tytiuk V., Rozhnenko Z., Baranovska M., Berdai A., Chorny O., Saravas V. Soft Starters of Powerful Electric Motors and Economic Aspects of Their Application. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240859>.
14. Wang Q., Li H. A Kind of Soft Started Regulated Power Supply. *2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*. 2020. P. 926–929. <https://doi.org/10.1109/ICPICS50287.2020.9202366>.
15. Mohammadi M., Moghani J. S., Ansari S. A., Milimonfared J., Dehbashi A. Fuzzy logic based sensorless soft starter for constant frequency wind power plants. *2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2018. P. 538–543. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2018.8343854>.
16. Дослідження системи керування пристрою плавного пуску асинхронного двигуна / О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. А. Гордієнко та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 202. С. 62–77. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273622>.
17. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of electromechanical processes in the control system of a soft start device with an asynchronous motor. *Матеріали 14-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»* (Херсон, ХДМА, 16–18 березня 2023 р.). Херсон: ХДМА, 2023. С. 264–267.
18. Goolak S., Gorobchenko O., Holub H., Dudnyk Y. Increasing the efficiency of railway rolling stock operation with induction traction motors due to implementation of the operational system for diagnostic condition of rotor. *Diagnostyka*. 2024. Vol. 25, Iss. 4. 2024404. <https://doi.org/10.29354/diag/193809>.
19. Goolak S., Liubarskyi B. Vector control system taking into account the saturation of an induction motor. *Technical Gazette*. 2024. Vol. 31, Iss. 4. P. 1170–1178. <https://doi.org/10.17559/TV-20221015124239>.

20. Megrini M., Gaga A., Mehdaoui Y. Review of electric vehicle traction motors, control systems, and various implementation cards. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. 2025. Vol. 13, Iss. 3. P. 238–247. <https://doi.org/10.22098/joape.2024.13967.2077>.
21. Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з різними типами модуляції / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, В. Є. Кавун та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 180. С. 106–120.
22. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Proceedings*. 2021. P. 422–427. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071>.
23. Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з імпедансною і квазіімпедансною ланками у вхідному колі при застосуванні різних алгоритмів модуляції / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, В. Р. Цибульник та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 3. С. 19–31. DOI: 10.18664/iksz.v25i3.214089.
24. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Sushko D., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Improving the harmonic composition of output voltage in multilevel inverters under an optimum mode of amplitude modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, No. 8 (104). P. 17–24. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200021.
25. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Tsybulnyk V. R. Analysis of the energy efficiency of a two-level voltage source inverter in the overmodulation mode. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. No. 4 (172). P. 68–72. DOI: 10.29202/nvngu/2019-4/9.
26. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. Аналіз енергоефективності тривірневих автономних інверторів напруги в режимі перемодуляції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 4. С. 3–12. DOI: 10.18664/iksz.v0i4.177089.
27. Mashiri T., Muteba M. A review of advances in brushless synchronous motor drive's control techniques. *Eng*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. 8. <https://doi.org/10.3390/eng6010008>.
28. Saravana K. K., Narottam D., Prasad G., Kianoush E. A case study of different control schemes of brushless Dc drive for electric vehicle applications. *2023 International Conference on Next Generation Electronics (NEleX)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/NEleX59773.2023.10421394>.
29. Xie J., Zhang S., Yao Z. Modeling and simulation of control systems for brushless DC motor based on Hall sensor. In: Yan L., Duan H., Deng Y. (eds) *Advances in Guidance, Navigation and Control. ICGNC 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 845. Springer, Singapore. 2023. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2\\_630](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2_630).
30. Shenbagalakshmi R., Mittal S. K., Subramaniyan J., Vengatesan V., Manikandan D., Ramaswamy K. Adaptive speed control of BLDC motors for enhanced electric vehicle performance using fuzzy logic. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 12579. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90957-6>.
31. Нерубацький В. П., Плахтій О. А. Підвищення енергоефективності рухомого складу з асинхронним електроприводом. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 32-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, УкрДУЗТ, 24–25 жовтня 2019 р.)*. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 4 (додаток). С. 11–13.
32. Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А. Підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу з перетворювачем частоти. *Тези III Міжнар. наук.-практ. конф. «Рухомий склад нового покоління: із XX в XXI сторіччя» (Харків, УкрДУЗТ, 22–23 листопада 2023 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 81–83.
-

33. Kukishev D., Meshcheryakov V., Boikov A., Evseev A. Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive. *2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICEPDS.2018.8571784>.
34. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Increasing energy efficiency of asynchronous electric drive by optimization of switching frequency in frequency converter. Reports of the *IX International Scientific-Practical Conference «A Person, a Society, Communicative Technologies»* (Kharkiv, USURT, October 21–22, 2021). Kharkiv: TOV «Disa plus», 2021. P. 320–324.
35. Shokarov D., Zachepa I., Zachepa N., Chorna V., Susyk D. The control of the traction asynchronous electric drive of the miner electric locomotive with dual-mode supply. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 52–55. <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248950>.
36. Iorgulescu D., Samoilescu G., Solcanu V., Balaceanu M., Barbulescu C., Bordianu A. Applications of the Asynchronous Motor in the Anchoring Installation – Simulation and Advantages. *2020 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ISFEE51261.2020.9756133>.
37. Ramírez-Leyva F. H., Trujillo-Romero F., Caballero-Morales S. O., Peralta-Sánchez E. Direct torque control of a permanent-magnet synchronous motor with neural networks. *2014 International Conference on Electronics, Communications and Computers*. 2014. <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2014.6808570>.
38. Wang R., Zhang S., Yang Y., Wen Y., Sun X., Zhou Z., Li Y. Overview of deadbeat predictive control technology for permanent magnet synchronous motor system. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 17. 4668. <https://doi.org/10.3390/en18174668>.
39. Tosun O., Serteller N. F. O. (2022). The Design of the Outer-Rotor Brushless DC Motor and an Investigation of Motor Axial-Length-to-Pole-Pitch Ratio. *Sustainability*. Vol. 14, Iss. 19. 12743. <https://doi.org/10.3390/su141912743>.
40. Othman R. N. F. R., Sulaiman F., Rizuan S., Karim K. A., Jidin A., Sutikno T., Misron N. Design of hollow-rotor brushless DC motor. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2016. Vol. 7, Iss. 2. P. 387–396. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v7.i2.pp387-396>.
41. Sarac V., Iliev D. Synchronous motor of permanent magnet compared to asynchronous induction motor. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. 2017. Vol. 65, No. 4. P. 51–58. [https://eea-journal.ro/ro/2017/art-2017\\_4-08-p051.pdf](https://eea-journal.ro/ro/2017/art-2017_4-08-p051.pdf).
42. Осадчук Ю. Г., Козакевич І. А., Ільченко Р. А. Порівняльний аналіз асинхронних, синхронних машин з постійними магнітами та вентильних реактивних двигунів для гібридних транспортних засобів. *Вісник Криворізького національного університету*. 2016. Вип. 42. С. 94–99.
43. Du G., Li H., Jiang R., Li W., Hou S. (2024). Comprehensive comparison of different rotor structures of low-speed permanent magnet motor. *Energies*. Vol. 17, Iss. 13. 3300. <https://doi.org/10.3390/en17133300>.
44. Pellegrino G., Vagati A., Boazzo B., Guglielmi P. Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012. Vol. 48, Iss. 6. P. 2322–2332. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2227092>.
45. Gebremariam S. F., Wondie T. T. Comparative analysis of electric motor drives employed for propulsion purpose of battery electric vehicle (BEV) systems. *International Journal of Science and Research Archive*. 2023. Vol. 10, Iss. 02. P. 1097–1112. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.10.2.1074>.
46. Paul S., Han P.-W., Chang J., Chun Y.-D., Lee J.-G. State-of-the-art review of railway traction motors for distributed traction considering South Korean high-speed railway. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 14623–14642. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.411>.

47. Liam De Klerk M., Saha A. K. A comprehensive review of advanced traction motor control techniques suitable for electric vehicle applications. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 125080–125108. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110736>.
48. Feng J., Xu J., Liao W., Liu Y. (2017). Review on the traction system sensor technology of a rail transit train. *Sensors*. 2017. Vol. 17, Iss. 6. 1356. <https://doi.org/10.3390/s17061356>.
49. De Viaene J., Verbelen F., Derammelaere S., Stockman K. Energy-efficient sensorless load angle control of a BLDC motor using sinusoidal currents. *IET Electric Power Applications*. 2018. Vol. 12, Iss. 9. P. 1378–1389. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5059>.
50. Zbede Y., Apsley J. Field weakening control of a PM vehicle drive. *The Journal of Engineering*. 2019. Vol. 2019, Iss. 17. P. 3510–3515. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.5347>.
51. Akrami M., Jamshidpour E., Nahid-Mobarakeh B., Pierfederici S., Frick V. Sensorless control methods for BLDC motor drives: A review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2025. Vol. 11, Iss. 1. P. 135–152. <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3387371>.
52. Xu D., Wang B., Zhang G., Wang G., Yu Y. A review of sensorless control methods for AC motor drives. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2018. Vol. 2, Iss. 1. P. 104–115. <https://doi.org/10.23919/TEMS.2018.8326456>.
53. Cai W., Wu X., Zhou M., Liang Y., Wang Y. Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles. *Automotive Innovation*. 2021. Vol. 4. P. 3–22. <https://doi.org/10.1007/s42154-021-00139-z>.
54. Zhang P., Shi Z., Yu B., Qi H. Research on the control method of a brushless DC motor based on second-order active disturbance rejection control. *Machines*. 2024. Vol. 12, Iss. 4. 244. <https://doi.org/10.3390/machines12040244>.
55. Dhamal S. S., Bhatkar M. V. Modelling and simulation of three-phase induction motor to diagnose the performance on inter-turn short circuit fault in stator winding. *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8674900>.
56. Devi L. R., Sreekumar S., Bhakar R., Dileep G., Padmanaban S. Electric motor modeling, analysis, and design for E-mobility applications: A state of the art. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 12. 100985. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100985>.
57. Pillay P., Levin V. Mathematical models for induction machines. *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*. 1995. <https://doi.org/10.1109/IAS.1995.530355>.
58. Faiz J., Seifi A. R. Dynamic analysis of induction motors with saturable inductances. *Electric Power Systems Research*. 1995. Vol. 34, Iss. 3, P. 205–210. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(95\)00979-5](https://doi.org/10.1016/0378-7796(95)00979-5).
59. Sprangers R. L. J., Gysen B. L. J., Paulides J. J. H., Waarma J., Lomonova E. A. Calculation of induced rotor current in induction motors using a slotted semi-analytical harmonic model. *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2014. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960571.
60. Konuhova M. Modeling of induction motor direct starting with and without considering current displacement in slot. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, Iss. 20. 9230. <https://doi.org/10.3390/app14209230>.
61. Sambhavi Y. V., Ramachandran V. A technical review of modern traction inverter systems used in electric vehicle application. *Energy Reports*. 2023. Vol. 10. P. 3882–3907. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.056>.

62. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А. Енергоефективні топології та алгоритми модуляції в автономних інверторах напруги: монографія. Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. 248 с.

63. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiyi H. Prospects for the development of power electronics by application of technologies for production of power semiconductor switches based on silicon carbide. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Iss. 4. P. 170–173.

64. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Хоружевський Г. А. Перспективи розвитку силової електроніки шляхом застосування нових технологій на базі карбіду кремнію. *Тези доповідей Міжнар. наук.-техн. конф. «Енергоефективність на транспорті»* (Харків, УкрДУЗТ, 18–20 листопада 2020 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 44–45.

65. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8 (109). P. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327.

66. Shcherbak Y., Semenenko Y., Semenenko O., Karpenko N., Suprun O., Plakhtii O., Nerubatskyi V. Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2, No. 2 (110). P. 71–77. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229827.

67. Стенд для дослідження електропривода на базі безколекторного трифазного двигуна постійного струму / І. Білюк, О. Савченко, С. Ольшевський та ін. *Scientific Collection «InterConf+»*. 2023. Vol. 29, Iss. 139. P. 227–241. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.01.2023.024>.

68. Burenin V., Zarembo J., Žiravecka A., Ribickis L. Model of laboratory test bench setup for testing electrical machines. *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316586>.

69. Kumar A., Marwaha S., Manna M. S., Marwaha A., Kumar R., Amir M., Bajaj M., Zaitsev I. Comparative analysis of brushless DC and switched reluctance motors for optimizing off-grid water pumping. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 3527. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88045-w>.

70. Mopidevi S., Kiransai D., Sarathbabu D., Prasad K. R. K. V., Narendra B. K., Murali Krishna V. B. Design, control and performance comparison of PI and ANFIS controllers for BLDC motor driven electric vehicles. *Measurement: Sensors*. 2024. Vol. 31. 101001. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.101001>.

71. Intidam A., El Fadil H., Housny H., El Idrissi Z., Lassioui A., Nady S., Jabal Laafou A. Development and experimental implementation of optimized PI-ANFIS controller for speed control of a brushless DC motor in fuel cell electric vehicles. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 11. 4395. <https://doi.org/10.3390/en16114395>.

72. Nurriartono A., Mukhlisin A., Yuniarto M. N., Rijanto E. Performance comparison of BLDC motor controllers designed based on trapezoidal commutation and FOC available to purchase. *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2187, Iss. 1. 060002. <https://doi.org/10.1063/1.5138363>.

---

Panchenko Serhii Volodymyrovych, Doctor of Science (Tech.), Professor, Acting rector, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [panchenko074@ukr.net](mailto:panchenko074@ukr.net). ORCID ID: 0000-0002-7626-9933.

Babaiev Mykhailo Mykhailovych, Doctor of Science (Tech.), Professor, Head of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [mmbxiit@gmail.com](mailto:mmbxiit@gmail.com). ORCID ID: 0000-0003-3553-8786.

---

Nerubatskiy Volodymyr Pavlovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, в.о. ректора, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: ranchenko074@ukr.net. ORCID ID: 0000-0002-7626-9933.

Бабаєв Михайло Михайлович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: mmbxiit@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3553-8786.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Статтю прийнято 03.11.2025 р.

УДК 656.25:004.056:004.8

## **КІБЕРБЕЗПЕКА СИСТЕМ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ І ТЕЛЕМЕХАНІКИ. ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА РЕАГУВАННЯ НА ЗАГРОЗИ**

**Канд. техн. наук В. О. Сотник, асп. М. Г. гизи Алмамедова, А. А. Меліхов**

## **CYBER SECURITY OF RAILWAY AUTOMATION AND TELEMCHANICS SYSTEMS. ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR DETECTING AND RESPONDING TO THREATS.**

**Candidate of Technical Sciences V. O. Sotnyk,  
postgraduate student M. H. Almammadova, A. Melikhov**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352046>

***Анотація.** Стаття присвячена дослідженню критичних кіберзагроз, що виникають унаслідок швидкої цифровізації систем залізничної автоматики і телемеханіки, зокрема мікропроцесорної централізації та диспетчерської централізації. Автори обґрунтовують необхідність застосування передових технологій, таких як штучний інтелект, для забезпечення стійкості та безпеки критичної інфраструктури залізниці.*

*У статті проаналізовано критичні вразливості систем залізничної автоматики, вектори кібератак на основні системи. Досліджено вразливість систем до атак, типових для COTS-компонентів і стандартних протоколів (TCP/IP), а також загрози впровадження зловмисного ПЗ у прошивку для порушення логіки безпеки руху, що може спричинити зіткнення поїздів. Доведено, що ШІ забезпечує необхідний рівень моніторингу та реагування, який виходить за рамки традиційного сигнатурного захисту. Розглянуто механізми машинного та глибокого навчання, зазначено про критичну роль інтеграції ШІ з платформами SOAR (Security Orchestration, Automation and Response). Зроблено висновки, що штучний інтелект і автоматизовані системи реагування SOAR є основними для перетворення захисту з реактивного на проактивний, превентивний. Запропоновано для подальшого розвитку кіберзахисту систем залізничного транспорту передбачити інтеграцію SOAR із концепцією цифрового двійника залізничної мережі для досягнення повної автономної кібербезпеки.*

**Ключові слова:** кібербезпека, залізнична автоматика і телемеханіка, штучний інтелект, мікропроцесорна централізація, диспетчерська централізація, критична інфраструктура, безпека руху.

**Abstract.** The article is devoted to the study of critical cyber threats arising from the rapid digitization of railway automation and telemechanics systems, in particular microprocessor centralization and dispatching centralization. The authors justify the need to use advanced technologies, such as artificial intelligence (AI), to ensure the stability and security of critical railway infrastructure.

The article analyzes critical vulnerabilities of RAAS and provides a detailed analysis of cyberattack vectors on key systems. The vulnerability of systems to attacks typical for COTS components and standard protocols (TCP/IP) is investigated, as well as the threat of introducing malicious software into the firmware to disrupt traffic safety logic, which can cause train collisions. It has been proven that AI provides the necessary level of monitoring and response that goes beyond traditional signature-based protection. Machine and deep learning mechanisms are considered, and the critical role of AI integration with SOAR (Security Orchestration, Automation, and Response) platforms is emphasized. It is concluded that artificial intelligence and automated SOAR response systems are key to transforming protection from reactive to proactive and preventive. It is proposed that the further development of cyber protection for railway transport systems should provide for the integration of SOAR with the concept of a digital twin of the railway network in order to achieve complete autonomous cybersecurity.

**Keywords:** cybersecurity, railway automation and telemetry, artificial intelligence, microprocessor centralization, dispatch centralization, critical infrastructure, traffic safety.

**Вступ.** Швидкий перехід залізниць до цифрових технологій (ETCS, СЦБ на основі мікропроцесорної техніки, IoT) став джерелом кіберзагроз, у зв'язку з чим важливим став захист критичної інфраструктури. Аналіз сучасних кіберзагроз для систем залізничної автоматики і телемеханіки (СЗАТ) та обґрунтування застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) для підвищення їхньої стійкості та безпеки є темою дослідження. Цифровізація залізниці перетворила раніше ізольовані, «повітряно-розділені», релейні системи на мережеві промислові системи управління, значно розширивши їхню поверхню атаки.

**Аналіз кіберзагроз у системах залізничної автоматики і телемеханіки.** Аналіз кіберзагроз базований на критичності систем і їхніх технологічних

вразливостях. Мікропроцесорна централізація (МПЦ) є системою найвищої критичності, оскільки безпосередньо контролює безпеку руху (керування стрілками та сигналами). Злом системи МПЦ може призвести до зіткнень або сходження поїздів. Автоматичне блокування (АБ МП) визначає інтервали руху поїздів на перегонах, і його порушення може призвести до зупинки руху або небезпечного зближення. Диспетчерська централізація (ДЦ) – це центральна точка управління для великого регіону, що робить її єдиним пунктом відмови. Комунікаційні канали є «нервовою системою» СЗАТ і головною мішенню для кібератак, оскільки вони дають змогу здійснювати віддалене втручання. Аналіз вразливостей цих систем від кіберзагроз наведено в табл. 1.

## Вразливість систем залізничної автоматики і телемеханіки від кіберзагроз

Аспект/об'єкт	Характеристика системи	Вектор кіберзагрози
1	2	3
<b>Мікропроцесорна централізація</b>		
<b>Критичність</b>	Найвища критичність. Безпосередній контроль безпеки руху на станції (керування стрілками та сигналами). Злом системи може призвести до зіткнення/сходження поїздів	
<b>Технології</b>	Використання COTS-компонентів – мікропроцесори, операційні системи, стандартні мережеві протоколи (TCP/IP)	Вектори вразливості, відомі для стандартного ІТ-середовища (переповнення буфера, відомі експлойти ОС), можуть бути перенесені на МПЦ, якщо не забезпечена належна ізоляція та патчинг
<b>Програмне забезпечення</b>	Складне, великий обсяг коду, що керує логікою безпеки	Загроза полягає в зловмисному програмному забезпеченні (мальваре) або зміні прошивки, спрямовані на обхід або порушення логічних залежностей безпеки
<b>Обслуговування</b>	Потреба у віддаленому моніторингу та оновленні програмного забезпечення	Атаки через ланцюг постачання або компрометація віддалених сервісів/портів для діагностики та обслуговування
<b>Мікропроцесорне автоматичне блокування</b>		
<b>Критичність</b>	Визначає інтервали руху поїздів на перегонах. Порушення призводить до зупинки руху або небезпечного зближення	
<b>Датчики</b>	Сучасні системи використовують лічильники осей, які передають дані про зайнятість блок-ділянки по цифрових каналах	Вектор загроз полягає в компрометації цілісності даних. Наприклад, підміна даних про зайнятість колії, надсилання хибного сигналу про вільність зайнятої блок-ділянки або хибного сигналу про зайнятість вільної ділянки (що спричинить DoS-атаку на рух)
<b>Протоколи</b>	Часто інтегровані з кодовими системами або передають дані через мережу	Загроза полягає в прослуховуванні або втручанні в комунікаційні протоколи, що контролюють передавання сигналів, наприклад кодових сигналів автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС)

