

ЗМІСТ РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

А. О. Сулим, П. О. Хозя, С. О. Столетов, В. В. Федоров Виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену.....	7
М. О. Багров, І. В. Гладких Радикальні дії зі скасування національних стандартів – черговий удар по технічному регулюванню галузі залізничного транспорту.....	26
Ж. О. Семко Особливості розрахунку життєвого циклу залізничного рухомого складу.....	35
Д. О. Брусило, І. В. Гладких Інтеграція відновлювальних джерел енергії в енергосистему залізничного транспорту України.....	46
І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, С. І. Мартинов Аналіз конструктивних особливостей кузовів пасажирських вагонів.....	53
О. В. Фомін, В. М. Іщенко, Н. С. Брайковська, Є. М. Яровий Інтелектуалізація логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом під час воєнного стану.....	66
О. В. Фомін, В. М. Іщенко, Н. С. Брайковська, Ю. В. Щербина Цифровий двійник гальмівної системи одиниці рухомого складу залізниць: новий підхід до розробки та моніторингу експлуатаційних характеристик.....	79
М. Б. Кельріх, В. В. Мамонтов Оцінка напружено-деформованого стану котла і рами вагон-цистерни моделі 15-1443-06	95
В. В. Федоров, В. О. Шушмарченко, О. О. Бородай Дослідження пошкоджень бункерних вагонів для перевезення зерна після сходження з рейок на під'їзних залізничних коліях.....	111
Вимоги до оформлення статей.....	120

CONTENTS

«RAILBOUND ROLLING STOCK»

A. O. Sulym, P. O. Khozia, S. O. Stoletov, V. V. Fedorov Execution of traction calculations for metro rolling stock	23
M. O. Bahrov, I. V. Hladkykh Decisive actions to cancel national standards: another blow to the technical regulation of the railway transport sector.....	32
Zh. O. Semko Aspects of calculating the lifecycle cost of railway rolling stock.....	44
D. O. Brusylo, I. V. Hladkykh Integration of renewable energy sources into the energy system of Ukraine's railway transport.....	51
I. E. Martynov, A. V. Trufanova, S. I. Martynov Analysis of design features of passenger car bodies.....	64
O. V. Fomin, V. M. Ishchenko, N. S. Braikovska, Ye. M. Yarovy Intellectualization of logistics processes of delivery of perishable goods by rail during martial arts.....	76
O. V. Fomin, V. M. Ishchenko, N. S. Braikovska, Iu. V. Shcherbina Digital twin of the brake system of a railway rolling stock unit: a new approach to the development and monitoring of operating characteristics.....	92
M. B. Kelrih, V. V. Mamontov Assessment of the stress-strain state of the boiler and the frame of the tank car model 15-1443-06.....	108
V. V. Fedorov, V. O. Shushmarchenko, O. O. Borodai Study of grain hoppers damage after derailment on railway access tracks.....	118
Requirements for drawing-up of articles.....	126

А.О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380536660354, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

П.О. Хозя

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380504410342, E-mail: pavlo.khozia@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

С.О. Столетов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +30673674043, E-mail: stoletoff.s.a@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-2534>

В.В. Федоров

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380536661384, E-mail: f.vladimir.ua@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0963-7265>

ВИКОНАННЯ ТЯГОВИХ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ

В статті розглянуто наявні дослідження за напрямком виконання та удосконалення тягових розрахунків для електрорухомого складу. Встановлено, що виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування є актуальною задачею. Визначено, що до виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену висуваються специфічні вимоги в силу особливостей експлуатації цього типу міського транспорту. Виконано тягові розрахунки для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування. Обґрунтовано раціональні режими ведення поїзда метрополітену для заданого перегону (ділянки експлуатації). Визначено витрати та питомі витрати електроенергії як на тягу, так і загальні з урахуванням витрат на власні потреби, для заданих умов експлуатації. Побудовано графіки сил тяги (гальмування), потужності, струму, швидкості руху, споживання електроенергії на тягу залежно від пройденого шляху та часу для заданої ділянки експлуатації.

© Сулим А.О., Хозя П.О., Столетов С.О., Федоров В.В., 2025

Виконано тепловий розрахунок, який підтвердив можливість застосування обраного типу асинхронного двигуна за критерієм відсутності перевищення граничного значення температури обмоток двигуна.

Ключові слова: асинхронний тяговий привод, метрополітен, рухомий склад, питомі витрати електроенергії на тягу, система керування, тяговий розрахунок.

Вступ. Одним з важливих етапів під час проєктування нового та модернізації існуючого тягового електрорухомого складу є виконання тягових розрахунків. Під тяговими розрахунками мають на увазі вирішення групи наступних завдань [1, 2]:

- попереднє визначення маси поїзда стосовно заданої ділянки сполучення, тобто за умови заданого типу тягового електрорухомого складу та профілю залізничної колії;

- аналіз можливих режимів ведення поїзда на заданій ділянці та основних показників його роботи на ділянці (швидкості руху, витрат електроенергії, нагріву електрообладнання та інше);

- заключний вибір маси поїзда, раціонального режиму ведення та основних показників його роботи – швидкості руху та витрат електроенергії на тягу поїздів.

За ґрунтового виконання тягових розрахунків існує можливість вибору раціонального тягового обладнання, раціональних режимів ведення, зменшення експлуатаційних витрат протягом життєвого циклу тягового електрорухомого складу.

Аналіз останніх досліджень. Чинні правила [3] визначають порядок та методику тягових розрахунків для поїзної роботи локомотивів та моторвагонного рухомого складу на залізницях. Враховуючи сучасні тенденції розвитку силового тягового електрообладнання та систем керування поїздами, існує необхідність постійного удосконалення цих правил тягових розрахунків.

Так, у працях [4, 5] запропоновано моделювати тягово-енергетичні процеси у системі електричної тяги. Роботи [6, 7] направлені на удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення тягового електрорухомого складу шляхом застосування оптимізаційних моделей та автоматизованої системи комп'ютерного моделювання. Роботи [8–15] направлені на пошук енергооптимальних режимів ведення тягового електрорухомого складу. У попередніх дослідженнях [16, 17] особливу увагу було акцентовано на процедурах вибору пускової сили тяги поїзда метрополітену, а також асинхронному електроприводу для рухомого складу метрополітену. При цьому у жодній з наведених робіт деталізовано процедурі виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування уваги не приділялось.

У цій роботі запропоновано продовжити дослідження для такого типу електрорухомого складу як поїзд метрополітену з регульованим асинхронним приводом та мікропроцесорної системи керування, який має специфічні особливості експлуатації у порівнянні з іншими видами електрорухомого складу, за напрямком виконання тягових розрахунків.

Мета статті – описати процедуру виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену на базі асинхронного приводу та мікропроцесорної системи керування з урахуванням заданої ділянки експлуатації.

Матеріал та результати досліджень. У попередніх дослідженнях [16, 17] запропоновано внести зміни до виконання окремих етапів тягових розрахунків в частині вибору пускової сили тяги та ефективного асинхронного тягового електроприводу. У цій роботі пропонується навести деталізовано процедуру виконання тяго-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

вих розрахунків для рухомого складу метрополітену на базі асинхронного приводу та мікропроцесорної системи керування з урахуванням заданої ділянки експлуатації на етапі його проектування.

Режими навантажень асинхронних тягових двигунів (АТД) для рухомого складу метрополітену визначаються умовами їх експлуатації. Слід зазначити, що для рухомого складу метрополітену притаманні специфічні умови експлуатації (обмеження потужності, часті прискорення і гальмування, незначна відстань між станціями, часто змінюваний профіль колії тощо), які обов'язково необхідно враховувати під час виконання тягових розрахунків. До рухомого складу метрополітену застосовуються специфічні вимоги за потужністю. В тяговому режимі пускова потужність P_n , кВт зазвичай обмежена пропускну здатністю пристроїв енергозабезпечення (максимальним струмом споживання на один вагон). Це обумовлює відношення швидкостей $V_{\max}/V_{\text{ном}}=2,5-3,5$. В режимі електричного гальмування відсутні жорсткі обмеження за пристроями енергозабезпечення, оскільки згенерована електроенергія використовується іншими споживачами або розсіюється у вигляді теплової енергії. Крім того, бажано забезпечити інтенсивне гальмування на високих швидкостях з тим, щоб гранично зменшити час руху на перегоні (потужність АТД в гальмівному режимі має перевищувати пускову потужність тягового режиму). При цьому швидкість початку інтенсивного гальмування зазвичай перевищує швидкість виходу на пускову потужність у тяговому режимі, оскільки граничні тягові та гальмівні зусилля мають бути приблизно однаковими. За швидкості $V_{\max}$ іноді може знадобитись зниження потужності в тяговому та гальмівному режимах за умовою статичної стійкості АТД. Таким чином, під час проектування рухомого складу метрополітену з АТД та мікропроцесорною системою керування перелічені особливості мають бути враховані.

Наведені на рис. 1 криві дають уявлення про навантаження АТД рухомого складу метрополітену в штатному режимі експлуатації.

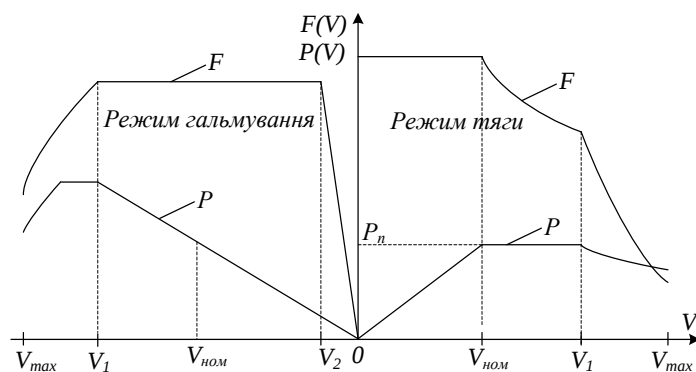


Рис. 1. Характерні криві потужності та сили тяги для рухомого складу метрополітену

На рис. 1 прийнято наступні позначення: P — потужність; F — сила тяги; $V_{\text{ном}}$ — номінальна швидкість руху; $V_{\max}$ — максимальна швидкість руху; V_1 — швидкість руху, за якої відбувається зміна характеру кривих потужності та сили тяги

(гальмування); V_2 – швидкість руху, за якої відбувається заміна електричного гальмування пневматичним.

Крім вищенаведених обмежень, мають бути враховані нормативні вимоги за умовами темпу розгону та гальмування рухомого складу з метою забезпечення високої пропускної здатності на перегонах та комфортності перебування пасажирів у салоні. При цьому під час проєктування та виконання тягових розрахунків враховуються маса рухомого складу за різного завантаження та накладаються певні обмеження на реалізацію максимальної сили тяги (гальмування) за зчепленням та максимальним пусковим моментом тягового двигуна.

З урахуванням вищенаведеного, на рис. 2 в загальному вигляді представлено процедуру виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену на базі асинхронного приводу та мікропроцесорної системи керування.

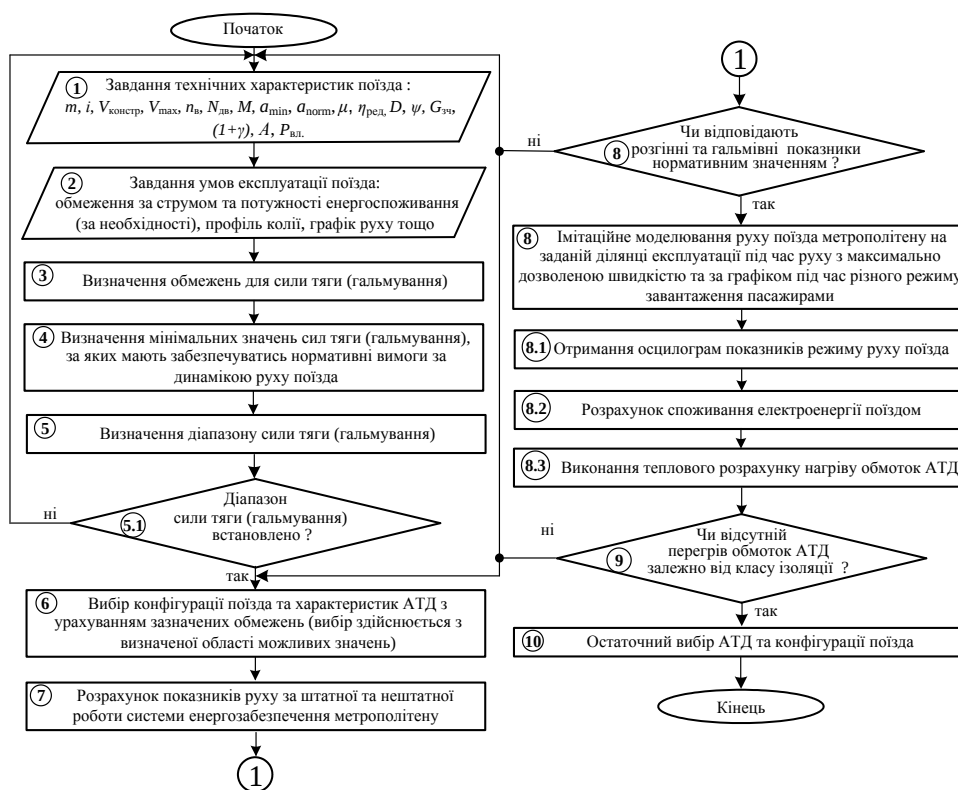


Рис. 2. Процедура виконання тягових розрахунків для інноваційного рухомого складу метрополітену у вигляді алгоритмічних блок-схем

Перший етап (завдання характеристик поїзда). На першому етапі для виконання тягових розрахунків задаються такі вхідні дані: маса поїзда (порожній, номінальний та максимальний завантаження) – m , т; максимальний ухил – i , ‰; конструкційна швидкість поїзда – $V_{\text{констр}}$, км/год; експлуатаційна швидкість – V_{max} , км/год; кількість вагонів у поїзді – n_v , шт; кількість моторних осей у поїзді – $N_{\text{дв}}$, шт; максимальний крутний момент двигуна у режимах тяги та гальмування – M , кН·м; мінімальне значення прискорення – a_{min} , м/с²; необхідне значення прискорення (сповіль-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

нення) до заданої швидкості руху – $a_{\text{погм}}$, м/с²; передаточне число редуктора – μ ; коефіцієнт корисної дії редуктора – $\eta_{\text{ред}}$; діаметр колеса – D , м; розрахункове значення коефіцієнта зчеплення – ψ ; зчіпна вага поїзда – $G_{\text{зч}}$, кН; коефіцієнт інерції обертових мас поїзда – $(I+\gamma)$; площа передньої частини поїзда – A , м²; споживання електроенергії поїзда на власні потреби – $P_{\text{вл}}$, кВт.