Продовження табл. 1

1	2	3
<b>Диспетчерська централізація</b>		
<b>Критичність</b>	Центральна точка управління для великого регіону, створення єдиного пункту відмови	
<b>Взаємодія</b>	Тісна інтеграція з корпоративною мережею (ІТ), включаючи системи планування, графіків руху, бази даних	Міграція загроз – атака на менш захищений ІТ-периметр (офісні мережі, електронна пошта) може дати змогу зловмиснику отримати плацдарм для проникнення в мережу ДЦ
<b>Інтерфейс</b>	Використання АРМ, які працюють зі стандартними ОС	DoS-атака на диспетчерський центр, яка блокує можливість віддаленого управління, змушуючи переходити на менш ефективне місцеве. Також шпигунство з метою отримання оперативної інформації про рух поїздів
<b>Комунікаційні інтерфейси</b>		
<b>Інтерфейс «Поле – Станція» (виконавчий рівень)</b>	Часто використовує промислові шини (Fieldbus) або спеціалізовані лінії зв'язку, які можуть мати недостатній захист від автентифікації	Підміна команд. Зловмисник, отримавши доступ до виконавчого контролера, може направити команду на переведення стрілки, минаючи логіку безпеки МПЦ. Це класичний сценарій атаки на цілісність системи
<b>Інтерфейс «Станція – диспетчерський центр»</b>	Великий радіус дії, використання стандартизованих телекомунікаційних протоколів	Атака типу «Людина посередині» або прослуховування трафіку. Це дає змогу перехоплювати команди ДЦ до станції та відповіді від станції до ДЦ. Наприклад, ДЦ отримує хибне повідомлення про успішне виконання команди, тоді як насправді команда не була виконана або була змінена
<b>Внутрішній інтерфейс МПЦ (логічний рівень)</b>	Основою безпеки МПЦ є надмірність (резервування), коли два або три незалежні канали обробки даних постійно порівнюють результати	Синхронізація зловмисних станів. Складна кібератака може бути спрямована на одночасне компрометування всіх резервних каналів і примусове узгодження їхніх помилкових результатів. Це дає змогу обійти захист SIL і реалізувати небезпечний стан

Детальний аналіз векторів атак на системи залізничної автоматики і телемеханіки виявляє, що кіберзагрози стосуються всіх рівнів управління – від

польового обладнання до центральних диспетчерських пунктів, із фокусуванням на компрометації цілісності даних і доступності систем. Найбільш критичною

мішенню, на нашу думку, є мікропроцесорна централізація, оскільки вона безпосередньо керує стрілками і сигналами, і її компрометація може призвести до зіткнень поїздів, аварій і катастроф. Використання комерційного обладнання (COTS) і стандартних протоколів (TCP/IP, ОС) робить МПЦ вразливою до загроз, типових для звичайного ІТ-середовища. Зловмисники можуть використовувати відомі експлойти, наприклад переповнення буфера, якщо система не має належної ізоляції та оновлень (патчів). Атака може бути спрямована також на впровадження зловмисного програмного забезпечення або цілісність прошивки з метою обійти чи порушити логічні залежності, які забезпечують безпеку руху [1-3].

Вектори атак можуть бути реалізовані через компрометацію віддалених сервісів/портів, які використовують для діагностики та оновлення програмного забезпечення, а також атаки через ланцюг постачання, вбудовуючи шкідливий код на етапі виробництва чи впровадження.

Вектори атак на перегінному рівні спрямовані на порушення інтервального регулювання руху поїздів. Компрометація цілісності даних – це основний вектор, спрямований на датчики, наприклад лічильники осей. Атака полягає в підміні даних про зайнятість колії: надсилання хибного сигналу про вільність зайнятої блок-ділянки, що спричинить наближення поїздів до небезпечної відстані, або зайнятість вільної ділянки, що спричинить штучну зупинку руху (по суті DoS-атаку на рух). Загроза втручання у протоколи АЛС полягає у прослуховуванні або втручанні в комунікаційні протоколи, які контролюють передавання кодових сигналів автоматичної локомотивної сигналізації.

Диспетчерська централізація є центральною точкою управління, і її компрометація може паралізувати рух на великій ділянці. Через тісну інтеграцію ДЦ (операційні технології, ОТ) із

корпоративною мережею (інформаційні технології, ІТ) можлива міграція загроз. Атака на менш захищений ІТ-периметр (офісні мережі, електронна пошта) може стати плацдармом для проникнення в мережу ДЦ. DoS-атаки на диспетчерський центр мають на меті порушити доступність системи. DoS-атака на диспетчерський центр блокує можливість віддаленого управління, змушуючи персонал переходити на менш ефективне місцеве керування на станціях. Не менш важливим є шпигунство, яке спрямоване на отримання оперативної інформації про рух поїздів, що може бути використано для подальших фізичних або кібератак.

Комунікаційні канали є «нервовою системою» СЗАТ і головною мішенню для віддаленого втручання.

Отже, усі сучасні СЗАТ, особливо на основі МПЦ і ДЦ, потребують застосування комплексних рішень, що виходять за рамки традиційного ІТ-захисту. Критичним є захист не лише конфіденційності, а передусім цілісності даних і доступності систем, що безпосередньо впливає на безпеку руху. Саме тут штучний інтелект може забезпечити необхідний рівень моніторингу та реагування, що і є предметом подальшого дослідження в цій статті.

Наслідки кібератак на системи залізничної автоматики і телемеханіки виходять далеко за рамки звичайних ІТ-інцидентів, безпосередньо загрожуючи безпеці руху, спричиняючи значні економічні збитки та підриваючи суспільну довіру.

Головна небезпека кібератак полягає в можливості зловмисного впливу на основні функції управління поїздами, спрямованого на компрометацію цілісності даних і доступності систем. Атака на мікропроцесорну централізацію або протоколи автоматичного блокування може призвести до підміни даних про зайнятість колії. Це може призвести до надсилання хибного сигналу про вільність зайнятої блок-ділянки, унаслідок чого наступний

поїзд може в'їхати в небезпечну зону і спричинити зіткнення. Через підміну команд на інтерфейсі «Поле-Станція» зловмисник може направити команду на переведення стрілки, мінаючи логіку безпеки МПЦ. Це може призвести до сходження поїзда з рейок. У разі компрометації внутрішнього інтерфейсу МПЦ і синхронізації зловмисних станів можна обійти захист SIL, реалізуючи небезпечний стан, який система має блокувати [4-6].

Загроза безпеці руху від кібератак – це головний, але не єдиний аспект. Кібератаки трансформуються у прямі та непрямі збитки для залізничних операторів і держави, а також спричиняють репутаційні наслідки. Порушення безпеки руху через кібератаки підриває довіру суспільства до залізничного транспорту як до найбільш безпечного виду перевезень. Крім того, слід зазначити, що кібератаки на СЗАТ свідчать про вразливість критичної інфраструктури держави, що має стратегічні наслідки для національної безпеки. Отже, кібератаки на СЗАТ є загрозою не лише для технологічної

стійкості, але й економічної та соціальної стабільності. Саме тому для виявлення та реагування на ці загрози необхідне застосування передових технологій, таких як штучний інтелект.

**1. Застосування ШІ в гарантуванні кібербезпеки систем залізничної автоматики.** Застосування ШІ в кібербезпеці СЗАТ базовано на його здатності обробляти величезні обсяги даних, виявляти аномалії та ухвалювати рішення зі швидкістю, недоступною людині. Це критично важливо для захисту систем, де порушення цілісності даних і доступності має катастрофічні наслідки. Основою кіберзахисту на базі ШІ є використання алгоритмів машинного навчання, здатних ідентифікувати зловмисну активність без необхідності попереднього знання конкретного вірусу чи експлойту. У табл. 2 наведені механізми та можливі форми застосування ШІ для прогнозування і усунення кіберзагроз у системах ЗАТ.

Таблиця 2

Механізми та можливі форми застосування ШІ для захисту від кіберзагроз СЗАТ [6, 7]

Концепція ШІ	Механізм у кібербезпеці	Застосування в СЗАТ
1	2	3
Навчання з учителем (Supervised Learning)	Алгоритми тренують на розмічених даних (відомі атаки vs. нормальний трафік)	Класифікація мережевого трафіку між МПЦ і ДЦ для ідентифікації відомих сигнатур шкідливих програм чи команд
Навчання без учителя (Unsupervised Learning)	Алгоритми виявляють аномалії (відхилення) у нерозмічених даних, будуючи модель нормальної поведінки	Моніторинг внутрішнього трафіку МПЦ/АБ-МП для виявлення несподіваних змін у частоті команд, що свідчить про спробу синхронізації зловмисних станів або SPOOFING
Навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning)	Агент навчається ухвалювати рішення (наприклад блокувати чи дозволяти трафік) у динамічному середовищі, отримуючи винагороду за успішний захист	Автоматичне ухвалення рішень на рівні ДЦ про ізоляцію компрометованої станції або автоматичний перехід на резервний канал зв'язку

Продовження табл. 2

1	2	3
Глибоке навчання (Deep Learning) для складних атак	Глибокі нейронні мережі можуть аналізувати сирі мережеві пакети і промислові протоколи (наприклад MODBUS, що можна використовувати у СЗАТ), виявляючи приховані атаки, які неможливо знайти за допомогою традиційних сигнатурних методів	Боротьба з атаками типу «Людина посередині» (MITM) на WAN-інтерфейсі. Виявлення поліморфного та метаморфного шкідливого ПЗ: DL-моделі здатні розпізнавати варіації зловмисного програмного забезпечення, що атакує прошивку МПЦ, оскільки вони вивчають глибинні ознаки коду, а не лише його поверхневі зміни
Автоматизація реагування (SOAR та ШІ)	ШІ трансформує процес реагування, перетворюючи його з реактивного на проактивний. Цього досягають завдяки інтеграції з платформами SOAR	У критичних системах, де рішення необхідно ухвалити за мілісекунди (наприклад блокування команди, що призводить до переведення стрілки), ШІ може автоматично ініціювати ізоляцію скомпрометованого контролера або перенаправити керуючий трафік на безпечний резервний канал. ШІ може точно прогнозувати розвиток атаки та виконувати автоматичний патчинг або відкат конфігурації, мінімізуючи час простою та запобігаючи поширенню загрози, що є основним для доступності системи
Прогнозування та оцінювання ризиків	ШІ забезпечує неперервне оцінювання ризиків на основі комплексного аналізу вхідних даних	ШІ аналізує дані про поточний стан системи, звіти про вразливості COTS-компонентів і зовнішні кіберінтелектуальні дані для прогнозування наступного вектора атаки на ДЦ або МПЦ, а також постійно оцінює цілісність даних від лічильників осей та іншого польового обладнання, автоматично підвищуючи рівень тривоги, якщо надійність вихідних даних знижується, захищаючи від SPOOFING та Command Injection

2. Штучний інтелект у системах виявлення та реагування на загрози. В умовах, коли час реакції на інцидент вимірюваний мілісекундами, штучний інтелект стає необхідною умовою для забезпечення безпеки руху і стійкості транспортної системи.

Традиційні методи захисту, засновані на сигнатурах і жорстких правилах, не здатні протистояти сучасним поліморфним, метаморфним і «нульовим» атакам, які є критичними для систем, що потребують високого рівня цілісності, як-от СЗАТ. ШІ забезпечує цю зміну парадигми завдяки

можливості автоматичного виявлення аномалій. У табл. 3 показана різниця в

підходах для кіберзахисту традиційним шляхом і з використанням ШІ.