Другий етап (завдання умов експлуатації поїзда). Задаються обмеження за струмом та потужністю енергоспоживання поїзда (за наявності), профіль колії, графік руху тощо.

Третій етап (розрахунок обмежувальної сили тяги (гальмування) за переважними можливостями моменту на валу двигуна та зчепленням коліс з рейками). Значення тягових та гальмівних зусиль обираються з визначеного діапазону, виходячи з обмеження за крутним моментом тягового двигуна, за зчепленням колеса з рейкою.

Розрахунок максимальної сили тяги (гальмування) поїзда за граничним крутним моментом тягового двигуна виконують за формулою [1]:

$$F_{\text{max}} \leq \frac{2 \cdot M \cdot \mu \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot N_{\text{дв}}}{D}, \quad (1)$$

Максимально допустиму силу тяги (гальмування) за умовою зчеплення колеса з рейкою розраховують за формулою [1, 2]:

$$F_{\text{max}} \leq G_{\text{зч}} \cdot \psi. \quad (2)$$

Четвертий етап (розрахунок мінімально необхідної сили тяги (гальмування)).

Розрахунок мінімально необхідної пускової сили тяги (гальмування), виходячи з вимог реалізації значень середнього прискорення (сповільнення), виконують за формулою [1, 2]:

$$F_{\text{min}} \geq m \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W, \quad (3)$$

де W – основний опір руху поїзда, кН.

Основний опір руху поїзда визначають за модифікованим рівнянням Девіса:

$$W = 6,4M + 130n_e + 0,14MV + [0,046 + 0,0065(N_{\text{дв}} - 1)]A \cdot V^2, \quad (4)$$

де V – швидкість руху поїзда, км/год; n_e

A – площа передньої частини головного вагона, м².

П'ятий етап (визначення діапазону сили тяги (гальмування)).

Визначають діапазон максимальної сили тяги (гальмування) для різних варіантів завантаження поїзда згідно рівнянь (1), (2), (3). За умови відсутності вимог до динаміки розгону за певного режиму завантаження діапазон максимальної сили тяги (гальмування) обираються згідно рівнянь (1), (2).

У випадку, якщо діапазон пускової сили тяги не визначено, тоді необхідно виконати коригування вхідних даних виконання тягових розрахунків (збільшити кількість моторних осей поїзда, обрати тягові двигуни з іншими параметрами тощо).

Шостий етап (вибір тягової та гальмівної характеристики поїзда). На цьому етапі з розрахункового діапазону обираються значення максимальної сили тяги (гальмування), які має забезпечувати обраний тип АТД. Алгоритми вибору АТД детально розглянуто в роботі [14], тому зупинятись на цьому питанні не варто. Таким чином, за підсумками цього етапу обирається тип АТД, а також будуються тягова та гальмівна характеристики поїзда.

Сьомий етап (розрахунок показників руху за штатної та нештатної роботи системи енергозабезпечення метрополітену). На цьому етапі визначають значення прискорень (сповільнень) та порівнюють їх з нормованими значеннями.

Прискорення (сповільнення) поїзда на прямолінійній ділянці колії визначають за формулою [1, 2]:

$$a = \frac{F - W}{m(1 + \gamma)}, \quad (5)$$

Визначення прискорення на ухилі здійснюють за формулою [1, 2]:

$$a_i = \frac{F - W - W_i - R_i}{m(1 + \gamma)}, \quad (6)$$

де W_i – додатковий опір руху на ухилі, кН;

R_i – додатковий опір руху на ухилі в момент зрушення поїзда, кН.

Додатковий опір руху на ухилі визначають за формулою [1, 2]:

$$W_i = m \cdot g \cdot i, \quad (7)$$

де g – значення прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

i – значення ухилу колії, ‰.

Додатковий опір руху на ухилі в момент зрушення поїзда визначають за формулою [1, 2]:

$$R_i = m \cdot g \cdot r_i, \quad (8)$$

де r_i – початковий опір руху, який прийнято 4 кН/т.

Якщо значення розрахованих прискорень (сповільнень) задовольняють встановленим вимогам, то в подальшому виконується моделювання руху поїзда метрополітену для заданих умов його експлуатації. В іншому випадку потрібно вносити корективи у обрану тягову та/або гальмівну характеристики.

Восьмий етап передбачає імітаційне моделювання руху поїзда метрополітену. Імітаційне моделювання включає такі дослідження: отримання осцилограм (залежностей) за результатами моделювання руху поїзда для заданих умов експлуатації для обраних керуючих впливів; розрахунок споживання електроенергії на тягу та власні потреби для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену; виконання теплового розрахунку за максимального завантаження поїзда під час повторюваного циклу короточасного прискорення і гальмування.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Імітаційне моделювання, як правило, здійснюється за максимального завантаження вагонів за максимальної сили тяги (гальмування) під час руху та за номінального завантаження під час графікового руху, з метою оцінки показників руху поїзда.

Визначення витрат електроенергії, як правило, виконується для заданого перегону з встановленою експлуатаційною швидкістю руху. Розрахунок витрат електроенергії поїзда метрополітену здійснюють через відомі середні значення напруги та струму, час руху, масу поїзда метрополітену у завантаженому стані та довжину перегону. За цими даними розраховують сумарне значення спожитої енергії та розраховують значення питомих витрат на тягу.

Витрати електроенергії на тягу, $A_{тяги}$, та витрати на власні потреби визначають за формулами (9), (10):

$$A_{тяги} = \frac{\bar{U} \cdot \bar{I} \cdot \Delta t}{3600 \cdot 1000}, \quad (9)$$

$$A_{власн.} = \frac{P_{вл} \cdot \Delta t \cdot K_{вик}}{3600}, \quad (10)$$

де:

$\bar{U}$ – середнє значення напруги, В;

$\bar{I}$ – середнє значення сили струму, А;

Δt – час руху на перегоні, с;

$P_{вл}$ – потужність споживання на власні потреби, кВт;

$K_{вик}$ – коефіцієнт використання потужності електрообладнання власних потреб.

Питомі витрати електроенергії на тягу поїзда метрополітену a_{num} , Вт·год/т·км, розраховують за формулою (11):

$$a_{num} = \frac{\bar{U} \cdot \bar{I} \cdot \Delta t}{m \cdot L \cdot 3600}, \quad (11)$$

де: L – довжина перегону, км.

Загальні витрати електроенергії визначають як суму витрат споживання на тягу та витрат на власні потреби.

Тепловий розрахунок за нагріванням тягових двигунів виконують за результатами імітаційного моделювання поїзда метрополітену для найбільш навантаженого режиму (максимальне завантаження, напруга контактної мережі в режимі тяги 750 В та 900 В під час гальмування).

Далі з використанням запропонованої процедури здійснено виконання тягових розрахунків для п'ятивагонного рухомого складу метрополітену зі схемою формування $Mc+T+M+T+Mc$ на базі асинхронного приводу та мікропроцесорної системи керування для заданих умов його експлуатації.

Вимоги до характеристик поїзда та дані для виконання тягового розрахунку, наведено в табл. 1.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 1. –Основні параметри для виконання тягового розрахунку

№ п/п	Параметр	Значення
1	Маса тари поїзда, т	158,42
2	Маса поїзда в завантаженому стані EL10 (10 чол/м ²), т	275,11
3	Маса поїзда в завантаженому стані 75%EL4 (3 чол/м ²), т	203,64
4	Максимальний ухил, ‰	45
5	Конструкційна швидкість, км/год	90
6	Експлуатаційна швидкість, км/год	80
7	Кількість вагонів у поїзді	5
8	Кількість моторних осей у поїзді	12
9	Максимальний крутний момент двигуна в режимі тяги, Н·м	1765
10	Максимальний крутний момент двигуна в режимі гальмування, Н·м	1490
11	Мінімальне значення прискорення, м/с ²	0,01
12	Нормативне значення прискорення до 33 км/год за порожнього режиму та номінального завантаження, м/с ²	≥1,2
13	Нормативне значення прискорення до 33 км/год за максимального завантаження, м/с ²	≥1,08
14	Передаточне число редуктора	7,918
15	Коефіцієнт корисної дії редуктора	0,98
16	Діаметр колеса, мм	0,86
17	Значення коефіцієнта зчеплення у режимі тяги	0,22
18	Значення коефіцієнта зчеплення у режимі гальмування	0,21
19	Зчіпна вага поїзда у порожньому стані EL0, кН	981
20	Зчіпна вага поїзда за номінального завантаження 75%EL4, кН	1243
21	Зчіпна вага поїзда за максимального завантаження EL10, кН	1660
22	Коефіцієнт інерції обертових мас у порожньому стані	1,1
23	Коефіцієнт інерції обертових мас у завантаженому стані	1,08
24	Площа передньої частини поїзда, м ²	7,02
25	Споживання електроенергії поїзда на власні потреби	72,6

Експлуатаційні показники для моделювання згідно даних специфікації наступні:

- протяжність маршруту – 10 км;
- середня відстань між станціями – 1 км;
- зупинка на 9 станціях;
- час зупинки на станціях – 1 хв;
- максимальна швидкість – 80 км/год;
- плоский градієнт (рівна прямолінійна площадка без ухилів);
- відсутність зворотного гальмування (без урахування рекуперативного гальмування);
- завантаження поїзда - EL10;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- середня експлуатаційна швидкість – 35 км/год;

- мінімальний інтервал руху – 2 хв.

Результати розрахунків, виконаних за формулами (1)–(4), наведено в табл. 2 і 3.

Таблиця 2. – Результати розрахунків сили тяги (гальмування)

Показник, характеристика	Значення для тягового обладнання		
	порожній режим	завантаження, що становить 75% від завантаження EL4	максимальне завантаження
Режим тяги			
$F_{\max}$, кН	≤ 378	≤ 378	≤ 378
$F_{\max \psi}$, кН	≤ 216	≤ 273	≤ 365
$F_{\min}$, кН	≥ 212	≥ 267	≥ 322
Режим гальмування			
$F_{\max}$, кН	≤ 319	≤ 319	≤ 319
$F_{\max \psi}$, кН	≤ 206	≤ 261	≤ 349
$F_{\min}$, кН	≥ 200	≥ 250	≥ 315

Таблиця 3. – Основний опір руху поїзда

Швидкість	Порожній (EL0)	Номінальне заванта- ження (75%EL4)	Максимальне заванта- ження (EL10)
5	3,737	4,058	4,566
10	3,886	4,239	4,796
15	4,060	4,445	5,052
20	4,260	4,676	5,333
25	4,484	4,932	5,639
30	4,734	5,213	5,971
35	5,009	5,520	6,328
40	5,310	5,852	6,710
45	5,635	6,210	7,117
50	5,986	6,592	7,550
55	6,363	7,000	8,008
60	6,764	7,433	8,491
65	7,191	7,892	9,000
70	7,643	8,376	9,533
75	8,120	8,885	10,092
80	8,623	9,419	10,677
85	9,151	9,978	11,286
90	9,704	10,563	11,921

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

У разі розрахункової схеми формування поїзда $Mc+T+M+T+Mc$ за умов вибору даного тягового приводу пускова сила тяги складає (212 – 216) кН для порожнього режиму, (267 – 273) кН – для завантаження, що становить 75% від завантаження EL4 та (322 – 365) кН для максимального завантаження поїзда; діапазон гальмівного зусилля складає (200 – 206) кН для порожнього режиму, (250 – 261) кН – для завантаження, що становить 75% від завантаження EL4 та (315 – 319) кН для максимального завантаження поїзда (у разі використання комбінованого гальмування).

Обрані тягові і гальмівні характеристики, а також залежності прискорення (сповільнення) від швидкості поїзда, за порожнього режиму, завантаження, що становить 75% від завантаження EL4 та режиму з максимальним завантаженням поїзда для схеми формування поїзда $Mc+T+M+T+Mc$, наведено на рис. 3–8.

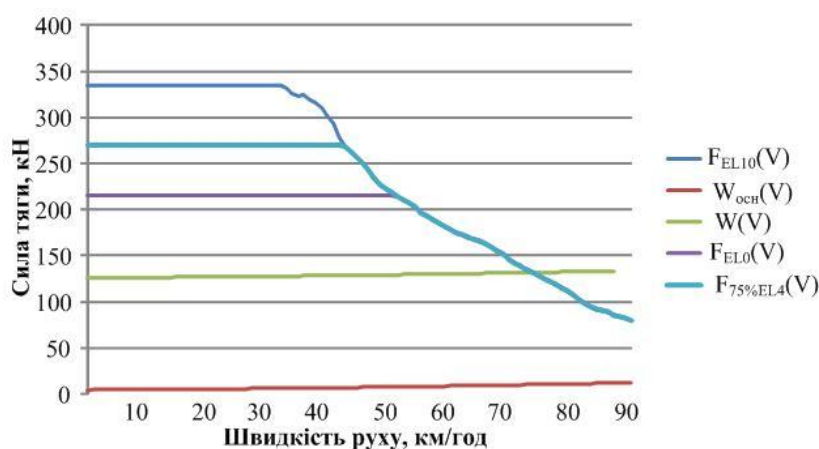


Рис. 3. Тягова характеристика поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10), характеристики основного опору руху $W_{очн}(V)$ та загального опору руху $W(V)$

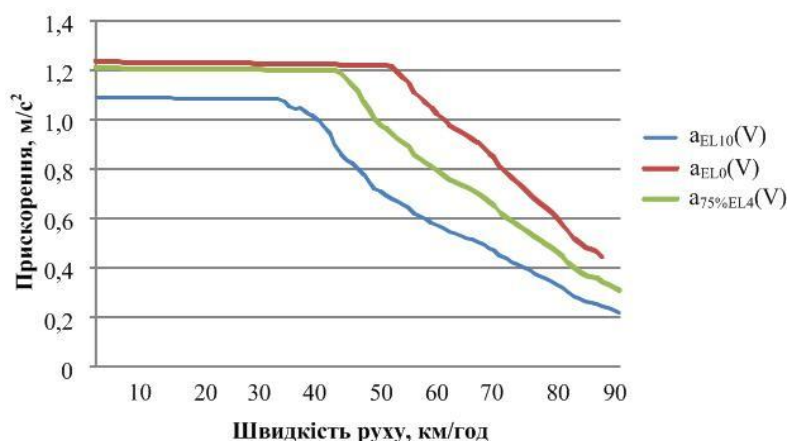


Рис. 4. Прискорення поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

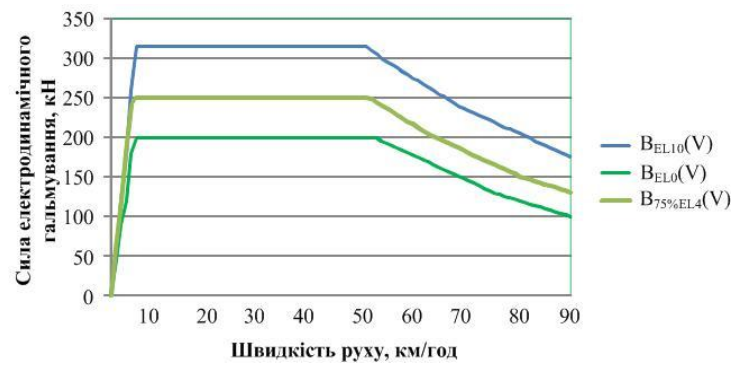


Рис. 5. Гальмівна характеристика поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10) під час застосування електродинамічного гальмування

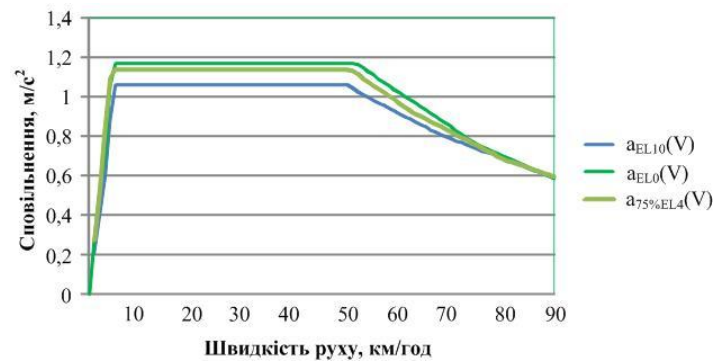


Рис. 6. Сповільнення поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10) під час застосування електродинамічного гальмування

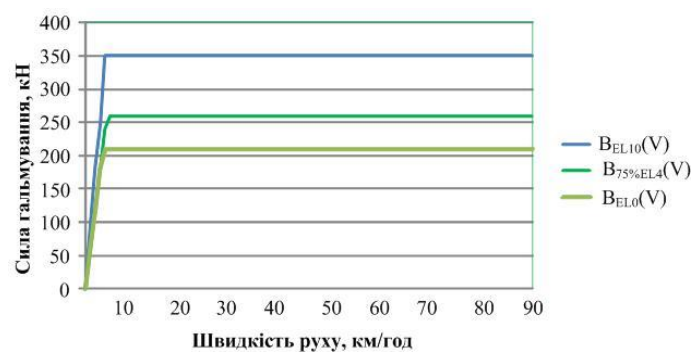


Рис. 7. Гальмівна характеристика поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10) (електродинамічне + пневматичне гальмування)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

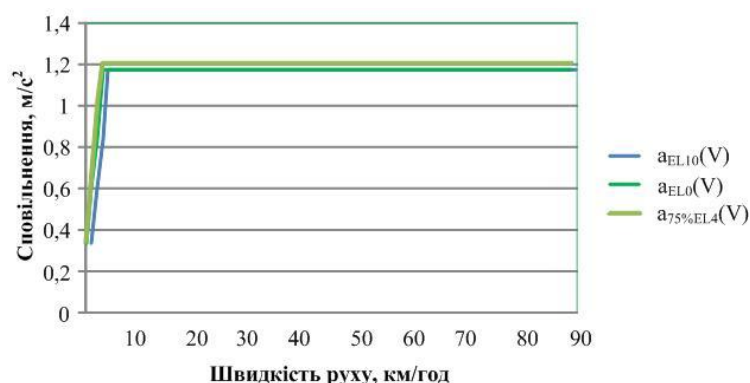


Рис. 8. Сповільнення поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10) (електродинамічне + пневматичне гальмування)

Таким чином, обрано тип АТД технічні характеристики якого наведено в табл. 4.

Таблиця 4. – Основні характеристики тягового двигуна

№ п/п	Характеристика	Показник
1	Номінальна потужність, кВт	180
2	Номінальна напруга, В	530
3	Номінальний струм, А	234
4	Номінальна частота, Гц	80
5	Номінальна частота обертання, об/хв	2363
6	Номінальне значення ККД, %	93,2
7	Крутний момент, Н·м	728
8	Пусковий момент в режимі тяги, Н·м	1765
9	Максимальний крутний момент під час гальмування, Н·м	1490
10	Маса, кг	540
11	Клас ізоляції	220
12	Умови навколишнього середовища, °С	від -40 до 40

Розраховані значення прискорень за штатного та нештатних режимів (у разі відмови тягового обладнання на одному моторному вагоні; у разі пониженого коефіцієнта зчеплення; у разі евакуації іншим поїздом на ухилі 45 ‰) за формулами (5)–(8), наведені в таблиці 5. При цьому максимальне значення пускової сили тяги було обрано пропорційно меншим відповідно до умов штатного режиму роботи тягового обладнання. Значення коефіцієнта зчеплення під час виконання тягових розрахунків за несприятливих умов експлуатації поїзда прийнято 0,133.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 5. – Розраховані значення прискорень за штатного та нештатних режимів експлуатації поїзда

Розраховане значення прискорень за штатного режиму руху			
	EL0	75%EL4	EL10
Рівна площадка	1,215	1,212	1,116
Ухил 45 ‰	0,797	0,783	0,682
Розраховане значення прискорень за нештатного режиму руху (вихід з ладу тягового перетворювача)			
Рівна площадка	1,000	0,998	0,918
Ухил 45 ‰	0,591	0,578	0,494
Розраховане значення прискорень за нештатного режиму руху (понижений коефіцієнт зчеплення)			
Рівна площадка	0,725	0,718	0,712
Ухил 45 ‰	0,401	0,397	0,389
Розраховане значення прискорень за нештатного режиму руху (евакуація поїзда іншим поїздом на максимальному ухилі 45 ‰)			
EL0	0,180	0,103	0,014
75%EL4	0,241	0,169	0,102
EL10	0,265	0,203	0,160

За результатами аналізу розрахованих значень прискорень (табл. 5) помітно, що обраний тип АТД та схема формування забезпечують можливість руху поїзда з прискоренням під час штатного режиму руху, виникнення аварійних режимів в тяговому обладнанні, зниженого коефіцієнта зчеплення, евакуації несправного поїзда метрополітену з різним рівнем завантаження пасажирів.

Результати розрахунків витрат електроенергії на тягу, витрат на власні потреби, питомих витрат електроенергії на тягу п'ятивагонного поїзда метрополітену, який складається з двох головних моторних вагонів, двох проміжних немоторних вагонів та одного проміжного моторного вагона, наведено в табл. 6.

Таблиця 6. – Результати розрахунків споживання електроенергії поїздом

Завантаження	V експл., км/год	Споживання на тягу, кВт·год	Питомі витрати на тягу, Вт·год/т·км	Споживання на власні потреби, кВт·год	Загальне енергоспоживання, кВт·год	Питомі витрати, Вт·год/т·км
EL10	53,28	26,76	97,26	0,68	27,45	99,73
EL10	35,73	8,02	29,16	1,02	9,04	32,87
75%EL4	35,08	5,94	29,18	1,03	6,97	34,25

Результати моделювання руху поїзда за максимального завантаження EL10 під час повторюваного циклу короточасного прискорення і гальмування для заданих умов його експлуатації (повний оберт для заданої ділянки колії) наведено на рис. 9 та рис. 10. На рис. 9 зображено осцилограми (залежності), за середньої швидкості сполучення на перегоні 53 км/год, на рис. 10 – за середньої швидкості на перегоні 35 км/год.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

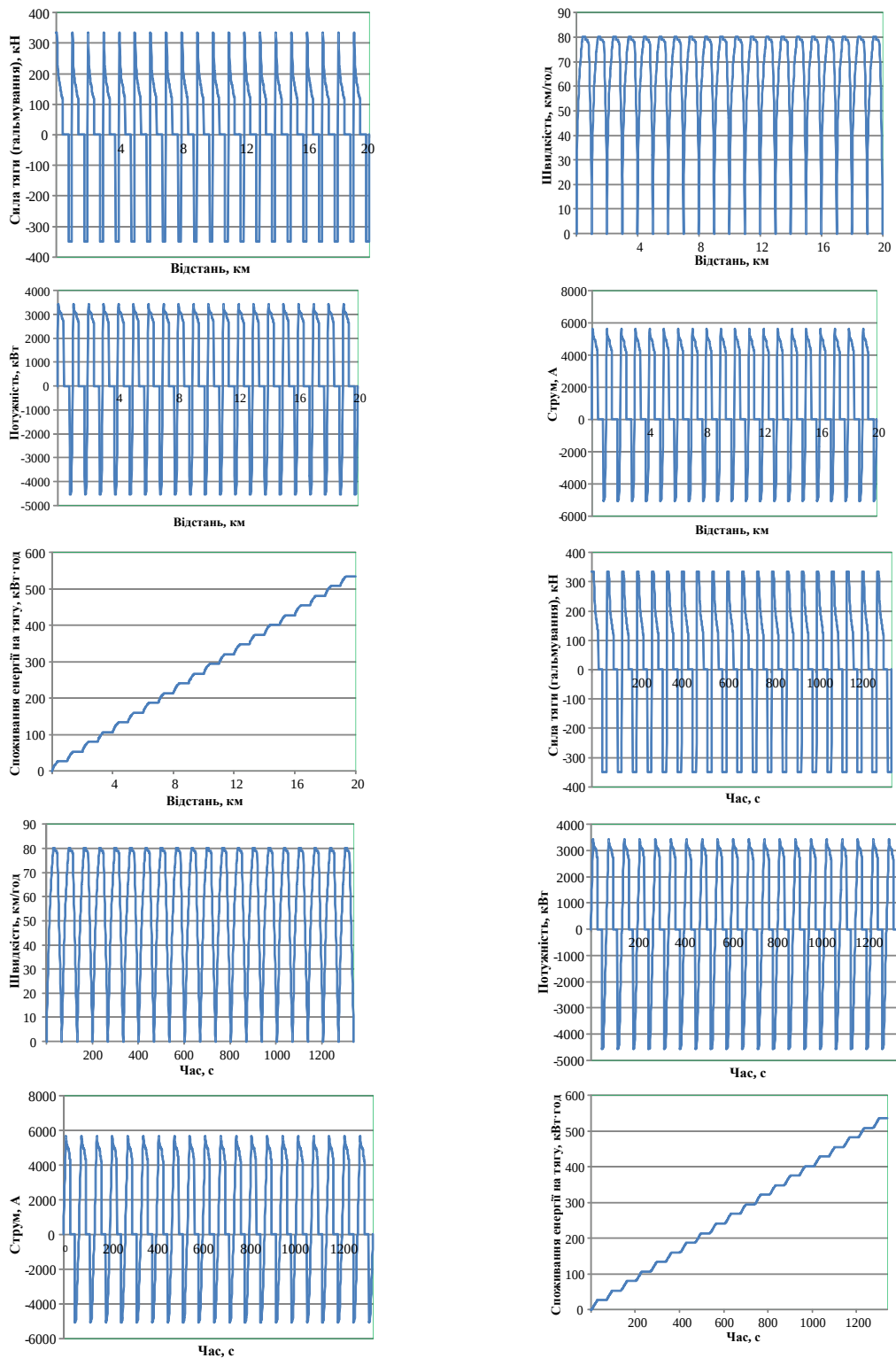


Рис. 9. Осцилограми моделювання руху поїзда метрополітену з максимальним завантаженням EL10 та середньої швидкості сполучення на перегоні 53 км/год