Таблиця 3

Аспект	Традиційний захист	ШІ-захист
Виявлення	За сигнатурами та відомими правилами	За поведінковими аномаліями та контекстом
Швидкість	Секунди, хвилини (після ідентифікації), іноді дні або тижні	Мілісекунди, секунди
Обробка даних	Обробка агрегованих журналів	Аналіз сирих пакетів (Deep Packet Inspection), промислові протоколи

Світові дослідження підтверджують критичну перевагу ШІ за швидкістю і точністю реагування, що є визначальним фактором для критичної інфраструктури. Для виявлення кібератаки командам безпеки зазвичай потрібні дні або тижні, тоді як рішення на основі ШІ можуть

ідентифікувати та ізолювати загрозу практично миттєво (рис. 1). Впровадження ШІ у системах безпеки також значно знижує кількість хибних спрацьовувань, одночасно підвищуючи точність виявлення реальних загроз.

### Швидкість реагування на інциденти

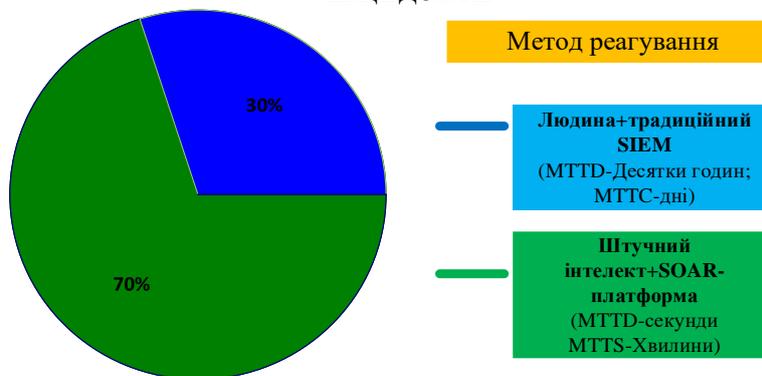


Рис. 1. Швидкість реагування на інциденти

**MTTD (Mean Time To Detect)** – середній час виявлення. Це показник, що показує, скільки в середньому часу проходить від моменту виникнення інциденту/проблеми до її виявлення системою або персоналом. Наприклад, якщо

зазвичай на пошук проблеми витрачають 15 хв, то MTTD = 15 хв.

**MTTC (Mean Time To Contain)** – середній час стримування. Це показник, що відображає, скільки в середньому часу потрібно, щоб локалізувати чи зупинити

поширення інциденту після його виявлення (до повного контролю).

Наприклад, інцидент виявили, і ще через 30 хв його локалізували, отже, МТТС = 30 хв.

Переваги ШІ з виявлення загроз полягають у тому, що він на 99 % дає змогу

моментально визначати та ізолювати високошвидкісні атаки, такі як DDoS (критично для ДЦ). Крім того, сучасні ШІ-рішення здатні автоматично вживати захисних заходів для виявлення загроз, суттєво знижуючи навантаження на операторів (рис. 2).



Рис. 2. Ефективність ШІ у виявленні кіберзагроз

Діаграма на рис. 3 демонструє порівняння ефективності виявлення загроз і кількості хибних спрацьовувань у двох підходах: із застосуванням штучного інтелекту і без нього. Аналіз цієї діаграми показує, що системи з ШІ виявляють більше реальних загроз, ніж традиційні системи без ШІ. Штучний інтелект допомагає значно

зменшити кількість помилкових тривог, які створюють зайве навантаження на персонал. Отже, діаграма наочно показує, що ШІ одночасно підвищує рівень виявлення справжніх загроз і знижує частоту хибних спрацьовувань, роблячи систему кіберзахисту більш ефективною [7, 9].

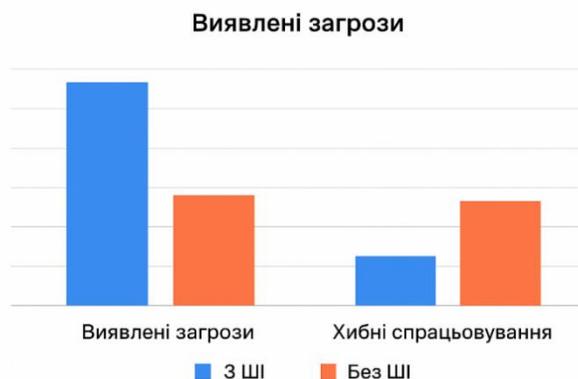


Рис. 3. Порівняння ефективності виявлення загроз і кількості хибних спрацьовувань із застосуванням штучного інтелекту і без нього

**3. Автоматизація реагування (SOAR).** Головна перевага штучного інтелекту в кібербезпеці залізниць полягає не лише у високоточному виявленні аномалій і кібератак, а й у критично важливому компоненті – автоматизації реагування на загрози (Security Orchestration, Automation and Response, SOAR). Саме SOAR забезпечує швидкість, точність і масштабованість захисних дій, що є вирішальним фактором в умовах кіберпротистояння. Швидкість реагування на кібератаку в залізничних системах – це не просто питання фінансових збитків, це питання безпеки руху та життя людей. Людське втручання, навіть висококвалі-

фікованого фахівця, вимірюване хвилинами, тоді як сучасна атака може завдати незворотної шкоди за секунди.

У випадку виявлення атаки, наприклад на інтерфейс зв'язку між центральним сервером диспетчерської централізації і станційним обладнанням, ШІ може миттєво проаналізувати природу аномалії (несанкціонований потік даних, спроба маскування під керуючий протокол), за частки секунди (менше 500 мс) автоматично ініціювати відключення скомпрометованого мережевого сегменту і одночасно перевести зв'язок на резервний, незалежний канал, захищений криптографічно (наприклад VPN із використанням сертифікатів, що не скомпрометовані) (рис. 4).

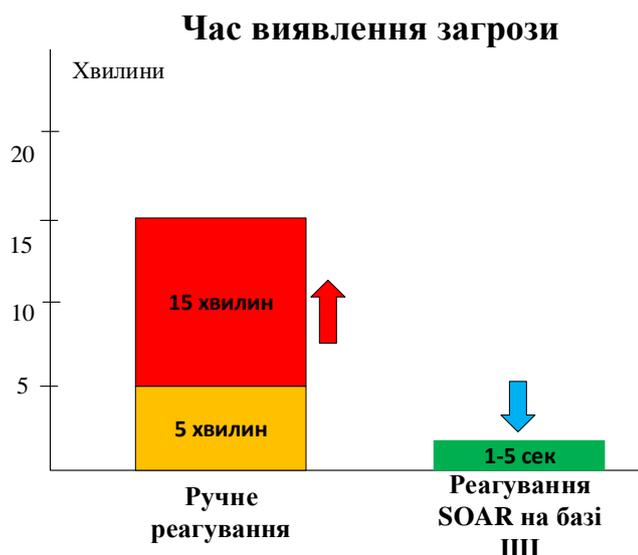


Рис. 4. Час виявлення загрози

Розрахунок ефективності реагування на загрози (рис. 5) показує, що використання реагування SOAR на базі ШІ знижує час реагування на 99,9 % порівняно з ручним.

Статистичні дані дослідження, проведеного у 2024 році, показали, що впровадження SOAR-систем у критичній інфраструктурі залізниць допомагає скоротити середній час між виявленням і усуненням загрози (MTTR) на 85 %, що є

критичним для забезпечення безперервності руху поїздів.

Не менш важливим критерієм доцільності використання автоматизації реагування на загрози (SOAR) на базі ШІ у залізничній галузі є зниження ризику від кіберзагроз і їхніх наслідків. Порівняльна динаміка зниження таких ризиків наведена на рис. 6 [8, 9].

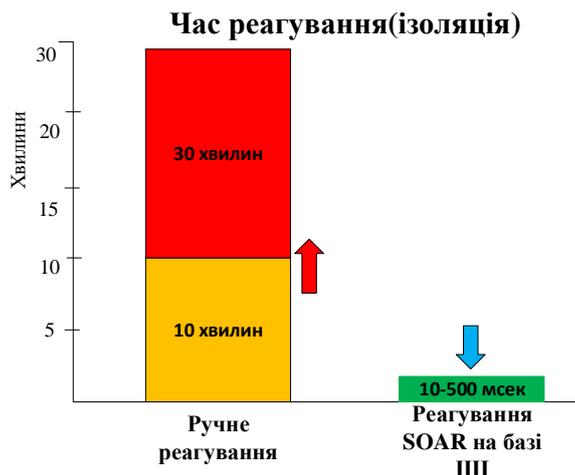


Рис. 5. Час реагування (ізоляція)



Рис. 6. Зниження ризику за категоріями із використанням SOAR-систем у критичній інфраструктурі залізниці

Однією з найбільш руйнівних тактик кібератак є латеральне переміщення (Lateral Movement). Латеральне переміщення – це техніка кібератаки, під час якої зломисник, отримавши початковий доступ до одного пристрою або сегменту мережі (зазвичай менш захищеного), використовує його як плацдарм для подальшого просування та міграції в інші, більш критичні сегменти, зокрема ОТ-сегмент (Operational Technology). На залізничному транспорті це є однією з найнебезпечніших кіберзагроз, оскільки може призвести до прямого впливу на безпеку руху та операційну діяльність.

Для розуміння механізму латерального переміщення необхідно чітко розрізняти ІТ та ОТ-сегменти на залізничному транспорті.

**ІТ-сегмент** (Information Technology) призначений для управління бізнес-процесами, адміністративною діяльністю, плануванням, наприклад корпоративні мережі, поштові сервери, бази даних пасажирів/вантажу, системи продажу квитків, ERP-системи, робочі станції офісних працівників.

**ОТ-сегмент** (Operational Technology) призначений для управління фізичними процесами, безпосередньо пов'язаними з

рухом поїздів, безпекою та інфраструктурою, наприклад системи автоматики і телемеханіки на мікропроцесорній базі, системи диспетчерського керування, системи моніторингу та управління об'єктами (стрілками, світлофорами, живленням), системи діагностики рухомого складу та колії і т. д.

Типовий сценарій латерального переміщення з ІТ в ОТ-сегмент залізничного транспорту включає такі кроки:

1. Початковий доступ (вхідний вектор атаки в ІТ). Зловмисник отримує доступ до менш захищеного ІТ-сегменту.

2. Фішинг. Співробітник офісу відкриває шкідливий файл/посилання на робочому комп'ютері (частина ІТ-мережі).

3. Компрометація. Використання вразливості у вебсервері, що належить до ІТ-інфраструктури (наприклад сервер планування чи кадрового обліку).