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

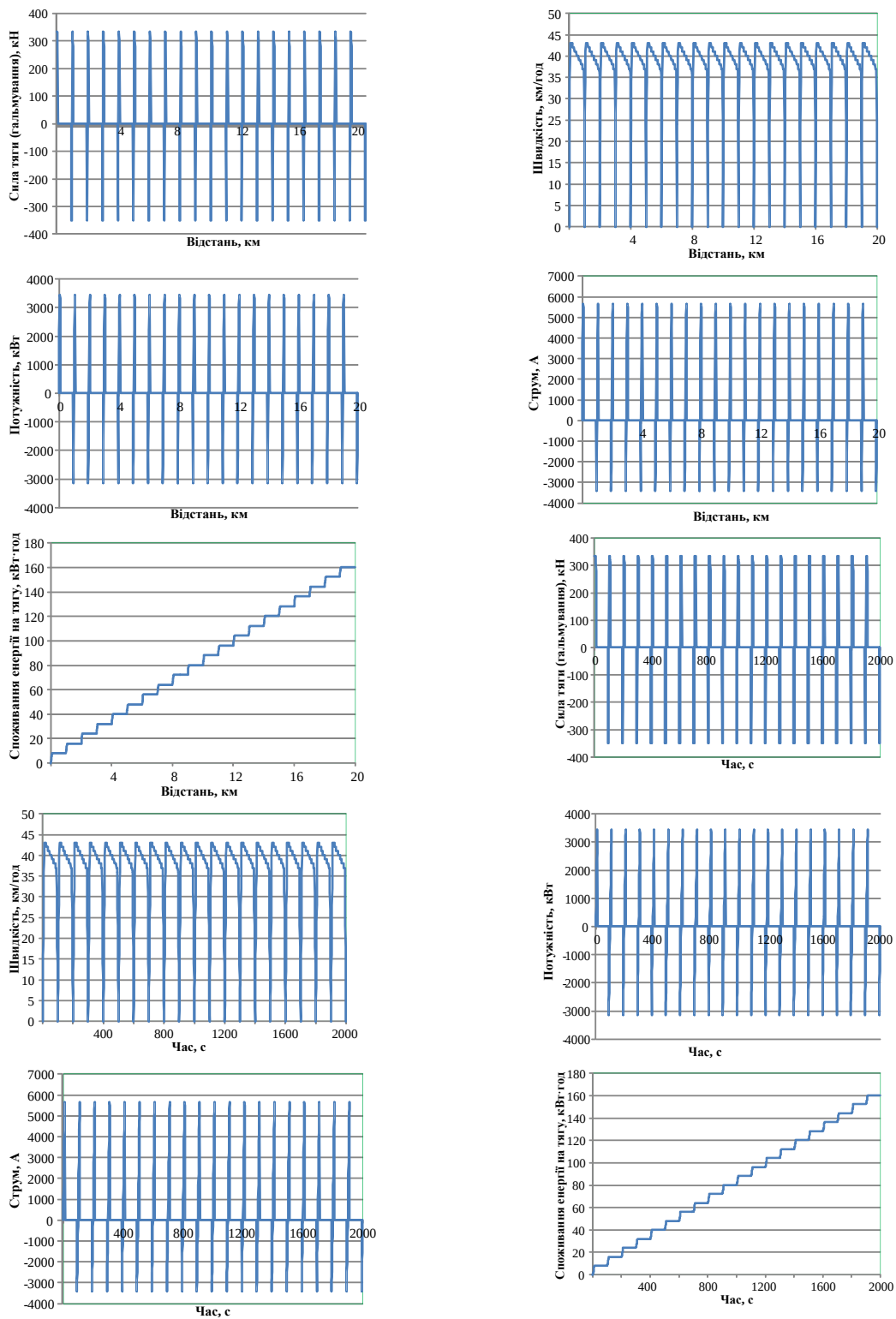


Рис. 10. Осцилограми моделювання руху поїзда метрополітену з максимальним завантаженням EL10 та середньої швидкості сполучення на перегоні 35 км/год

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За результатами моделювання встановлено, що для заданих умов експлуатації середньоквадратичне значення струму тягового двигуна становить 232 А, що не перевищує значення номінального струму 234 А, тому підвищення температури обмотки тягового двигуна знаходиться в межах допустимого граничного значення.

Висновки.

1. Наведено та описано процедуру виконання тягових розрахунків для інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування, яка базується на застосуванні методу імітаційного комп'ютерного моделювання та враховує сучасні вимоги до таких розрахунків.

2. Запропонована процедура виконання тягових розрахунків дозволить на етапі проєктування інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування здійснювати ефективний вибір тягового обладнання з урахуванням умов експлуатації на заданій ділянці колії та підвищити точність виконання тягових розрахунків.

3. Наведено приклад виконання тягових розрахунків для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену, за результатами якого побудовано тягову та гальмівну характеристики залежно від завантаження пасажирями, обрано тягове обладнання для поїзда, розраховано показники споживання електроенергії поїздом, побудовано осцилограми (залежності) для різних умов руху поїзда, перевірено ступінь нагрівання обраних асинхронних тягових двигунів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Далека В.Х., Пушков П.М., Андрійченко В.П., Мінеєва Ю.В.: навч. посібник. Основи електричної тяги; Харк. нац. Акад. міськ. госп-ва. Х.: ХНАМГ, 2012. 312 с.
2. Теорія електричної тяги: Монографія: в 2 т. (переклад р. м.). / Г.К. Гетьман. Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. Т 2. 361 с.
3. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи (переклад р. м.). М.: Транспорт, 1985. 287 с.
4. Сидоренко А.М. Моделювання тягово-енергетичних процесів у системі електричної тяги. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. Вип. 35. С. 89–101. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-10>
5. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Ya., Sidorenko A., Lyubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Issue 1 (97). P. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>
6. Барибів М.А., Фалендиш А.П., Клецька О.В., Іванченко Д.А., Кіріцева О.В. Удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення тягового рухомого складу. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. 2021. № 5 (95). С. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550>
7. Фалендиш А.П., Гатченко В.О., Возненко С.В., Клецька О.В., Барибін М.А. Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. Вип. 35. С. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>
8. Кислий Д.М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. 2016. № 1 (61). С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
9. Petrenko O., Liubarskiy B., Plugin V. Determination of railway rolling stock optimal movement modes. Electrical Engineering & Electromechanics. 2017. № 6. P. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
10. Пригула М.Г., Пасечник О.А. Оптимізаційні тягові задачі на залізничній мережі. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна 2019. №3(81). С.44-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/171774>
11. Палант О.Ю., Стаматін В.В. Огляд наявних і перспективних систем автоведення поїздів метрополітену. Проблеми економіки. 2019. № 2(40). С. 119-125. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2019-2-119-125>

12. Любарський Б.Г. Рациональні швидкісні режими руху приміського електропоїзду з асинхронними тяговими двигунами. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 18 (1127). С. 86–92.
13. Питула М.Г., Пасечник О.А. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. 2018. №6(78). С. 82–100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641>
14. Coman F.A., Meng L. Review of Online Dynamic Models and Algorithms for Railway Traffic Management. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. Vol. 16. Iss. 3. P. 1274–1284 DOI: <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2358392>
15. Gholamian S.A. A discrete-event optimization framework for mixed-speed train timetabling problem. Journal of Industrial Engineering and Management Studies. 2017. Vol. 4. No. 2 – P. 64–84.
16. Сулим А.О., Сичов С.Д., Распопін В.Р., Мельник О.О., Федоров В.В. Розробка алгоритму для розрахунку пускової сили тяги поїзда метрополітену (переклад р.м.). Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». Кременчук, 2012. Вип. 6. С. 20–23.
17. Сулим А.О., Устенко О.В., Мельник О.О., Ломонос А.І., Мужичук С.О., Соловей В.С. Процедура вибору асинхронного тягового електроприводу для інноваційного рухомого складу метрополітену. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2021. Вип. 37. С. 97–118. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-11>

A.O. Sulym

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenichuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380536660354, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

P.O. Khozia

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenichuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380504410342, E-mail: pavlo.khozia@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

S.O. Stoletov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenichuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380673674043, E-mail: stoletoff.s.a@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8964-4790>

V.V. Fedorov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenichuk, 39621, Ukraine
Tel: +380536661384, E-mail: f.vladimir.ua@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0963-7265>

EXECUTION OF TRACTION CALCULATIONS FOR METRO ROLLING STOCK

The article reviews existing research on the execution and improvement of traction calculations for electric rolling stock. It has been established that performing traction calculations for metro rolling stock with asynchronous drives and microprocessor control systems is a topical issue. It has been determined that specific requirements are imposed on the performance of traction calculations for metro rolling stock due to the pe-

cularities of operating this type of urban transport. Traction calculations have been performed for the specified operating conditions of metro rolling stock with asynchronous drive and microprocessor control system. Rational modes of metro train operation for a given section (operating section) have been substantiated. The consumption and specific consumption of electricity for both traction and general purposes, taking into account consumption for own needs, have been determined for the specified operating conditions. Graphs of traction (braking) forces, power, current, speed, and electricity consumption for traction depending on the distance travelled and time for a given operating section have been plotted.

A thermal calculation which confirmed the possibility of using the selected type of asynchronous motor based on the criterion of not exceeding the maximum temperature of the motor windings has been executed.

Keywords: asynchronous traction drive, metro, rolling stock, specific traction power consumption, control system, traction calculation.

REFERENCES

1. Daleka, V. Kh., Pushkov, P. M., Andriichenko, V. P., & Minieieva, Yu. V. Fundamentals of Electric Traction: Study Guide. Kharkiv National Academy of Municipal Economy. Kharkiv: KhNAMG, 2012. 312 p.
2. Getman, G.K. (2010). Teoriya elektricheskoy tyagi [Theory of Electric Traction]. Monograph. Dnipro: Izdatelstvo Dnepropetrovskogo natsionalnogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V.Lazaryana - Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian. (Vols.2).
3. *Pravila tyagovyih raschetov dlya poezdnoy raboty [Rules for Traction Calculations for Train Operation]* (1985). Moscow: Transport
4. Sydorenko, A.M. (2020). Modeliuvannya tiahovo-enerhetychnykh protsesiv u systemi elektrychnoi tiahiv [Modelling of traction and energy processes in electric traction systems]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific papers by DUIT. Series: Transport Systems and Technologies*, 35, 89–101. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-10> [in Ukrainian].
5. Yatsko, S., Sytnik, B., Vashchenko, Ya., Sidorenko, A., Lyubarskyi, B., Veretennikov, I., & Glebova, M. (2019). Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(97), 48–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520> [in Ukrainian]
6. Barybiv, M.A., Falendysh, A.P., Kletska, O.V., Ivanchenko, D.A., & Kiritseva, O.V. (2021). Udoshkonalennia tiahovykh rozrakhunkiv ta rezhymiv vedennia tiahovoho rukhomoho skladu [Improvement of traction calculations and traction rolling stock operating modes]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk DNUZT im. V. Lazariana - Collection of scientific works of DUIT. Series 'Transport systems and technologies'*, 5(95), 71–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550> [in Ukrainian].
7. Falendysh, A.P., Hachenko, V.O., Voznenko, S.V., Kletska, O.V., & Barybin, M.A. (2020). Matematychni modeliuvannya osnovnykh parametriv u tiahovykh rozrakhunkakh [Mathematical modelling of key parameters in traction calculations]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific works of the State University of Information Technologies. Series 'Transport Systems and Technologies'*, 35, 102–112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11> [in Ukrainian]
8. Kyslyi, D.M. (2016). Vyznachennia enerhozaoshchadzhuiuchykh rezhymiv vedennia poizdiv [Determination of energy-saving modes of train operation]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk DNUZT im. V. Lazariana. Science and progress in transport - Bulletin of the V. Lazarian Dnipro National University of Railway Transport*, 1(61), 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983> [in Ukrainian]
9. Petrenko, O., Liubarskiy, B., & Pliugin, V. (2017). Determination of railway rolling stock optimal movement modes. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 6, 27-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
10. Prytula, M.G. & Pasechnykh, O.A. (2019). Optimization traction tasks on the railway network. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk DNUZT im. V. Lazariana. Science and progress in transport - Bulletin of the V. Lazarian Dnipro National University of Railway Transport*, 3(81), 44-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/171774>

11. Palant, O.Iu., & Stamatina, V.V. (2019). Ohliad naiavnykh i perspektyvnykh system avtovedennia poizdiv metropolitenu [Review of existing and promising automatic metro train control systems]. *Problemy ekonomiky - Problems of Economics*, 2(40), 119-125. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2019-2-119-125> [in Ukrainian]
12. Liubarskyi, B.H. (2015). Ratsionalni shvydkisni rezhymy rukhu prymiskoho elektropoizdu z asynkronny-my tiahovymy dvyhunamy [Rational speed modes of suburban electric trains with asynchronous traction motors]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» - Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'*, 18 (1127), 86–92. Kharkiv: NTU «KhPI».
13. Prytula, M. H., & Pasechnykh, O. A. (2018) Development of algorithms for forming energy-optimal train operating modes. Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 6(78), 82–100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641>
14. Coman, F.A., & Meng, L. (2015) Review of Online Dynamic Models and Algorithms for Railway Traffic Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 16(3), 1274-1284 DOI: <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2358392>
15. Gholamian, S.A. (2017) A discrete-event optimization framework for mixed-speed train timetabling problem. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 4(2), 64-84.
16. Sulym, A.A., Sychev, S.D., Raspopin, V.R., Melnyk, A.A., & Fedorov, V.V. (2012). Razrabotka algoritma dlya rascheta puskovoy sily tyagi poezda metropolitena [Development of an algorithm for calculating the starting traction force of a metro train]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reykovy ruhomiy sklad» - Collection of scientific works 'Railboundrolling stock'*, 6, 20–23.
17. Sulym, A.O., Ustenko, O.V., Melnyk, O.O., Lomonos, A.I., Muzhychuk, S.O., & Solovei, V.S. (2021). Protseduira vyboru asynkronnoho tiahovoho elektropryvodu dlia innovatsiinoho rukhomoho skladu metropolitenu [Procedure for selecting an asynchronous traction electric drive for innovative metro rolling stock]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific works of DUIT. Series 'Transport Systems and Technologies'*, 37, 97–118. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-11> [in Ukrainian].

М. О. Багров

Державне підприємство «Український науково–дослідний інститут вагонобудування» вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621, Україна
Телефон: +380536660250, E-mail: office@ukrndiv.com.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3578-4290>

І. В. Гладких

Державне підприємство «Український науково–дослідний інститут вагонобудування» вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621, Україна
Телефон: +380536661036, E-mail: innagladkih59@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

РАДИКАЛЬНІ ДІЇ ЗІ СКАСУВАННЯ НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ – ЧЕРГОВИЙ УДАР ПО ТЕХНІЧНОМУ РЕГУЛЮВАННЮ ГАЛУЗІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Законом України «Про стандартизацію» (стаття 11) визначено, що функції національного органу стандартизації виконує державне підприємство, що не підлягає приватизації, утворене центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері стандартизації.

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 26.11.2014 № 1163-р визначено, що функції національного органу стандартизації виконує Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»).

Національний орган стандартизації відповідає за скасування національних стандартів, погоджує їх, проводить перевірку та переглядає, а також ухвалює рішення про відновлення їх дії. Для цього він взаємодіє з технічними комітетами стандартизації, які можуть надавати роз'яснення щодо стандартів, а в разі їх відсутності – виконує цю функцію сам.

Останнім часом ДП «УкрНДНЦ» проявляє підвищену активність у частині скасування національних стандартів, використовуючи широкий спектр своїх повноважень, безмежну владу, по-своєму трактує цілі та принципи національної стандартизації, ігнорує пропозиції технічних комітетів, грубо порушує законодавство.

Скасування значного обсягу національних стандартів торкається усіх об'єктів стандартизації (продукції, процесів, систем менеджменту, термінології, методів випробувань, правил, вимог і процедур оцінки відповідності тощо). При цьому отримуємо факти порушень: відсутність необхідного обґрунтування; недотримання процедур, встановлених законом; скасування стандартів, які прямо вимагаються спеціальним законодавством (наприклад, у сфері Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту та Технічного регламенту безпеки рухомого складу

© Багров М.О., Гладких І.В., 2025

залізничного транспорту), що призводить до ризику безпеки людей, довкілля або порушення міжнародних зобов'язань.

В умовах воєнного стану, коли вітчизняні виробники продукції залізничного призначення знаходяться на межі виживання, не на часі проводити подібні експерименти зі створення додаткових технічних бар'єрів.

Подолання наслідків одночасного скасування значного обсягу національних стандартів вимагатиме тривалого часу та значних фінансових витрат.

Дана стаття має на меті привернути увагу небайдужого суспільства до процесу знищення національної стандартизації у сфері залізничного транспорту, сприяти зупинці цього процесу.

Ключові слова: стандартизація, національний орган стандартизації, національні стандарти, технічні регламенти, технічні комітети, інтеграція, залізничний транспорт, безпека.

Вступ та постановка проблеми. Система національної стандартизації відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки, надійності та технічної сумісності залізничної інфраструктури та рухомого складу. Вона є основою для гармонізації технічних вимог, координації галузевих процесів, підтримання високого рівня якості продукції та виконання міжнародних зобов'язань України у сфері транспорту. Будь-які дії, що впливають на структуру та чинність національних стандартів, мають здійснюватися виключно у межах чинного законодавства та з урахуванням інтересів безпеки й сталого розвитку галузі.

Законом України «Про стандартизацію» (стаття 11) визначено, що функції національного органу стандартизації виконує державне підприємство, що не підлягає приватизації, утворене центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері стандартизації [1].

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 26.11.2014 № 1163-р [2] визначено, що функції національного органу стандартизації виконує Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості (далі – ДП «УкрНДНЦ»).

Упродовж останнього періоду фіксується тенденція до масового скасування значної кількості національних стандартів, зокрема тих, що належать до категорії 45 «Залізнична техніка». Це викликає занепокоєння фахової спільноти та провідних установ, які безпосередньо працюють із технічним регулюванням та забезпеченням галузевих норм. Скасування значного обсягу національних стандартів у сфері залізничного транспорту без належного аналізу, обґрунтування та залучення профільних технічних комітетів створює суттєві ризики для галузі.

Аналіз останніх досліджень. Останнім часом ДП «УкрНДНЦ» проявляє підвищену активність у частині скасування національних стандартів.

Під гаслом скасування усіх національних стандартів, що суперечать положенням європейських стандартів, прийнятих як національні, на виконання пункту 79 розпорядження Кабінету Міністрів України від 28.03.2025 № 300-р «Про затвердження плану заходів з виконання рекомендацій Європейської Комісії, представлених у Звіті про прогрес України в рамках Пакета розширення Європейського Союзу 2024 року» [3], змішана робоча група з представників національного органу стандартизації, технічних комітетів та колективних членів технічних комітетів стандартизації проводить радикальне знешкодження національних стандартів, не дуже піклуючись про політичні, економічні та інші наслідки цієї діяльності. До речі твердження про те,

що дана робоча група створена за наказом від 27.12.2024 № 350 викликає дуже великий сумнів, тому, що немає підтвердження наявності такого наказу та і немає інформації про будь-яких представників технічних комітетів та колективних членів технічних комітетів стандартизації, які приймають участь в діяльності цієї робочої групи.

З іншої сторони у графі рекомендації Європейської Комісії таблиці ПЛАНУ ЗАХОДІВ, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 28.03.2025 № 300-р, у пункті 79 йдеться про терміново скасування застарілих національних стандартів, які суперечать європейським гармонізованим стандартам [3]. До недавнього часу, це стосувалося стандартів, розроблених до 1992 р. Але зараз невідома «робоча група» розгорнула бурхливу діяльність із безпідставного та безпричинного скорочення кількості «застарілих» національних стандартів 2000-х років. Кому заважали ці стандарти, яким європейським гармонізованим стандартам вони суперечили? Чому це стало відомо тільки зараз? Схоже, що «робоча група» знайшла принципову суперечність у національних стандартах, а саме, що вони розповсюджуються на продукцію залізничного призначення для рейкової колії шириною 1520 мм, на відміну від європейської колії шириною 1435 мм. Проте корисно нагадати таким фахівцям, що в Україні магістральні залізниці мають рейкову колію шириною 1520 мм.

Найбільш «результативним» в цьому напрямку став **серпень 2025 року**.

За серпень 2025 року питанням чинності нормативних документів було присвячено принаймні 149 наказів ДП «УкрНДНЦ», із них, більше ста наказів стосуються безпосередньо скасуванню національних стандартів. При цьому, деякі накази скасовують одночасно велику кількість національних стандартів, тим самим лишають цілі галузі **чинних** нормативних документів. Наприклад, для галузі залізничного транспорту наказом від 29 серпня 2025 р. № 216 [4] скасовуються 97 національних стандартів, більшість з яких входить до переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту, затвердженого наказом МІНІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ від 03.02.2022 № 69 [5], та переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту, затвердженого наказом МІНІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ від 31.01.2022 № 60 [6].

Взагалі, за наказами ДП «УкрНДНЦ» із переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту із 182 національних стандартів скасовується 111, із переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту із 133 національних стандартів скасовується 86.

Була надія, що оцінка відповідності продукції залізничного призначення вимогам Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 30 грудня 2015 р. № 1194 [7], та вимогам Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 11 липня 2013 р. № 494 [8] (з урахуванням змін, унесених постановою Кабінету Міністрів України від 26 січня 2022 р. № 53) [9] нарешті почне своє функціонування з 03.05.2026. Але за результатами руйнівної діяльності національного органу стандартизації з 01.01.2026 система технічного регулювання залізничного транспорту практично припинить своє існування, через відсутність нормативного забезпечення.

У свою чергу зупиняється діяльність органів з оцінки відповідності (ООВ), призначених Міністерством економіки України для виконання як третьою стороною певних завдань з оцінки відповідності, визначених у відповідних технічних регламентах, у зв'язку з тим, що сфера призначення базується на сфері акредитації, а сфера акредитації – на нормативних документах, у тому числі на національних стандартах.

Скасування національних стандартів торкнеться діяльності Державної служби України з безпеки на транспорті (Укртрансбезпеки). Вже декілька років Укртрансбезпека включає до секторального плану державного ринкового нагляду продукцію для інфраструктури та рухомого складу залізничного транспорту, посиляючись на чинні технічні регламенти, які пов'язані безпосередньо з національними стандартами.

Крім того, стануть не легітимними, та потребують внесення змін процедури постановки продукції на виробництво, присвоєння умовних номерів підприємствам-виробникам продукції для потреб залізничного транспорту, процедури інспекційного контролю, усі технічні, конструкторські та технологічні документи, у яких є посилання на скасовані національні стандарти.

На даний час орган з сертифікації продукції вагонобудування ОС ПВ ДП «УкрНДІВ» отримує безліч звернень від своїх клієнтів з проханням дати пояснення про чинність сертифікатів відповідності, виданих на підставі вимог національних стандартів, що підлягають скасуванню на підставі наказів національного органу стандартизації ДП «УкрНДНЦ».

ОС ПВ ДП «УкрНДІВ» не має підстав та наміру до скасування чинності вже виданих сертифікатів відповідності. Але як буде розглядати споживач продукції чинні сертифікати, видані на підставі вимог національних стандартів після їх скасування?

Вже зараз АТ «Укрзалізниця» має практику, для уникнення непорозумінь з чинністю нормативних документів, у вимогах тендерної документації вказувати усі необхідні показники продукції без посилання на будь-які нормативні документи. Але такий підхід є вимушеним, не сприяє установленню положень для загального та неодноразового використання щодо наявних чи потенційних завдань, спрямованих на досягнення оптимального ступеня в певній сфері, ставить під сумнів необхідність стандартизації взагалі.

Скасування значного обсягу національних стандартів торкається усіх об'єктів стандартизації (продукції, процесів, систем менеджменту, термінології, методів випробувань, правил, вимог і процедур оцінки відповідності тощо).

В умовах воєнного стану, коли вітчизняні виробники продукції залізничного призначення знаходяться на межі виживання, не на часі проводити подібні експерименти зі створення додаткових технічних бар'єрів.

Подолання наслідків одночасного скасування значного обсягу національних стандартів вимагатиме тривалого часу та значних фінансових витрат.

Достатньо зауважити, що наприклад, для Національного агентства з акредитації України (НААУ) внесення змін до сфери акредитації органа з оцінки відповідності (ООВ) може займати до 120 робочих днів, що на практиці становить 6-9 місяців.

Також слід додати, що всупереч, встановленим у частині п'ятій статті 21 Закону України «Про стандартизацію», нормам щодо скасування національних стандартів, а саме: «5. У разі якщо технічний комітет стандартизації погоджує пропозиції щодо скасування національних стандартів та кодексів усталеної практики, національний орган стандартизації приймає рішення із зазначеного питання», ДП «УкрНДНЦ» було прийнято рішення про скасування національних стандартів, що стосуються

залізничного транспорту за відсутності відповідного погодження від профільного технічного комітету у сфері залізничного транспорту «Вагони» (далі – ТК 83).

ТК 83 листом від 17.02.2025 № 09-02/9-121 до ДП «УкрНДНЦ» було направлено Протокол засідання ТК 83 від 17.02.2025 № 1, в якому висловлено загальну думку членів технічного комітету «Вагони»:

1. Для чіткого розуміння і можливості проведення аналізу вимог європейських стандартів та суперечливих моментів з прийнятими національними стандартами, вважаємо за необхідне надати технічним комітетам доступ, як мінімум до електронних версій чи паперових копій, як європейських так і національних стандартів.

2. Скасування НД, які стосуються більшості видів продукції для залізничного транспорту призведе до колапсу залізничної галузі України, і не може бути допущено без вирішення комплексу питань щодо інтеграції транспортної системи України до ЄС та потребує тривалого перехідного періоду.

3. Винести на публічне обговорення всіма зацікавленими сторонами, а не тільки технічними комітетами стандартизації, переліки національних стандартів, запропонованих до скасування, які віднесено до інших сфер діяльності, з урахуванням розділу 11 ДСТУ 1.2:2024 «Національна стандартизація. Правила проведення робіт з національної стандартизації» [10].

За результатами публічного обговорення розробити план-графік перегляду та розроблення змін до національних стандартів з визначенням джерел фінансування за кошти заінтересованих сторін.

Прийняте ДП «УкрНДНЦ» рішення стосовно скасування національних стандартів зокрема й тих, що стосуються залізничного транспорту, оформлено відповідними наказами національного органу стандартизації, більша частина яких датована 29 серпня 2025 р. Але всупереч частині шостої статті 21 Закону України «Про стандартизацію» щодо надання інформації «про прийняті і скасовані протягом календарного місяця національні стандарти, кодекси усталеної практики, зміни до них та ті з них, дію яких відновлено, розміщується **не пізніше п'яти робочих днів з дня завершення звітнього місяця на офіційному веб-сайті**» оприлюднення цих наказів було здійснено у термін, що перевищує п'ять робочих днів, починаючи з 30 вересня 2025 року.

Також, ДП «УкрНДНЦ» було направлено Протокол засідання ТК 83 від 14.11.2025 № 3 щодо рішення колективних членів технічного комітету, отримане за результатами голосування стосовно скасування національних стандартів, а саме:

1. Скасування національних стандартів, що застосовуються у галузі залізничного транспорту, не має під собою об'єктивних підстав та є таким, що ставить під загрозу функціонування вітчизняного залізничного транспорту, який є стратегічним об'єктом для економіки України, його функціональну безпеку та безпеку країни в цілому.

2. Фінансування розроблення національних стандартів, що замінять застарілі та суперечливі європейським гармонізованим стандартам, має бути здійснено на державному рівні з урахуванням офіційно встановлених критеріїв суперечливості вимог.

3. Залишити чинними національні стандарти, які стосуються залізничного транспорту, для внутрішнього використання цих стандартів з метою забезпечення безпечного функціонування системи залізничного транспорту України.

Позицію ТК-83 підтримують АТ «Укрзалізниця», виробничі підприємства вагонобудівної галузі, орган з сертифікації продукції вагонобудування

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ОС ПВ ДП «УкрНДІВ», але ДП «УкрНДНЦ» в черговий раз проігнорувало пропозиції профільного технічного комітету.

ТК-83 та ОС ПВ ДП «УкрНДІВ» звернулися до Міністерства економіки, довілля та сільського господарства України та Міністерства розвитку громад та територій України з проханням зупинити процес руйнування системи національної стандартизації у сфері залізничного транспорту. Очікуємо офіційної реакції відповідних органів.

Висновки.

1. Процес масового скасування національних стандартів у сфері залізничного транспорту створює ризики для цілісності та стабільності системи національної стандартизації, що може негативно вплинути на безпеку, технічну сумісність та регуляторну визначеність у галузі.

2. Існує необхідність невідкладного втручання центральних органів виконавчої влади, зокрема Міністерства економіки, довілля та сільського господарства України та Міністерства розвитку громад та територій України, з метою запобігання подальшому руйнуванню системи галузевої стандартизації.

3. Доцільним є надання відповідних доручень ДП «УкрНДНЦ» щодо:

- відтермінування скасування національних стандартів категорії 45 «Залізнична техніка», зокрема шляхом виключення їх із переліків застарілих стандартів, що нібито суперечать європейським гармонізованим документам, до завершення всебічного технічного аналізу;

- створення змішаної робочої групи за участю фахівців ДП «УкрНДНЦ», профільних технічних комітетів та їх колективних членів для повторного перегляду національних стандартів залізничного призначення та ухвалення виважених рішень щодо їх чинності чи скасування з обов'язковим установленням перехідного періоду.