Наступний вид кіберзагрози – це **скомпрометований підрядник**. Використання облікових даних зовнішнього підрядника, який має доступ до ІТ-мережі. Той, хто атакує, сканує внутрішню ІТ-мережу, виявляючи інші підключені пристрої та сервери. При цьому використовують вразливості або техніки Pass-the-Hash для отримання облікових даних із високими привілеями (наприклад обліковий запис доменного адміністратора) або протоколів, які забезпечують зв'язок між ІТ та ОТ. Це є безпосередньою міграцією загрози. Зловмисник використовує скомпрометовані ІТ-облікові дані, які помилково мають довіру або обмежений доступ до мережевого шлюзу чи сегментаційної демілітаризованої зони, що з'єднує ІТ та ОТ.

Після успішного проникнення в ОТ-сегмент зловмисник може внести зміни в логіку мікропроцесорних систем, наприклад хибно встановити стрілку не по маршруту прямування, що може призвести до сходження поїзда чи зіткнення, викликати порушення енергопостачання, відключивши

або перевантаживши тягові підстанції через систему SCADA, спричинивши зупинку руху. Також таке втручання дає змогу впровадити шкідливе ПЗ (наприклад вірус-шифрувальник) на серверах АСДК, паралізуючи диспетчерське управління. Наслідками такого втручання є втрата контролю за безпекою руху, параліч операційної діяльності (тривалі затримки, відсутність контролю), значні економічні збитки та погіршення репутації.

Запобігти таким атакам можна через сегментацію мережі: жорстке фізичне та логічне розділення ІТ та ОТ з мінімальною кількістю дозволених точок доступу, використання «принципу найменших привілеїв» і багатофакторної автентифікації навіть для внутрішніх переходів. Дуже важливим також є постійний моніторинг трафіку: впровадження систем IDS/IPS і Network Monitoring для виявлення аномальної активності (наприклад незвичних команд на контролери СЦБ) у точках стику, а також регулярне оновлення ІТ-систем, оскільки вони є найчастішим початковим вектором атаки.

Отже, латеральне переміщення є головним етапом у ланцюгу кібератак на критичну залізничну інфраструктуру. Воно перетворює типову офісну кіберзагрозу в пряму загрозу безпеці та життю людей, що потребує впровадження спеціалізованих захисних механізмів, орієнтованих на ОТ-безпеку [6-9].

**4. Можливості прогнозування кібератак за допомогою ШІ.** Штучний інтелект, використовуючи алгоритми графових нейромереж (GNNs) і глибокого навчання, може аналізувати:

- поведінкові патерни, нетипові запити від ІТ-мережі (наприклад із робочих місць офісного персоналу ДЦ) до ОТ-серверів (серверів МПЦ);

- індикатори компрометації (IoC): файли, хеші, IP-адреси, пов'язані з відомими кампаніями АРТ-груп;

- траєкторію потенційної міграції: аналіз відкритих мережевих портів, прав

доступу і маршрутів зв'язку між ІТ та ОТ-мережею.

На основі прогнозу ШІ система SOAR не чекає, поки загроза досягне мети, а автоматично ізолює потенційно заражені елементи. Наприклад, робоча станція (АРМ) диспетчера, яка демонструє аномальну поведінку (надмірні спроби підключення до ОТ-мережі), може бути автоматично виведена з мережевого сегменту або її мережевий доступ обмежений до мінімально необхідного; автоматичне оновлення правил міжмережевого екрана на міжсегментному шлюзі, що з'єднує ІТ та ОТ-мережі, для блокування підозрілих протоколів або джерел.

Збиток від кіберзагрози можна розрахувати за формулою

$$D = T + V, \quad (1)$$

де  $T$  – час;

$V$  – швидкість поширення.

Що показує діаграма? Без SOAR (синя лінія): загроза поширюється експоненціально, збитки зростають катастрофічно швидко; із SOAR (червона лінія): автоматична ізоляція миттєво зупиняє атаку, збитки мінімальні. Якщо  $SOAR \rightarrow T \approx 0$ , то  $Збиток \rightarrow \min$  (рис. 7).

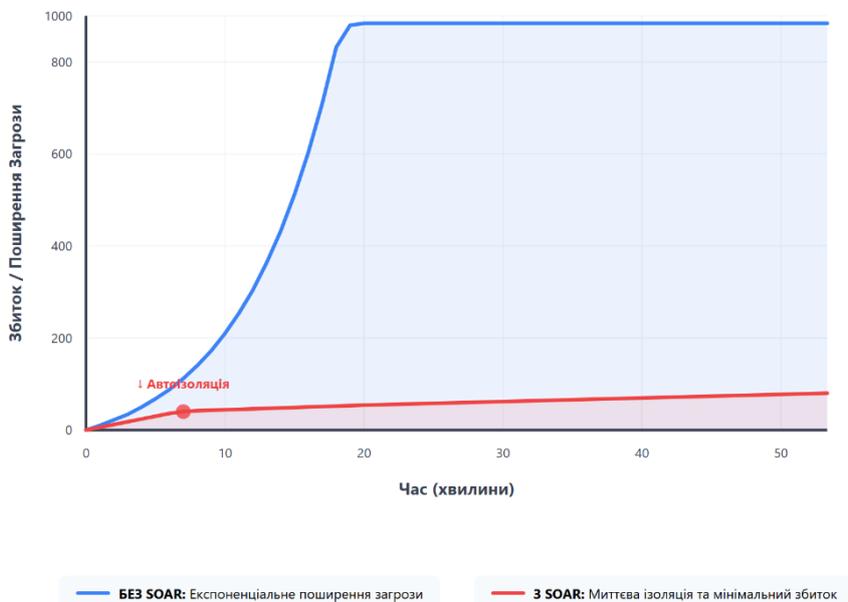


Рис. 7. Діаграма поширення загрози та реакція SOAR

Отже, SOAR допомагає обробляти тисячі інцидентів на день, чого не може зробити жоден центр безпеки, забезпечуючи захист мереж, що постійно зростають. Автоматичне реагування усуває «людський фактор» і забезпечує стабільну, швидку реакцію. Здатність ШІ до прогнозування перетворює реагування з пасивного на активний, превентивний захист.

**Висновок.** Подальші дослідження необхідно зосередити на інтеграції SOAR з елементами цифрового двійника залізничної мережі, що дасть змогу ШІ «тренувати» сценарії реагування у віртуальному середовищі, доводячи дії до ідеальної автоматичної послідовності. Це відкриє шлях до повної автономної кібербезпеки залізничного транспорту [10].

Список використаних джерел

1. ENISA (European Union Agency for Cybersecurity) / UIC (International Union of Railways). *Cyber Security in Railways: State of Play and Recommendations*. URL: <https://www.enisa.europa.eu/publications/railway-cybersecurity> (дата звернення: 16.10.2025).
2. Ali Strategies & Zafer Bilal. (2024). Advanced Persistent Threats (APTs): Analysis, Detection, and Mitigation. URL: [https://www.researchgate.net/publication/377382446\\_Advanced\\_Persistent\\_Threats\\_APTs\\_Analysis\\_Detection\\_and\\_Mitigation](https://www.researchgate.net/publication/377382446_Advanced_Persistent_Threats_APTs_Analysis_Detection_and_Mitigation).
3. ДСТУ EN IEC 62443-3-2:2022. Безпека систем промислової автоматизації та управління. Частина 3-2. Оцінювання ризиків безпеки для проектування системи (EN IEC 62443-3-2:2020, IDT; IEC 62443-3-2:2020, IDT). Чинний 2023-12-31. URL: <https://online.budstandart.com>.
4. Alam K., Fahad Monir M., Junayed Hossain M., Shorif Uddin M. and Habib M. T. Adaptive Defense: Zero-Day Attack Detection in NIDS With Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 116345-116361. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3585445.
5. Almedires M. A., Elkhalil A. & Amin M. Adversarial Attack Detection in Industrial Control Systems Using LSTM-Based Intrusion Detection and Black-Box Defense Strategies. *Journal of Cyber Security and Risk Auditing*. 2025. 3. 4–22. <https://doi.org/10.63180/jcsra.thestap.2025.3.2>.
6. Чуньвей Се. Ai-DRIVEN advanced persistent threat (apt) attack detection system. Faculty of Cyber Security, Software Engineering, and Computer Science International Humanitarian University. *International scientific journal «Internauka»*. 2025. № 3 (170). P. 129. DOI: 10.25313/2520-2057-2025-3-10815.
7. Використання штучного інтелекту для прогнозування, зупинки та відновлення після інциденту з програмами-вимагачами. *Інтернет-журнал «Кібербез»*. URL: <https://cybersec.net.ua/statti/858-vykorystannia-shtuchnoho-intelektu-dlia-prohnozuvannia-zupynky-ta-vidnovlennia-pislia-intsydentu-z-prohramamy-vymahachamy.html> (дата звернення: 16.10.2025).
8. Veeam Software. 2025. *Gartner® Magic Quadrant™ for Backup & Data Protection Platforms*. URL: <https://www.veeam.com/gartner-magic-quadrant.html> (дата звернення: 26.10.2025).
9. IBM (and Ponemon Institute). *Cost of a Data Breach Report 2025: The AI Oversight Gap*. URL: [https://www.bakerdonelson.com/webfiles/Publications/20250822\\_Cost-of-a-Data-Breach-Report-2025.pdf](https://www.bakerdonelson.com/webfiles/Publications/20250822_Cost-of-a-Data-Breach-Report-2025.pdf) (дата звернення: 28.10.2025).
10. Deutsche Bahn співпрацюють з NVIDIA для створення цифрового двійника залізниць. *Railway Supply*. 2022. URL: <https://www.railway.supply/uk/db-spivpraczuuyut-z-nvidia-dlya-storennya-czifrovogo-dvijnika-zaliznicz/>.

---

Сотник Василь Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-8039-1392>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: [sotnyk.va@kart.edu.ua](mailto:sotnyk.va@kart.edu.ua).

Алмамедова Мехрібан Гусейнага гизи, аспірантка кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-8324-3697>. Тел.: +994505378748. E-mail: [almamedovamehriban@gmail.com](mailto:almamedovamehriban@gmail.com).

Меліхов Анатолій Анатолійович, МІПРО ОУ, Таллінн, Естонія. <https://orcid.org/0009-0005-4436-3780>. Тел.: +37256711666. E-mail: [melikhov.anatoliy@gmail.com](mailto:melikhov.anatoliy@gmail.com).

Sotnyk V. O., Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0002-8039-1392>. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: [sotnyk.va@kart.edu.ua](mailto:sotnyk.va@kart.edu.ua).

---

Almammadova Mehriban, graduate student of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-8324-3697>.  
Tel.: +994505378748. E-mail: [almamedovamehriban@gmail.com](mailto:almamedovamehriban@gmail.com).  
Melikhov Anatolii, Mipro OY, Tallinn, Estonia. <https://orcid.org/0009-0005-4436-3780>. Tel.: +37256711666.  
E-mail: [melikhov.anatoliy@gmail.com](mailto:melikhov.anatoliy@gmail.com).