4. Запропоновані заходи спрямовані на забезпечення прозорості, фаховості та послідовності державної політики у сфері стандартизації, а також на узгодження національних вимог із європейськими практиками без втрати галузевої спадщини та технічної спадковості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про стандартизацію: Закон України від 05 червня 2014 р. № 1315-VII // База даних «Законодавство України» ВР України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1315-18#Text>

2. Про визначення державного підприємства, яке виконує функції національного органу стандартизації: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 26 листопада 2014 р. № 1163-р // База даних «Законодавство України» ВР України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1163-2014-%D1%80#Text>

3. Про затвердження плану заходів з виконання рекомендацій Європейської Комісії, представлених у Звіті про прогрес України в рамках Пакета розширення Європейського Союзу 2024 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 28 березня 2025 р. № 300-р // База даних «Законодавство України» ВР України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/300-2025-%D1%80#Text>

4. Про скасування міждержавних стандартів: Наказ Національного органу стандартизації ДП «УкрНДНЦ» // Головна. Накази щодо чинності НД. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://csm.kiev.ua/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=38&Itemid=89&lang=uk

5. Про затвердження Переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту: Наказ Міністерства інфраструктури України

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

від 03.02.2022 № 69 // База даних «Законодавство України» ВР України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0069733-22#Text>

6. Про затвердження Переліку національних стандартів для цілей застосування Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту: НАКАЗ Міністерства інфраструктури України від 31 січня 2022 р. № 60 // База даних Міністерства інфраструктури України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/documents/2146>

7. Про затвердження Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту: Постанова Кабінету Міністрів України від 30 грудня 2015 р. № 1194. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1194-2015-%D0%BF#Text>

8. Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту: Постанова Кабінету Міністрів України від 11 липня 2013 р. № 494. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-%D0%BF#Text>

9. Про внесення змін до Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту і Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту: Постанова Кабінету Міністрів України від 26 січня 2022 р. № 53. База даних Міністерства інфраструктури України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/53-2022-%D0%BF#Text>

10. ДСТУ 1.2:2024 «Національна стандартизація. Правила проведення робіт з національної стандартизації» [Чинний від 2024-09-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024. 43 с. (Національні стандарти України)

M. O. Bahrov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»

33 I. Prykhodka Street, Kremenchuk, Poltava Region, 39621, Ukraine

Tel.: +380536660250, E-mail: office@ukrndiv.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3578-4290>

I. V. Hladkykh

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine

Tel.: +380631715009, E-mail: innagladkih59@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

DECISIVE ACTIONS TO CANCEL NATIONAL STANDARDS: ANOTHER BLOW TO THE TECHNICAL REGULATION OF THE RAILWAY TRANSPORT SECTOR

According to Article 11 of the Law of Ukraine «On Standardization», the functions of the national standardization body are performed by a state-owned enterprise that cannot be privatized and is established by the central executive authority responsible for implementing state policy in the field of standardization.

By Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1163-r of November 26, 2014, the State Enterprise «Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality» (SE «UkrNDNTs») was designated as the national standardization body.

The national standardization body is responsible for cancelling national standards, approving, examining and reviewing them, as well as taking decisions on reinstating their validity. To do this, it interacts with standardization technical committees, which may provide clarifications regarding standards; in the absence of such committees, the national standardization body performs this function independently.

Recently, SE «UkrNDNTs» has demonstrated increased activity in cancelling national standards, using the broad scope of its powers, exercising virtually unlimited authority, interpreting the goals and principles of national standardization at its own discretion, ignoring the proposals of technical committees, and grossly violating legislation.

The cancellation of a significant number of national standards affects all objects of standardization (products, processes, management systems, terminology, test methods, rules, requirements, and conformity assessment procedures, etc.). At the same time, numerous violations are observed, including: lack of necessary justification; failure to comply with legally established procedures; cancellation of standards that are directly required by special legislation (for example, in the field of the Technical Regulation on Railway Infrastructure Safety and the Technical Regulation on Railway Rolling Stock Safety), which creates risks to human safety, the environment, and compliance with international obligations.

During wartime, when domestic manufacturers of railway-related products are struggling to survive, such experiments that create additional technical barriers are ill-timed and harmful.

Eliminating the consequences of the simultaneous cancellation of a large volume of national standards will require significant time and financial resources.

This article aims to draw the attention of concerned community to the ongoing destruction of national standardization in the railway transport sector and to contribute to stopping this process.

Keywords: *standardisation, national standardisation body, national standards, technical regulations, technical committees, integration, railway transport, safety.*

REFERENCES

1. Zakon Ukrainy Pro standartyzatsiiu vid 05 chervnia 2014 roku № 1315-VII [Law of Ukraine On Standardization of June 5, 2014 № 1315-VII]. (2014). Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» Verkhovnoi Rady Ukrainy [Database ‘Legislation of Ukraine’ of Verkhovna Rada of Ukraine]. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1315-18#Text> [in Ukrainian].
2. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro vyznachennia derzhavnoho pidpriemstva, yake vykonuie funktsii natsionalnoho orhanu standartyzatsii vid 26 lystopada 2014 roku № 1163-r [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine On Defining the State Enterprise Performing the Functions of the National Standardization Body from November 26, 2014]. (2014). Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» Verkhovnoi Rady Ukrainy [Database ‘Legislation of Ukraine’ of Verkhovna Rada of Ukraine]. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1163-2014-%D1%80#Text> [in Ukrainian].
3. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia planu zakhodiv z vykonannia rekomendatsii Yevropeiskoi Komisii: vid 28 bereznia 2025 roku № 300-p. [Order on Approval of the Action Plan for Implementing the European Commission’s Recommendations from March 28, 2025]. (2025). Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» Verkhovnoi Rady Ukrainy - Database ‘Legislation of Ukraine’ of Verkhovna Rada of Ukraine. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/300-2025-%D1%80#Text> [in Ukrainian].
4. Nakaz Natsionalnoho orhanu standartyzatsii SE «UkrNDNTs» Pro skasuvannia mizhderzhavnykh standartiv: [Order of the National Standardisation Body SE ‘UkrNDNTs’ On Cancellation of Interstate Standards]. (n.d.) Nakazy shchodo chynnosti ND - Orders regarding the validity of ND. *csm.kiev.ua*. Retrieved from: https://csm.kiev.ua/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=38&Itemid=89&lang=uk [in Ukrainian].
5. Nakaz Ministerstva infrastruktury Ukrainy Pro zatverdzhennia Pereliku natsionalnykh standartiv vid 3 liutoho 2022 roku № 69 [Order of the Ministry of Infrastructure of Ukraine on Approval of the List of National Standards for the Railway Infrastructure Safety Technical Regulation from February 3, 2002]. (2022). Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» Verkhovnoi Rady Ukrainy - Database ‘Legislation of Ukraine’ of

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Verkhovna Rada of Ukraine. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0069733-22#Text> [in Ukrainian]

6. Nakaz Ministerstva infrastruktury Ukrainy Pro zatverdzhennia Pereliku natsionalnykh standartiv vid 31 sichnia 2022 roku № 60 [Order of the Ministry of Infrastructure of Ukraine On Approval of the List of National Standards for Rolling Stock Safety Technical Regulation from January 31, 2022]. (2022). Baza danykh Ministerstva infrastruktury Ukrainy - Database of the Ministry of Infrastructure of Ukraine. *mtu.gov.ua*. Retrieved from: <https://mtu.gov.ua/documents/2146> [in Ukrainian]

7. Postanova Kabinet Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlementu bezpeky rukhomogo skladu zaliznychnoho transportu: vid 30 hrudnia 2015 roku № 1194 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on Technical Regulation on Railway Rolling Stock Safety from December 30, 2015]. (2015). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1194-2015-%D0%BF#Text> [in Ukrainian]

8. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlementu bezpeky infrastruktury zaliznychnoho transportu: vid 11 lypnia 2013 roku № 494 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on Technical Regulation on Railway Infrastructure Safety from July 11, 2013]. (2013). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-%D0%BF#Text> [in Ukrainian]

9. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro vnesennia zmin do Tekhnichnykh rehlementiv: vid 26 sichnia 2022 roku № 53 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on Amendments to Railway Safety Technical Regulations from January 26, 2022]. (2022). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/53-2022-%D0%BF#Text> [in Ukrainian]

10. Natsionalna standartyzatsiia. Pravylo provedennia robit z natsionalnoi standartyzatsiio [National Standardization. Rules for Conducting National Standardization Work]. (2024). *DSTU 1.2:2024 from 1st September 2024*. Kyiv: SE «UkrNDNTs» [in Ukrainian].

Ж. О. Семко

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380536660250, E-mail: shaganne@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0047-8509>

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

В умовах постійного розвитку технічного прогресу з урахуванням досягнення нових та вдосконалення існуючих технічних рішень задля підвищення будь-яких (функціональних, екологічних, технічних, якісних) показників продукції (товарів, матеріалів, речовин, засобів тощо) все актуальнішим стає питання кінцевої вартості використання певної продукції. Варто визнати, що наряду із загальновідомим підходом до найвищої якості використовуваної продукції серед обраних моделей (типів, видів) головним стає економічний фактор: менші витрати на виробництво – менша собівартість, менша ціна – висока конкурентоспроможність, отже більші високі доходи. При цьому, не варто списувати з рахунку вартість забезпечення показників ремонтпридатності, надійності та безпеки продукції, а також вартість таких стадій життєвого циклу, як експлуатація (утримання у роботоздатному стані за допомогою системи технічного обслуговування та ремонту) та модернізація (вдосконалення конструктивних, функціональних та експлуатаційних показників) продукції, зокрема й залізничного рухомого складу.

Також не викликає сумнівів той факт, що на кінцевий результат вартості життєвого циклу впливає вартість процесів створення, введення в експлуатацію, експлуатації, обслуговування та ремонту, а також утилізації рухомого складу.

Дослідженнями встановлено, що стадії розробки, виробництва та експлуатації – є найбільш витратними стадіями життєвого циклу залізничного рухомого складу. Але слід визначити наскільки вагомі основні економічні критерії, що застосовні під час проведення оцінки вартості життєвого циклу взагалі та кожної його стадії зокрема; наскільки серйозні фактори впливу залежно від виду рухомого складу, наскільки впливові технічні характеристики на сумарні витрати життєвого циклу певного об'єкту залізничного рухомого складу; які чинники можуть вплинути на досягнення конкретного рівня вартості життєвого циклу з метою забезпечення конкурентоспроможності.

Ключові слова: рухомий склад, вартість життєвого циклу, технічний рівень, стадії життєвого циклу, сумарні витрати, конкурентоспроможність.

© Семко Ж. О., 2025

Вступ

Відомим способом створення потенційно розвиненого виробництва із стабільними показниками якості продукції, на думку багатьох фахівців з економіки, є здорова конкуренція. При цьому, важливу роль у досягненні високого рівня конкурентоспроможності відіграє не тільки й не стільки сама продукція з високими технічними якостями, які в ідеальному випадку перевищують сучасні, але саме та продукція, що за найнижчими показниками своєї собівартості, є найбільш привабливою.

Досягнення гармонійного поєднання високих технічних якостей (що взагалі потребує значних матеріальних витрат) та низьких показників собівартості (що стає протилежною вимогою) є дуже не простою задачею. Але використання правильного, економічно обґрунтованого, підходу до визначення рівня технічних якостей продукції, який треба досягнути; визначення вагомих факторів, що впливають на якість, або ефективність, або інноваційність; створення цінової політики з урахуванням існуючих ризиків, надасть виробнику значні переваги перед конкурентами. Усі перелічені вище заходи є складовими процесу оцінки (розрахунку) вартості життєвого циклу продукції.

З урахуванням визначених у розділі 4 ДСТУ ГОСТ 31538 [1] стадій життєвого циклу залізничного рухомого складу (визначення вихідних вимог; розробка залізничного рухомого складу; виробництво; експлуатація; модернізація; утилізація) можна стверджувати, що фактори, які впливають на вартість життєвого циклу залізничного рухомого складу (далі – ЗРС) не тільки різноманітні, але й можуть бути дуже специфічними для окремої стадії, або, навпаки, загальними для всього життєвого циклу.

Зважаючи на велику кількість впливових факторів аналіз у цій роботі буде присвячено одній із найскладніших з точки зору визначення впливу стадії – «визначення вихідних вимог».

Ця стадія містить зокрема такі види робіт:

- маркетингові дослідження замовника і підрядника (постачальника) залізничного рухомого складу;
- формування вихідних технічних вимог до ЗРС, проведення конкурсу (тендера) серед підрядників (постачальників) на розробку та (або) виготовлення ЗРС;
- початкове прогнозування вартості життєвого циклу ЗРС та розробки основних положень проекту договору на створення ЗРС.

Результатом робіт, проведених на цій стадії, є визначення можливості й доцільності створення ЗРС за споживчими та комерційними параметрами, розробка і затвердження технічних вимог до конкретного типу (серії) ЗРС, вибір підрядника (постачальника) ЗРС.

Під час маркетингових досліджень насамперед слід визначити такі періоди життєвого циклу розроблюваного нового рухомого складу, які є критичними з точки зору досягнення поставленої мети. Іншими словами визначити залежність «технічні якості (вагомні фактори)» - вартість впровадження».

Якщо, як вагомий фактор, обрати показник інноваційності^{*)}, то слід зазначити її ключові аспекти:

^{*)} Інновація — це впроваджене нововведення, яке забезпечує якісний ріст ефективності процесів або продукції та має потребу на ринку. Це може бути новий або удосконалений продукт, технологія, метод організації праці або управління, який оснований на використанні досягнень науки і передового досвіду. Інновація перетворюється із простого винаходу (новації) в реальне нововведення з моменту його успішного впровадження й розповсюдження.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

новизна – інновація включає у себе впровадження чогось нового, будь-то продукт, процес, метод, організаційна форма або новий ринок збуту;

практичне застосування – це не просто ідея, не просто існує у вигляді наукового відкриття або винаходу, а впроваджене нововведення, яке використовується в реальній діяльності;

ефективність – інновація, яка направлена на підвищення ефективності, економічності, якості і задоволеності споживачів;

затребуваність – нововведення, яке має бути обов'язково затребуваним на ринку або суспільством;

результат діяльності – це кінцевий результат інноваційної діяльності, який може принести економічний, соціальний або інший корисний ефект.

Отже, якість маркетингових досліджень, отримання об'єктивних даних щодо інноваційності продукції, її затребуваності для споживачів, її дійсної очікуваної ефективності, вагома складова оцінки вартості життєвого циклу.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми

Значну частину робіт, присвячених розрахунку вартості життєвого циклу ЗРТ наведено у [2], які містять, зокрема:

- результати щодо проведеного дослідження та аналіз структури економіко-технологічних станів пасажирських вагонів за фактичними даними АТ «Укрзалізниця»;

- висновки щодо доцільності використання представленої моделі оцінки показників надійності на етапах життєвого циклу, яка дозволяє оптимізувати міжремонтний термін і кількість ремонтів впродовж життєвого циклу певної моделі вантажного вагона;

- дослідження випадку переходу до системи технічного обслуговування та ремонту за технічним станом із застосуванням індикаторних засобів контролю граничних станів вузлів значення міжремонтного ресурсу;

- висновки, що на вартість першої стадії життєвого циклу (цикл створення та випробування) рухомого складу будуть впливати такі фактори, як кількість часу на проектування, виконання розрахунків, проведення випробувань та оптимізацію конструкції; матеріальні витрати на виготовлення прототипів і стендів для випробувань, обладнання, інструментів; кількість випробувань та їх обсяг.

На даний час набула поширення Примірною методика визначення вартості життєвого циклу [3], розроблена відповідно до нової редакції Закону України Про публічні закупівлі [4] (стаття 29), якою передбачено, що тендерна пропозиція може оцінюватись за вартістю життєвого циклу.

Цей підхід на відміну від критерію «ціна» дозволяє врахувати витрати замовника, які він несе під час використання, обслуговування та припинення використання предмета закупівлі та обрати більш економічну пропозицію. Застосовуючи критерії оцінки вартості життєвого циклу, замовник може вимагати від постачальника даних про витрати, які пов'язані з:

- 1) використанням енергії та інших ресурсів необхідних для застосування приладу, обладнання або іншого енергоспоживчого продукту, надання послуги чи виконання робіт;
- 2) технічним обслуговуванням;
- 3) збором та утилізацією;

4) впливом зовнішніх екологічних чинників протягом життєвого циклу, зокрема викиди парникових газів, інших забруднюючих речовин та інші витрати, пов'язані з впливом на довкілля.

Тобто, оцінюючи переваги того чи іншого товару за вартістю його життєвого циклу, порівнюють не тільки ціну цього товару, а й сукупність усіх витрат, які матимуть місце впродовж строку його експлуатації.

Також розроблений інтерактивний калькулятор розрахунку вартості життєвого циклу товару, який значно спрощує опанування та використання методики оцінки вартості життєвого циклу. Це дружня до користувача математична модель, в яку вже закладена формула розрахунку. Користувач може застосувати його як практичний інструмент розрахунку, вводячи дані щодо предмету закупівлі, обираючи необхідну категорію. За введеними даними користувач отримає правильний розрахунок, який дозволить порівняти надані пропозиції та обрати більш економічну пропозицію.

Але, при цьому слід зазначити, що застосування цього калькулятора передбачено лише для таких категорій продукції, як: холодильні шафи професійні, духові шафи побутові, принтери, ноутбуки, автотранспорт, інші пристрої.

Отже, задача полягає в тому, що для визначення вартості життєвого циклу залізничного рухомого складу слід обрати такі критерії, при застосуванні яких під час розрахунку вартості життєвого циклу буде отримано найбільш об'єктивні результати.

Мета статті

Мета статті – проаналізувати існуючі показники, фактори та умови, що стосуються рухомого складу залізничного транспорту та які впливають на критерії визначення вартості життєвого циклу. Надати примірний перелік впливових факторів та визначити критерії для отримання попередніх результатів щодо їх впливу на вартість життєвого циклу.

Матеріали та методи дослідження

Типові процеси, які виконуються на стадіях життєвого циклу залізничного рухомого складу наведено у розділах 4 та 5 ДСТУ ГОСТ 31538 [1].

При цьому слід зазначити, що згідно з 4.2 [1] відповідність процесів життєвого циклу залізничного рухомого складу встановленим вимогам має бути забезпечено за рахунок:

- створення інтегрованого інформаційного середовища та інформаційної підтримки життєвого циклу залізничного рухомого складу під час проектування, виробництва і технічного супроводу в експлуатації;
- використання макетних і дослідних зразків залізничного рухомого складу та їх складових частин під час контролю і підтвердження прийнятих конструкторсько-технологічних рішень, необхідних для реалізації заданих вимог до створюваного або модернізованого залізничного рухомого складу, а також для підтвердження відповідності залізничного рухомого складу затвердженій документації на різних стадіях життєвого циклу;
- формування каталогу параметрів, що підлягають контролю під час випробувань, та методів контролю для отримання об'єктивної і достовірної оцінки стану обладнання залізничного рухомого складу;
- організації і проведення випробувань згідно з вимогами відповідних програм та методик;
- підтвердження обов'язкових вимог щодо норм безпеки, які регламентовані нормативними документами в області оцінки відповідності залізничної техніки;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- визначення показників надійності залізничного рухомого складу та гарантійних обов'язків виробника;
- здійснення правил переходу від виконаної роботи одного виду на будь-якій стадії життєвого циклу до виконання наступного виду робіт на даній стадії, а також правил переходу від однієї стадії до наступної;
- системної організації поствиробничих процесів життєвого циклу залізничного рухомого складу на основі інтегрованої логістичної підтримки;
- функціонування систем менеджменту якості на підприємствах постачальника і підприємствах (підрозділах) замовника;
- регламентації показників безвідмовності, довговічності, збережуваності, ремонтпридатності й гарантійних строків зберігання запасних частин залізничного рухомого складу;
- якісної реалізації системи технічного обслуговування та ремонту залізничного рухомого складу;
- встановлення раціональних значень параметрів технічного стану залізничного рухомого складу після ремонту;
- підвищення кваліфікації персоналу, що виконує роботи на всіх стадіях життєвого циклу залізничного рухомого складу;
- впровадження прогресивних, екологічно безпечних, ресурсо-енергозберігаючих технологій.

Ряд досліджень присвячений удосконаленню методології визначення життєвого циклу та його вартості. Так, щодо тягового рухомого складу ці питання детально висвітлені в роботах Калабухіна Ю.Є., Тартаковського Е. Д., Рудковського О.В., Фалендиша А. П. та ін. [7–10].

Під час розрахунку вартості життєвого циклу відповідно до [5] зокрема можна взяти до уваги такі складові витрат, але не обмежуючись цим:

- витрати на придбання: наприклад, вартість придбання або витрати на оренду/лізинг;
- транспортні витрати (якщо вони не були включені у вартість придбання);
- витрати на встановлення, монтаж, введення в експлуатацію;
- витрати на експлуатацію: сюди входять, зокрема: витрати на енергоносії; на навчання; на технічне обслуговування; на ремонт (запасні частини, робочий час, вартість необхідних інструментів та/або обладнання та супутніх матеріалів); податки; страхування;

Примітка. Витрати на технічне обслуговування залежать від періодичності обслуговування, яка має бути зазначена у інструкції з експлуатації.

- обсяг споживання палива/електроенергії (має бути однозначно вказано умови експлуатації для розрахунку витрат) – річний (або питомий) обсяг витрат на придбання палива/електроенергії;
- вартість постачання палива/електроенергії – річні витрати на закупівлю, постачання та зберігання палива/електроенергії;
- витрати на користування – витрати на оплату праці персоналу (для тягового рухомого складу – персонал локомотивної бригади) в рік включно з навчанням;
- витрати на утилізацію: транспортування до компанії з утилізації відходів, вартість переробки та утилізації відходів;
- витрати на мінімізацію впливу на навколишнє середовище - екологічні податки та збори (якщо застосовано). Витрати, віднесені до зовнішніх екологічних чинників, пов'язаних з продуктом, послугами або роботами протягом життєвого циклу, за умови, що їхня грошова вартість може бути визначена і підтверджена.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Такі витрати можуть включати витрати на викиди парникових газів, викиди інших забруднюючих речовин та інші витрати, пов'язані із зменшенням впливу на навколишнє середовище тощо;

- залишкова вартість – визначена майбутня вартість шляхом дисконтування, за умови дотримання вимог з експлуатації.

Примітка. Залишкова вартість: дохід від можливого майбутнього продажу товару після закінчення періоду використання та вартість об'єкта після закінчення строку корисного використання, що включаються до розрахунку витрат життєвого циклу у разі, якщо товар ще можна використовувати й надалі.

До вище наведених теоретичних положень слід додати висновки, наведені у [6] (у скороченому викладанні) стосовно порівняння витрат енергоносіїв та визначення ефективності застосування електричної або теплової тяги, отримані на підставі практичного використання теплової та електричної тяги для ведення вантажних поїздів:

«По-перше, витрати енергоносія залежать не тільки від якостей машини, але й від умов її експлуатації.

Порівнюючи тепловози та електровози, що працюють на різних ділянках залізничної колії, на різних лініях, з поїздами різної ваги та різним осьовим навантаженням, при різній організації роботи і різному стану як рухомого складу, так і стану колії встановлено; що для однакових тепловозів (2ТЭ10Л) на одній й тій самій ділянці колії у разі зміни ваги поїзда від 1500 т до 3500 т витрати палива на одиницю роботи змінюються від $24 \text{ кг}/10^4 \text{ т*км}$ до $48 \text{ кг}/10^4 \text{ т*км}$. Однакові електровози (ВЛ80Т) під час виконання вантажних робіт в середньому витратили на Львівській дорозі $150 \text{ кВт*год}/10^4 \text{ т*кмбр}$, на Південно-Західній – $100 \text{ кВт*год}/10^4 \text{ т*кмбр}$.

Це означає, що на Львівській дорозі краще використовувати теплотягу, а на Південно-Західній – електротягу.

По-друге, при перерахунку витрат електроенергії в умовне паливо приймають, що енергію для електротяги отримують з питомою витратою палива $0,325 \text{ кг у.п.}/(\text{кВт*год})$, що відповідає ККД 37,8 %. Але насправді ККД теплових електростанцій $\eta_{\text{ЕС}}$ в найкращому випадку складає (33 – 35) %. Крім того мають місце втрати електроенергії в різних системах електропостачання для електротяги. Як мінімум треба враховувати втрати на підвищуючих підстанціях (ПП), в лініях електропередачі (Л), на тягових підстанціях (ТП). Середні показники КПД для:

- підвищуючих підстанцій $\eta_{\text{ПП}} = 0,97$
- ліній електропередачі $\eta_{\text{Л}} = 0,96$
- тягових підстанцій $\eta_{\text{ТП}} = 0,91$

З урахуванням $\eta_{\text{ЕС}}=0,34$, отримаємо дійсний ККД для вироблення електроенергії для електротяги $\eta_{\text{СЕ}} = 0,288$, що відповідає питомій витраті умовного палива $b_{\text{СЕ}} = 0,427 \text{ кг у.п.}/(\text{кВт*год})$ замість $0,325 \text{ кг у.п.}/(\text{кВт*год})$ ».

Як видно із таблиці 2 [6], з урахуванням тарифів на електроенергію 2002, 2003, 2004 р. р. (0,1355; 0,1481; 0,163 грн/(кВт*год) відповідно) та отриманих результатів (величини $З_{\text{е}}$ та $З_{\text{п}}$ в табл. 2) витрати на паливо у грошовому визначенні в 3,6 – 4,2 рази більше витрат на електроенергію.

Але така перевага зовсім не підтверджує перевагу використання електротяги перед використанням теплотяги, тобто в цьому не має заслуги електровозів або вини тепловозів, оскільки все це визначається дійсними цінами на енергоносії. В даному випадку важливі не стільки ціни, як їх співвідношення, щодо якого стосовно різноманітних енергоносіїв за останні роки має місце диспропорція. Наявність цієї

диспропорції тим помітніше, якщо визначити вартість одиниці енергії у гривнях за 1 Гкал, при цьому за даними таблиці 3 [6] звертає на себе увагу низька вартість природного газу».

Примітка. Використання природного газу, як енергоносія для залізничного рухомого складу є предметом іншого дослідження.

Якщо виходити із сьогоденних реалій, то за розглянутими вище показниками (витрати енергоносіїв та витрати на самі енергоносії) електротяга в зрівнянні з теплотягою значно виграє. Але, при цьому, ці показники розраховані без врахування основних капіталовкладень на електрифікацію залізниць, які складаються зокрема із витрат на виготовлення опор для контактної мережі та їх встановлення, на дроти самої контактної мережі та на спорудження тягових підстанцій. Розрахунки, в основу яких покладені сумарні витрати, що враховують і капіталовкладення, і експлуатаційні витрати, і витрати у суміжні галузі мають бути додані до визначення вартості життєвого циклу.

Також, для визначення вартості життєвого циклу рухомого складу слід враховувати умови, за яких він використовується. За цих умов до основних впливових факторів для розрахунків додаються: вантажонапруженість лінії, обсяг вантажоперевезень, довжина та важкість профілю ділянок шляху. Ці фактори, у разі їхнього застосування, можуть значно вплинути на кінцевий результат, оскільки кількість різноманітних варіантів їхнього поєднання дуже велика.

Отже, підсумовуючи вище наведене можна констатувати, що для визначення вартості життєвого циклу залізничного рухомого складу слід враховувати:

- витрати на придбання;
- витрати на капіталовкладення, пов'язані із належним використанням продукції (наприклад, на електрифікацію у разі застосування електротяги на дільницях, де електропостачання не має та/або на утримання колії в належному стані);
- витрати на встановлення, монтаж, введення в експлуатацію;
- витрати на експлуатацію, в тому числі на технічне обслуговування та ремонт;
- витрати на навчання персоналу для підтримання відповідної кваліфікації та на навчання у разі застосування інноваційних технологій;
- витрати на постачання та придбання палива/електроенергії з урахуванням дійсних цін на енергоносії;
- витрати на користування, в тому числі витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу;
- витрати на утилізацію: транспортування до компанії з утилізації відходів, вартість переробки та утилізації відходів;
- витрати щодо мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Якщо до цього переліку витрат додати специфічні умови, які засновані на технічних впливових факторах:

- вага поїзда у конкретному випадку;
- тип тягового рухомого складу (тепло- або електротяга);
- осьове навантаження;
- умови організації роботи;
- стан рухомого складу, стан колії;
- вантажонапруженість лінії;
- обсяг вантажоперевезень;
- довжина та важкість профілю залізничної колії

стає зрозумілим, що від правильного вибору впливових факторів залежить достовірність та об'єктивність отриманого результату.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Але це далеко не повний перелік впливових факторів, які слід враховувати під час визначення вартості життєвого циклу та визначати у кожному окремому випадку індивідуально.