Статтю прийнято 01.12.2025 р.

УДК 656.254.5

## УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ СОРТУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ І ДІЛЬНИЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОЛЬОРОВИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Кандидати техн. наук П. В. Долгополов, Т. В. Головко, В. В. Кулешов,  
асп. П. Р. Пелех

## IMPROVEMENT OF THE MARSHALLING YARD AND RAILWAY SECTION WORK USING COLORED PETRI NETWORKS

PhD (Tech.) P. Dolgoplov, PhD (Tech.) T. Golovko, PhD (Tech.) V. Kuleshov,  
postgraduate student P. Pelekh

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352079>

**Анотація.** Побудовано математичну модель забезпечення поїздів локомотивами на основі кольорових мереж Петрі, яка враховує нерівномірність перевізного процесу і різномірність транспортних об'єктів і допомагає спрогнозувати критичні ситуації зростання черги вантажних поїздів на сортувальних станціях. Реалізація моделі на автоматизованих робочих місцях оперативно-диспетчерського персоналу дасть змогу вчасно розробляти регульовальні міри з метою недопущення утворення черги вантажних поїздів.

**Ключові слова:** сортувальна станція, черга поїздів, імітаційна модель, мережа Петрі, інтенсивність, локомотиви, поїзний диспетчер.

**Abstract.** To determine the operational parameters of the marshalling yards and railway section under conditions of unevenness, a mathematical model in terms of colored Petri nets was built, which allows taking into account the unevenness of the transportation process and the heterogeneity of transport objects in the «marshalling yard - railway section» system. The model makes it possible to predict in advance critical situations in providing freight trains with locomotives at marshalling yards.

The model simulates a system where passenger and freight trains are served by the same fleet of locomotives. The modeling results make it possible to obtain the parameters of the train queue at marshalling yards from variable input parameters.

Diagram of the dependences of the total number of freight train trains in queues at marshalling yards on the intensity of the train flow and the number of train locomotives operating in the system were constructed. The diagram shows that too intense a train flow with an insufficient number of locomotives leads to a sharp increase in the queue of trains waiting for locomotives, which is the cause of significant downtime. This leads to a decrease in the speed of cargo delivery and a decrease in the efficiency of transportation in general.

*The implementation of the proposed model on automated workplaces of operational dispatch personnel as an intelligent module will allow train, shunting and locomotive dispatchers to timely identify conflict situations in the provision of freight trains with locomotives, as well as to develop and implement measures for the sequence of train disassembling and assembling, adjustment of the freight train schedule and the locomotive delivery schedule.*

**Keywords:** *marshalling yard, train queue, simulation model, Petri net, intensity, locomotives, train traffic dispatcher.*

**Вступ.** Одним з основних напрямів організації ефективного перевізного процесу на залізничному транспорті є здійснення заходів, спрямованих на усунення конфліктів у просуванні вагонопотоків. При цьому дуже важливою умовою ефективного функціонування залізниці є відповідність кількості призначених поїздів можливостям залізничної інфраструктури і ресурсам локомотивного господарства. Недотримання цього балансу може призвести до серйозних затримок перевізного процесу, збільшення витрат і навіть аварійних ситуацій.

Рух поїздів не можна розглядати окремо від експлуатації залізничної інфраструктури, зокрема локомотивів, колійних парків станцій і їхніх експлуатаційних можливостей. І навіть якщо колійний розвиток і системи автоматизації дають змогу пропустити певну кількість поїздів, треба розуміти, що це не має значення за умов недостатньої кількості локомотивів у депо або їх неготовності для експлуатації з технічних причин.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У роботі [1] розроблена системно-теоретична модель процесів і аварій в управлінні залізничним транспортом. Вона визначає структуру, учасників і механізми управління безпекою, що складають адаптивну функцію зворотного зв'язку. Зроблено висновки про удосконалення конкретних механізмів зворотного зв'язку для ефективності впливу. Але ця модель не враховує ризики від перенасиченості залізничних дільниць і станцій рухомим складом, що особливо важливо в умовах

недостатньої кількості локомотивів і в періоди «вікон».

У роботі [2] доведено, що традиційні математичні методи вже не прийнятні для моделювання систем перевезень, які стали містити багато складних підсистем і мають значний вплив ефекту емерджентності. Запропоновано технологію мультиагентного моделювання, яка імітує взаємозв'язок між поведінкою і продуктивністю компонентів залізничної системи. Результати моделювання довели практичність методу, але в роботі не приділено достатньо уваги забезпеченню поїздів локомотивами на технічних станціях.

У роботі [3] розроблено метод моделювання поширення затримок поїздів на полігонах на основі модифікованих епідеміологічних моделей. Ураховано взаємний вплив поїздів із різними пріоритетами в потоці. Для моделювання застосовано алгоритм перетворення графа мережі на орієнтоване дерево, коренем якого є станція, де виникає затримка. Але в роботі не враховані обмеження, пов'язані з обмеженням технічних пристроїв утримувати чергу поїздів, які не можуть бути відправлені через нестачу локомотивів.

У роботі [4] розроблена модель місцевої роботи сортувальної станції на основі математичного апарату кольорових мереж Петрі. Результати показали, що середня довжина черги вагонів в очікуванні подавання залежить від середнього часу виконання операцій локомотивом і дисперсії цього часу. Тобто нестабільність тривалості операцій може мати вплив більш негативний, ніж нестача локомотивів. Але ці дослідження присвячені тільки місцевій роботі станцій і не стосуються дільниць.

У роботі [5] розроблена модель оптимізації інтервалу між поїздами в умовах обмежених тягових ресурсів і пропускної спроможності станцій і вантажних пунктів. Розв'язання моделі дає змогу знайти баланс між витратами на переміщення поїздопотоків із різних дільниць і витратами вантажовласників з урахуванням обмежень логістичного ланцюга. Але в роботі не врахована пріоритетність пасажирських поїздів у наданні локомотивів.

У роботі [6] розроблена оптимізаційна модель, яка включає правила динамічного пріоритету диспетчерської роботи залізничної дільниці з обмеженою пропускною спроможністю. Цей підхід має переваги для швидкого створення практичних рішень порівняно з комерційним програмним забезпеченням для оптимізації. Але в моделі не враховані важливі експлуатаційні фактори, такі як обмеження експлуатованого парку локомотивів у локомотивних депо та інші.

У роботі [7] розроблено дискретно-подійну імітаційну модель руху пасажирів і поїздів. Модель включає складні алгоритми, що підвищують деталізацію поведінки агентів. На основі схеми станції розроблено імітаційну модель для оцінювання адекватності запропонованих рішень. Але результати цих досліджень направлені на вирішення питань ліквідації конфліктних ситуацій у моделях, орієнтованих на пасажирські перевезення.

У роботі [8] розроблено модель оптимізації поїздопотоків у просторово-часовій мережі з кількома роздільними спроможностями через поєднання безконфліктних обмежень маршрутизації з процесом планування поїздів зі зворотним зв'язком. Ця модель заслуговує на увагу, тому що вона не потребує оптимізаційних розв'язувачів. Але разом із тим вона не враховує насиченість залізничних дільниць пасажирськими поїздами, через що може бути вичерпана їхня наявна пропускна спроможність, що не дасть змогу просувати

задані вантажопотоки з належною швидкістю.

У роботі [9] проаналізовані сучасні експлуатаційні параметри і вузькі місця системи інтермодального руху і запропоновані заходи з забезпечення зростання його обсягів і покращення сталості. Зроблено висновки про сталу сегментацію ринків інтермодальних перевезень у контексті глобальних ланцюгів поставок. Але не були враховані деякі практичні фактори виробництва, одним із яких є дефіцит рухомого складу і недосконале його використання через наявність простоїв на станціях формування поїздів.

У роботі [10] здійснено навчання моделей машинного навчання з учителем на основі алгоритмів класифікації для прогнозування часу затримок у залізничних перевезеннях. Досліджено, що основними параметрами прогнозування затримок є вага і довжина поїзда, відстань між станціями, місяць експлуатації та інші. Виявлено залежність збільшення кількості затримок від збільшення довжини поїздів. Але в роботі не відображено вплив на затримки таких факторів, як насичення залізничних дільниць поїздами і прискорення операцій через дефіцит рухомого складу.

У роботі [11] вирішено завдання визначення раціонального розподілу поїздопотоку на основі математичного апарата теорії графів із застосуванням алгоритму Форда-Фалкерсона. Модель регулювання поїздопотоків із масовим швидкісним рухом допомагає оптимізувати маршрути прямування поїздів в умовах скорочення пропускної спроможності окремих дільниць у періоди вимушених перерв у їхній роботі. Але в роботі не досліджено вплив змінних факторів на зростання черги поїздів у разі нестачі локомотивів на станціях.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є визначення експлуатаційних параметрів роботи сортувальної станції і залізничної дільниці в умовах нерівномірностей на основі імітаційного

моделювання для оперативного прогнозування критичних ситуацій у забезпеченні поїздів локомотивами для вчасного вжиття регулювальних заходів із недопущення появи черги поїздів.

Для реалізації цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- удосконалити методику визначення кількості об'єктів інфраструктури станції для обробки поїздів на основі імітаційного моделювання і реальному масштабі часу;

- побудувати математичну модель, що враховує нерівномірність перевізного процесу і різномірність транспортних об'єктів на сортувальній станції і дільниці;

- отримати параметри черги составів поїздів на станціях від змінних вхідних параметрів і запропонувати заходи зі скорочення черги поїздів.

**Основна частина дослідження.** Для досягнення стабільності в перевізному процесі на залізничних напрямках необхідне системне планування, у якому враховані такі фактори: наявна пропускна і провізна спроможність дільниць і переробна спроможність станцій, наявність і готовність локомотивів у депо, розклад поїздів і їх узгодження з можливостями інфраструктури, потрібні обсяги перевезень, резерви для позаштатних ситуацій.

Неузгодженість цих факторів з організацією поїздопотоків стає причиною або омертвіння цінних активів, або зростання черг поїздів на залізничних напрямках і зменшення швидкості доставлення вантажів.

Для розрахунку кількості об'єктів інфраструктури залізничної технічної станції (локомотивів, колій у парках, працівників станцій тощо) для обробки певної кількості поїздів, які поступають у відповідну залізничну систему, за теорією ймовірностей, для загальних досліджень можна використовувати цілий ряд формул, наприклад формулу Ерланга

$$N_{об} = \frac{\lambda_n \cdot t_{обсл}}{3600}, \quad (1)$$

де  $\lambda_n$  – інтенсивність потрапляння поїздів у систему «сортувальна станція – залізнична дільниця»;

$t_{обсл}$  – тривалість обслуговування поїзда одним локомотивом,

$$t_{обсл} = t_{уч} + t_{приц} + t_{отц}, \quad (2)$$

де  $t_{уч}$  – середня тривалість прямуювання поїзда по дільниці в одному напрямку, включаючи зупинки на проміжних станціях;

$t_{приц}$ ,  $t_{отц}$  – тривалість знаходження локомотива із составом на станціях відповідно причеплення і відчеплення (опробування автогальм, отримання поїзних документів, маневри під состав і з-під состава тощо).

Але загальним недоліком виразів, про які ідеться, вважають тільки усереднені параметри тривалості обслуговування поїзда і кількість поїздів, що поступають у систему.

Такі самі недоліки характерні і для формул, що визначають середню довжину черги, наприклад формула Полячека-Хінчіна

$$N^{оч} = \frac{\rho_{cy}^2 \cdot (1 + v(t_{обсл})^2)}{2 \cdot (1 - \rho)}, \quad (3)$$

де  $\rho_{cy}$  – коефіцієнт завантаження системи, що розглядають;

$v(t_{обсл})$  – коефіцієнт варіації випадкової величини  $t_{обсл}$ .

$$\rho_{cy} = \frac{t_{обсл}}{v}, \quad (4)$$

$$v(t_{обсл})^2 = \frac{D_{t_{обсл}}}{t_{обсл}^2}. \quad (5)$$

Залізничний перевізний процес має значну нерівномірність поїздопотоків та інших факторів впливу. І кожна оперативна зміна і навіть година є особливою.

Включення середніх значень для моделювання може призвести до затримок. Для більшої відповідності реальним факторам в умовах коливань доцільно використати імітаційні методи математичного моделювання для можливості передбачення конфліктних ситуацій і заздалегідь виробляти шляхи їх вирішення.

Одним із математичних апаратів, що допомагає врахувати нерівномірність перевезень і різномірність транспортних об'єктів, є кольорові мережі Петрі, перевагою яких є те, що в них можна окремо надавати відповідний колір міткам, які відповідають різномірним рухомих об'єктам: поїздам, локомотивам, вагонам тощо. Також кольори мають переходи і позиції, які відповідають об'єктам інфраструктури, що призначені для обслуговування різномірних рухомих об'єктів.

Так, для визначення експлуатаційних параметрів роботи сортувальної станції

побудовано математичну модель, яку подано на рис. 1. Ця модель побудована за допомогою програмного продукту «CPN IDE». Модель моделює систему, коли пасажирські і вантажні поїзди обслуговує один і той самий парк локомотивів, приписаних до основного депо, що розташоване на станції 1 (позиція «Locomotives in depot 1», яка відповідає кількості локомотивів у цьому депо). Оборот локомотивів здійснюється на станції 2 (позиція «Locomotives under turnover»).

Міткам, позиціям і переходам у моделі присвоєно такі кольори:

- червоний – пасажирські поїзди і пристрої їх обслуговування;
- синій – вантажні поїзди і пристрої їх обслуговування;
- зелений – поїзні локомотиви;
- чорний – службові дуги для коректної роботи моделі.

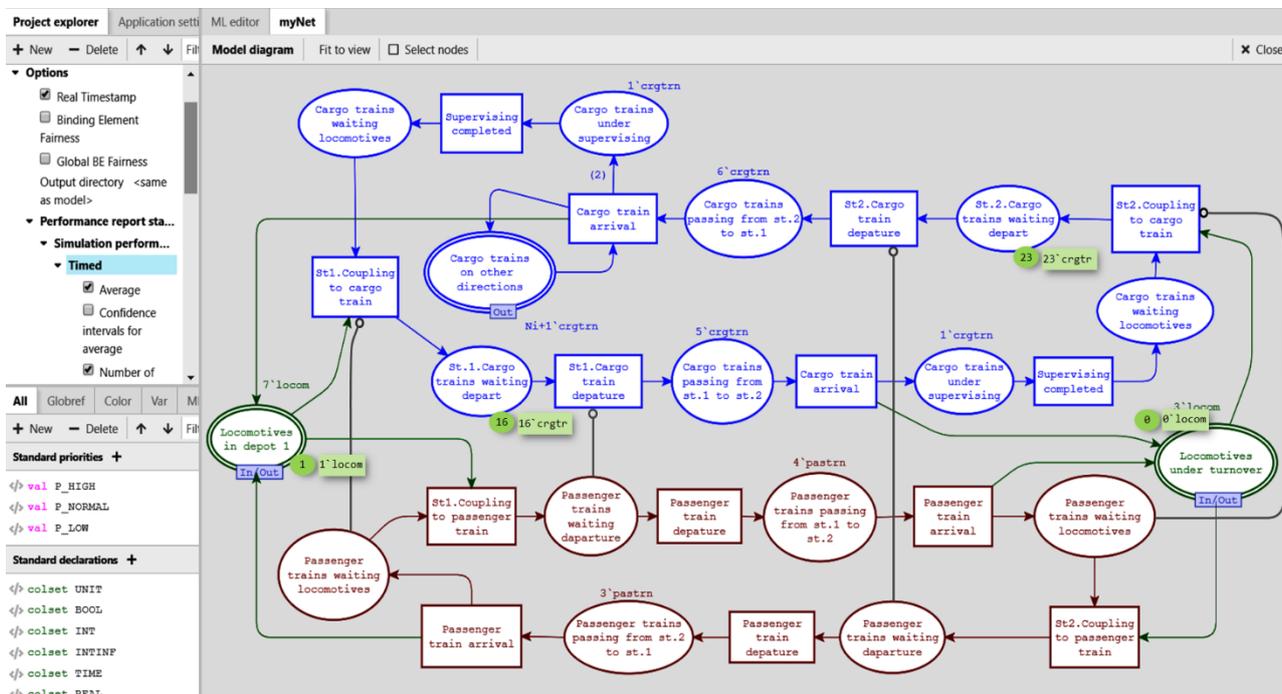


Рис. 1. Моделювання обслуговування поїздів у системі «сортувальна станція – залізнична дільниця»

Розберемо модель детально. Наявності вантажних поїздів на підходах до станції 1 відповідає перехід «Cargo trains passing from st.2 to st.1», прибуттю – перехід «Cargo train arrival», причому відчепленню локомотива відповідає зелена дуга, яка веде до позиції «Locomotives in depot 1». Інші позиції і переходи відповідають таким станам і подіям із вантажними поїздами на станції 1:

- «Cargo trains under supervising» – вантажні поїзди проходять обслуговування після прибуття і відправлення на станції;
- «Supervising completed» – обслуговування состава вантажного поїзда після прибуття і відправлення на станції завершено;
- «Cargo trains waiting locomotives» – состав вантажного поїзда знаходиться в очікуванні поїзного локомотива;
- «St1.Coupling to cargo train» – причеплення поїзного локомотива до состава вантажного поїзда;
- «St1.Cargo trains waiting depart» – вантажний поїзд знаходиться в очікуванні відправлення;

- «St1.Cargo trains departure» – відправлення вантажного поїзда.

Червоні позиції і переходи моделюють стани і події, що відповідають технології обслуговування пасажирських поїздів. Інгібіторні дуги реалізують пріоритетність обслуговування пасажирських поїздів перед вантажними.

Технологію роботи з поїздами на станції 2 відтворюють аналогічні позиції і переходи у правій частині моделі.

Надходження кожного поїзда в систему «сортувальна станція – залізнична дільниця» модель супроводжує появою відповідної роботи, пов'язаної з обслуговуванням поїзда. Оскільки перший інтервал між поїздами починається одразу після періоду простою (система вільна), то перший поїзд потрапляє на обслуговування, а наступні – у чергу. Тому черга на інтервалі, попередньому першому і розміщеному в періоді простою,  $N_n^{oc} = 0$ . Звідси для визначення черги з поїздів, що очікують обслуговування, доцільно використовувати вираз

$$N_i^{oc} = \begin{cases} N_{i-1}^{oc}(t_{обсл}) + N_i^{npuб}(t_{обсл}) - 1, & \text{при } N_{i-1}^{oc}(t_{обсл}) \cup N_i^{npuб}(t_{обсл}) \neq 0; \\ 0, & \text{при } N_{i-1}^{oc}(t_{обсл}) = N_i^{npuб}(t_{обсл}) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Початковими даними для моделювання є кількість міток «локомотиви» у зелених позиціях, які прийняті такими:  $M_{лок}^{cm1} = 7$  шт.,  $M_{лок}^{cm2} = 3$  шт. На кожному  $i$ -му кроці моделювання до системи поступає новий поїзд з інших підходів, навантажуючи систему. Загальна кількість поїздів у системі становить  $N_i+1$ . Із досягненням обмежень черги модель збільшує  $M_{лок}^{cm1}$  на 1.

Результати моделювання дають змогу отримати параметри черги составів поїздів на технічних станціях  $N_n^{oc}$  від кількості

поїздів  $N_n$  і локомотивів  $M_{лок}$ , що знаходяться в системі «сортувальна станція – залізнична дільниця», Із рис. 2 видно, що якщо  $M_{лок} = 10$  шт., то середня величина черги по станції 1  $N_n^{oc1} = 3,8$  состава, а по станції 2  $N_n^{oc2} = 5,1$  состава. При цьому максимальна величина черг відповідно становить  $N_{max}^{oc1} = 16$  і  $N_{max}^{oc2} = 23$  состави. Результати свідчать про те, що зростання черги составів на станції обороту локомотивів здійснюється на 43,7 % швидше, ніж на станції основного депо.

```

State Space Analysis:
-----
- Total nodes: 17
- Total arcs: 42
- Dead markings: 0
- Live transitions: 14/14
- Strongly connected components (SSC): 1
  - Max tokens in place "Locomotives in depot 1": 7
  - Max tokens in place "Locomotives under turnover": 3
  - Max tokens in place "St.1.Cargo trains waiting depart": 16
  - Max tokens in place "St.2.Cargo trains waiting depart": 23

Reachability Analysis:
-----
- All markings are reachable.
- Initial marking: [Locomotives in depot 7: 2, Locomotives under turnover: 7, ...]
- Final marking: [Locomotives in depot 1: 2, Locomotives under turnover: 0, ...]

Liveness Analysis:
-----
- No dead transitions detected.
- All transitions are live.
- Transition "St1.Cargo train departure" fired: 72 times.
- Transition "St2.Cargo train departure" fired: 81 times.

Fairness Analysis:
-----
- Transition "St1.Cargo train departure: Impartial
- Transition "St2.Cargo train departure: Impartial
- Transition "St1.Coupling to cargo train": Impartial.
- Transition "St2.Coupling to cargo train": Impartial.

Performance Metrics:
-----
- Average tokens in "Locomotives in depot 1": 2.7
- Average tokens in "Locomotives under turnover ": 1.3
- Average tokens in "St.1.Cargo trains waiting depart": 3.8
- Average tokens in "St.2.Cargo trains waiting depart": 5.1
- Average processing time: 1.12 hours
- Locomotives utilization: 78.3%.

Invariant Checks:
-----
- Place invariant for "Locomotives in depot 1": PASSED (sum of tokens = 7)
- Place invariant for "Locomotives under turnover ": PASSED (sum of tokens = 3)
- Place invariant for "St.1.Cargo trains waiting depart": PASSED (sum of tokens = 156)
- Place invariant for "St.2.Cargo trains waiting depart": PASSED (sum of tokens = 138)
- Transition Invariant for "St1.Cargo train departure": PASSED
- Transition Invariant for "St2.Cargo train departure": PASSED

Simulation Time:
-----
- Total simulation time: 240 hours (10 days)
Time to explore state space:

```

Рис. 2. Результати моделювання обслуговування поїздів у системі «сортувальна станція – залізнична дільниця»

На основі отриманих даних за допомогою програмного продукту Scilab побудовано діаграми залежностей загальної кількості составів вантажних поїздів у чергах на технічних станціях  $N_n^{оч}$  від двох факторів: інтенсивності потрапляння поїздів у систему  $\lambda_n$  і кількості поїзних локомотивів у цій системі  $M_{лок.}$  (рис. 3).

Отримані залежності вказують на параболічну залежність між вказаними

експлуатаційними параметрами. Це означає, що занадто інтенсивний потік поїздів, що потрапляє в систему, за недостатньої кількості локомотивів призводить до різкого зростання черги составів в очікуванні локомотивів, що стає причиною значних простоїв у перевізному процесі. Це веде до зменшення швидкості доставлення вантажів і зниження ефективності перевезень у цілому.

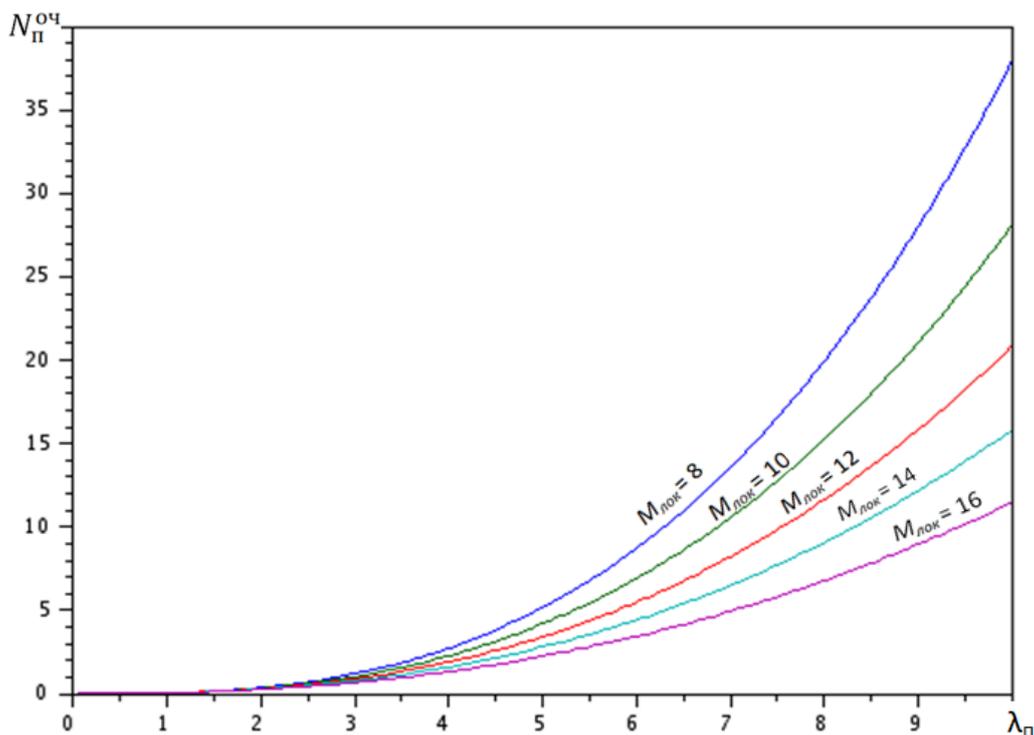


Рис. 3. Діаграма залежностей величини загальної черги составів у системі «сортувальна станція – залізнична дільниця»

Вочевидь, застосування імітаційного моделювання технологічних процесів в умовах сучасних технічних можливостей і розвитку математичних методів, зокрема кольорових мереж Петрі, дає змогу заздалегідь передбачати випадки невідповідності переробної спроможності інфраструктури потребам перевізного процесу. Моделювання може адекватно виявити критичні ситуації із забезпечення вантажних поїздів локомотивами на станціях, що можуть трапитися впродовж поточної або навіть наступної доби.

Основними користувачами результатів моделювання є поїзні (ДНЦ) і маневрові (ДСЦ) диспетчери, які оперативно регулюють поїздоутворення на сортувальних станціях, а також локомотивний диспетчер (ДГПЛ), який планує забезпечення поїздів локомотивами.

**Висновки.** Удосконалено методику визначення кількості об'єктів

інфраструктури залізничної технічної станції для обробки певної кількості поїздів, які поступають у відповідну залізничну систему, на основі імітаційного моделювання в реальному масштабі часу.

Для визначення експлуатаційних параметрів роботи сортувальної станції і залізничної дільниці в умовах нерівномірностей побудовано математичну модель у термінах кольорових мереж Петрі, яка допомагає врахувати нерівномірність перевізного процесу і різномірність транспортних об'єктів у системі «сортувальна станція – залізнична дільниця». Модель дає змогу заздалегідь передбачати критичні ситуації із забезпечення вантажних поїздів локомотивами на сортувальних станціях

Результати моделювання дають змогу отримати параметри черги составів поїздів на сортувальних станціях  $N_n^{оч}$ , залежні від

кількості поїздів  $N_n$  і локомотивів  $M_{лок}$ , що знаходяться в системі.

Побудовано діаграми залежностей загальної кількості составів вантажних поїздів у чергах на сортувальних станціях  $N_n^{оч}$  від інтенсивності потрапляння поїздів у систему  $\lambda_n$  і кількості поїзних локомотивів  $M_{лок}$ . Залежності показують, що занадто інтенсивний поїздопотік, що потрапляє в систему, за недостатньої кількості локомотивів веде до різкого зростання черги

составів в очікуванні локомотивів, а це є причиною значних простоїв.

Реалізація запропонованої моделі і на автоматизованих робочих місцях ДНЦ, ДСЦ і ДГПЛ як інтелектуального модуля допоможе працівникам вчасно розробляти і вживати заходів із послідовності розформування і формування поїздів, корегування ниток графіків руху вантажних поїздів і видачі локомотивів із метою недопущення утворення черги вантажних поїздів на станціях.

### Список використаних джерел

1. Read G. J. M., Naweed A. & Salmon P. M. (2019). Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport. *Reliability Engineering & System Safety*. 188. 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.038>.
2. Kou L., Fan W. & Song S. Multi-agent-based modelling and simulation of high-speed train. *Computers & Electrical Engineering*. 2020. 86. 106744. doi:10.1016/j.compeleceng.2020.106744.
3. Gurin D., Prokhorchenko A., Kravchenko M., Shapoval G. Development of a method for modelling delay propagation in railway networks using epidemiological SIR models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, № 3(108). P. 6-13. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219285>.
4. Формування моделі технологічного процесу підсистеми місцевої роботи сортувальної станції із застосуванням математичного апарату кольорових мереж Петрі / В. С. Сергєєв, В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова та ін. *Збірник наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2025. Вип. 211. С. 304-315. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327287>.
5. Butko T., Muzykin M., Prokhorchenko A., Prokhorchenko H. Determining the rational motion intensity of train traffic flows on the railway corridors with account for balance of expenses on traction resources and cargo owners. *Transport and Telecommunication*. Riga, Latvia. 2019. Vol. 20 (3). P. 215-228. doi: <https://doi.org/10.2478/tjt-2019-0018>.
6. Shakibayifar M., Sheikholeslami A. & Corman F. A simulation-based optimization approach to reschedule train traffic in uncertain conditions during disruptions. *Scientia Iranica*. 2017. 25(2). 4186. doi:10.24200/sci.2017.4186.
7. Kuzmin D., Baginova V. & Ageikin A. Discrete event simulation model of the railway station. *Transportation Research Procedia*. 2022. 63. 929–937. doi:10.1016/j.trpro.2022.11.091.
8. Wang E., Yang L., Li P., Zhang C., Gao Z. Joint optimization of train scheduling and routing in a coupled multi-resolution space–time railway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. Vol. 147. 103994. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103994>.
9. Wagener N., Aritua B., Zhu T. The New Silk Road: Opportunities for Global Supply Chains and Challenges for Further Development. LogForum. *Scientific Journal of Logistics*. 2020. Vol. 16 (2). P. 193-207. URL: <http://doi.org/10.17270/J.LOG.2020.403>.
10. Pineda-Jaramillo J., Viti F. Identifying the rail operating features associated to intermodal freight rail operation delays. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. 147. 103993. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103993>.

11. Долгополов П. В., Трегубчак Д. В. Удосконалення організації поїздопотоків на залізничному полігоні в умовах швидкісного руху. *Збірник наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 163. С. 25-30. URL: [https://kart.edu.ua/wpcontent/uploads/2020/06/tht\\_zbirn\\_163.pdf](https://kart.edu.ua/wpcontent/uploads/2020/06/tht_zbirn_163.pdf).

---

Долгополов Петро Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2166-8064>. E-mail: [osnova2017@gmail.com](mailto:osnova2017@gmail.com).

Головко Тетяна Владиславна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7977-9664>. E-mail: [golovko\\_tv@kart.edu.ua](mailto:golovko_tv@kart.edu.ua).

Кулешов Валерій В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій і вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1757-0336>. E-mail: [kuleshov@kart.edu.ua](mailto:kuleshov@kart.edu.ua).

Пелех Павло Романович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-3565-7391>. E-mail: [ppavlo@gmail.com](mailto:ppavlo@gmail.com).

Dolgoplov Peter, PhD (Tech), Associate Professor, department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2166-8064>. E-mail: [osnova2017@gmail.com](mailto:osnova2017@gmail.com).

Golovko Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7977-9664>. E-mail: [golovko\\_tv@kart.edu.ua](mailto:golovko_tv@kart.edu.ua).

Kuleshov Valerii, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railway Stations and Junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1757-0336>. E-mail: [kuleshov@kart.edu.ua](mailto:kuleshov@kart.edu.ua).

Pelekh Pavlo, PhD student, department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-3565-7391>. E-mail: [ppavlo@gmail.com](mailto:ppavlo@gmail.com).

Статтю прийнято 15.12.2025 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО  
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE  
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT**

*Випуск 214*

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.  
Усі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Кальченко С. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

---

R30-06150 від 01.05.2025 р. Підписано до друку 26.12.2025 р.

Формат паперу А4. Папір писальний.

Умовн. друк. арк. 26,0. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Феєрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.