Таким чином, підсумовуючи вище наведене, можна вартість життєвого циклу привести до формули (1) за [3]:

$$Ц_{жц} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_n \quad (1)$$

де B_1 – вартість витрат, пов'язаних із придбанням;

B_2 – вартість витрат, пов'язаних з користуванням за призначенням;

B_3 – вартість витрат, пов'язаних з обслуговуванням;

B_4 – вартість витрат, пов'язаних із завершенням користування (утилізацією);

B_5 – вартість витрат, пов'язаних із захистом навколишнього середовища;

B_n – вартість інших витрат, що доречні.

При цьому, слід додати, що за [5] у тих випадках, коли строк служби одиниці рухомого складу достатньо значний, можна розрахувати майбутню вартість, провівши її дисконтування на строк життєвого циклу. Це дозволить більш точно розрахувати загальні майбутні витрати замовника і зменшити їх в довгостроковому періоді.

Придбання товарів, у яких менша не ціна придбання, а вартість життєвого циклу, дозволяє заощаджувати гроші у довгостроковій перспективі.

Також слід зауважити, що не останнім фактором у процесі прийняття рішення щодо придбання нової (або ремонту чи модернізації існуючої) залізничної техніки є обчислений за загальною формулою сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект (E_t), який з огляду на приведену вище інформацію набуває нового поліпшеного значення.

Сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект (E_t) визначають, як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів, що очікуються від застосування певних заходів (наприклад, придбання нових електровозів з прогнозованим підвищенням продуктивності перевізного процесу) за розрахунковий період (P_t) над вартісною оцінкою сукупних витрат (B_t) на здійснення заходів, щодо повноцінного використання продукції за призначенням за розрахунковий період за формулою (2) за [3]:

$$E_t = P_t - B_t, \quad (2)$$

Під час розрахунку економічного ефекту проводиться обов'язкове приведення різночасових витрат і результатів до єдиного, для всіх варіантів реалізації заходів, моменту часу – розрахунковому року t_p . Вартісна оцінка витрат на підставі приведення різночасових витрат і результатів всіх років періоду реалізації до розрахункового року здійснюється за формулою (3) шляхом множення їхньої величини за кожний рік на коефіцієнт приведення α_t , що визначається за формулою (4) за [3]:

$$B_t = \sum_{t=t_n}^{t_k} B_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_n}^{t_k} (u_t + k_t - b_t) \cdot \alpha_t \quad (3)$$

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{t_p - 1}, \quad (4)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де E_n – норматив приведення різночасових витрат і результатів, $E_n = 0,1$;
 t_p – розрахунковий рік;
 t – рік, витрати і результати якого приводяться до розрахункового року;
 B_t – витрати всіх ресурсів у рік t (включаючи витрати на отримання супутніх результатів), грн;
 u_t – поточні витрати у рік t без урахування амортизаційних відрахувань на реновацію, грн;
 k_t – одноразові витрати у рік t , грн;
 b_t – залишкова вартість (ліквідаційне сальдо) основних фондів, що вибувають із використання у рік t , грн.

Отже, на підставі вищенаведених формул розрахунку вартості життєвого циклу та сумарного економічного ефекту дуже вагомою складовою є сумарні витрати, що можуть бути понесені користувачем протягом використання придбаної продукції. Таким чином, дуже важливим стає ретельний аналіз впливових факторів та визначення ступеня їхньої значимості на кінцеву вартість залізничної продукції.

Висновки:

1 Визначення вартості життєвого циклу потребує певних знань та фахової підготовки, оскільки некоректно визначені складові витрат можуть, з одного боку – створити хибне уявлення про велику значимість деяких витрат, а з іншого боку – ризик не включити всі важливі витрати, які нестиме користувач.

2 Застосування відповідних методів оцінки вартості життєвого циклу та практик застосування (наприклад, інтерактивного калькулятора) надає змогу отримати об'єктивні та швидкі результати.

3 Оцінювання та відбір факторів, що впливають на визначення вартості життєвого циклу та визначення тих, що впливають на співвідношення ціна/якість, дуже важливий інструмент у випадку прийняття рішення щодо вибору та придбання певної залізничної продукції.

4 Наявність кваліфікованого персоналу, який буде залучено до визначення вартості життєвого циклу, на результатах розрахунку якого буде прийматись рішення щодо придбання продукції, є одним із найважливіших факторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ ГОСТ 31538:2016 (ГОСТ 31538-2012, IDT) Цикл життєвий залізничного рухомого складу. Загальні вимоги [Чинний від 2016-10-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 13 с. (Національні стандарти України).
2. Семко Ж.О. Аналіз методологій ціноутворення залізничної техніки на основі оцінки вартості життєвого циклу. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2022. вип. 25. С. 80-97 DOI: <https://www.doi.org/10.47675/2304-6309-2022-25-80-97>
3. Про затвердження Примірної методики визначення вартості життєвого циклу. Наказ Міністерства економіки від 28.09.2020 № 1894 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://me.gov.ua/LegislativeActs/Detail?lang=uk-UA&id=32140d03-d5eb-4988-8790-6d60d1c84a93>
4. Про публічні закупівлі. Закон України від 25 грудня 2015 р. № 922-VIII // База даних «Законодавство України»/ВР України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19#Text>
5. Шимко Т. Методика визначення вартості життєвого циклу / Держзакупівлі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://infobox.prozorro.org/articles/metodika-viznachennya-vartosti-zhittiyevogo-ciklu>
6. Савенко В.В. Ефективність теплотяги. Локомотив – інформ. 2008. № 5. С. 4-7

7. Калабухін Ю. Є., Тартаковський Е. Д. Теоретичні положення оновлення тягового рухомого складу з урахуванням життєвого циклу. Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. Х.: УкрДАЗТ. 2009. Вип. 111. С. 106-120.
8. Рудковський О. В. Обґрунтування вибору варіанту оновлення локомотивів з урахуванням життєвого циклу. Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 166. С. 172-179.
9. Рудковський О. В. Теоретичні положення оцінки життєвого циклу модернізації тепловоза. Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2015. №2. С. 130-135.
10. Фалендиш А.П., Гатченко В.О. Скорочення вартості життєвого циклу рухомого складу за рахунок використання автоматизованих систем. Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків: УкрДУЗТ. 2019. Вип. 184. С. 57-58.

Zh.O. Semko

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380536660250, E-mail: : shaganne@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0047-8509>

ASPECTS OF CALCULATING THE LIFECYCLE COST OF RAILWAY ROLLING STOCK

In the context of continuous technological progress, taking into account the development of new and improvement of existing technical solutions to enhance any (functional, environmental, technical, quality) indicators of products (goods, materials, substances, means, etc.), the issue of the final cost of using certain products is becoming increasingly relevant. It should be recognised that, along with the well-known approach to the highest quality of products used among selected models (types, kinds), the economic factor becomes paramount: lower production costs – lower cost price, lower price – high competitiveness, and therefore higher income. At the same time, it is important not to overlook the cost of ensuring the maintainability, reliability and safety of products, as well as the cost of such life cycle stages as operation.

There is also no doubt that the final lifecycle cost is influenced by the cost of the processes of creation, commissioning, operation, maintenance and repair, as well as disposal of rolling stock.

Studies have shown that the development, production and operation stages are the most costly stages of the life cycle of railway rolling stock. However, it is necessary to determine how significant the main economic criteria are that are applicable when assessing the lifecycle costing in general and each of its stages in particular; how serious the influencing factors are depending on the type of rolling stock, how influential the technical characteristics are on the total lifecycle costs of a particular piece of railway rolling stock; what factors can influence the achievement of a specific level of lifecycle cost in order to ensure competitiveness.

Keywords: rolling stock, lifecycle cost, technical level, lifecycle stages, total costs, competitiveness.

REFERENCES

1. Tsykl zhyttievyi zaliznychnogo rukhomogo skladu. Zahalni vymohy [Life-cycle of railway rolling stock. General requirements]. (2016). DSTU GOST 31538:2016 (GOST 31538-2012, IDT) from 1st October 2016. Kyiv: SE «UkrNDNTS» [in Ukrainian]
2. Semko, Zh. O., (2022). Analiz metodolohiyi stvorennia zaliznychnoi tekhniki na osnovi otsinky vartosti zhyttievoho tsyклу [Analysis of railway equipment pricing methodology based on lifecycle cost assessment]. Zbirnyk naukovykh prats «Reikovyj rukhomy sklad» - Collection of scientific papers 'Railbound Rolling Stock', 25, 80-95 [in Ukrainian]
3. Nakaz Min ekonomiky vid 28.09.2020 № 1894 Pro zatverdzhennia Prymirnoi metodiky vyznachennia vartosti zhyttievoho tsyклу [Order of the Ministry of Economy dated 28 September 2020 No 1894 On approval of the Model Methodology for Determining Life Cycle Cost]. *me.gov.ua*. Retrieved from: <https://me.gov.ua/LegislativeActs/Detail?lang=uk-UA&id=32140d03-d5eb-4988-8790-6d60d1c84a93> [in Ukrainian]
4. Zakon Ukrainy vid 25 hrudnia 2015 roku № 922-VIII Pro publichni zakupivli [Law of Ukraine No. 922-VIII dated 25 December 2015 On Public Procurement]. Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy». Verkhovna Rada Ukrainy - Database 'Legislation of Ukraine'. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19#Text> [in Ukrainian]
5. Shymko, T., (n.d.). Metodyka vyznachennia vartosti zhyttievoho tsyклу [Lifecycle costing methodology]. Derzhzakupivli - Public procurement. *infobox.prozorro.org*. Retrieved from: <https://infobox.prozorro.org/articles/metodika-vyznachennia-vartosti-zhyttievoho-ciklu> [in Ukrainian]
6. Savenko, V. V. (2008). Efektyvnist teplotyahy [Heat extraction efficiency]. Lokomotyv – inform - Locomotive – inform, 5, 4-7 [in Ukrainian]
7. Kalabukhin, Yu. Ye., & Tartakovskiy, E. D. (2009). Teoretychni polozhennia onovlennia tiahovogo rukhomogo skladu z urakhuvanniam zhyttievoho tsyклу [Theoretical provisions for the renewal of traction rolling stock taking into account the lifecycle]. Zbirnyk naukovykh prats - Collection of scientific works, 111, 106-120. Kharkiv: UkrDAZT [in Ukrainian]
8. Rudkovskiy, O. V., (2016). Obruntuvannia vyboru variantu onovlennia lokomotyviv z urakhuvanniam zhyttievoho tsyклу [Justification of the choice of locomotive renewal option taking into account the lifecycle]. Zbirnyk naukovykh prats - Collection of scientific works, 166, 172-179. Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian]
9. Rudkovskiy, O. V., (2015). Teoretychni polozhennia otsinky zhyttievoho tsyклу modernizatsii teplovoza [Theoretical provisions for assessing the lifecycle of diesel locomotive modernisation]. Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu - Bulletin of Cherkasy State Technological University, 2, 130-135 [in Ukrainian]
10. Falendysh, A. P., & Hatchenko, V. O. (2019). Skorochennia vartosti zhyttievoho tsyклу rukhomogo skladu za rakhunok vykorystannia avtomatyzovanykh system [Reducing the lifecycle cost of rolling stock through the use of automated systems]. Zbirnyk naukovykh prats - Collection of scientific works, 184, 57-58. Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian]

Д. О. Брусило

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380962055692, E-mail: tyschkovez28@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9976-0793>

І. В. Гладких

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380631715009, E-mail: innagladkih59@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ

Метою статті є дослідження можливостей використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у системах електропостачання залізничного транспорту України з урахуванням технічних, експлуатаційних та нормативних особливостей функціонування галузі. У роботі проаналізовано наукові публікації, технічну документацію та сучасні світові підходи до інтеграції сонячних панелей, малих вітрових установок, систем мікрогенерації та систем накопичення енергії (ESS) у залізничну інфраструктуру. Розглянуто особливості роботи автономних систем живлення пасажирських вагонів, які поєднують традиційні підвагонні генератори з сонячною та вітровою генерацією. Показано, що використання гібридних схем живлення дозволяє покращувати роботу вагонів під час стоянок, у режимах низької швидкості, а також зменшувати пікове навантаження на мережу за рахунок акумуляції надлишкової енергії.

Особливу увагу приділено застосуванню технологій збору мікроенергії – зокрема системам перетворення вібрацій рейкової колії на електроенергію для живлення сенсорів та телеметричних модулів. Проаналізовано перспективи впровадження таких рішень у контексті розвитку «розумної» інфраструктури та цифрового моніторингу стану залізниці. У статті також окреслено ключові технічні та організаційні виклики інтеграції ВДЕ та ESS, серед яких – високі інвестиційні витрати, потреба модернізації мереж і адаптації нормативно-правової бази.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації сучасних технологічних підходів до інтеграції ВДЕ, ESS та мікрогенерації у залізничну інфраструктуру. Практичне значення результатів визначається можливістю їх використання для підвищення автономності пасажирських вагонів, оптимізації енергоспоживання, зменшення залежності від традиційних джерел енергії та впровадження інноваційних рішень у системи енергопостачання транспорту України.

© Брусило Д.О., Гладких І.В., 2025

Ключові слова: залізничний транспорт, відновлювані джерела енергії, автономне електропостачання, фотоелектричні панелі, вітрові установки, мікрогенерація, системи накопичення енергії.

Вступ та постановка проблеми.

Сьогодні відновлювані джерела енергії (ВДЕ) займають важливе місце у розвитку багатьох галузей людської діяльності, і їх інтеграція в сучасні енергосистеми стикається з низкою проблем, над вирішенням яких працюють українські та іноземні фахівці. Однією з галузей, де впровадження ВДЕ набуває особливої актуальності, є залізничний транспорт – ключовий елемент транспортної інфраструктури України, що забезпечує стабільні пасажирські та вантажні перевезення. Ефективність його роботи значною мірою залежить від надійності систем електропостачання. Традиційні автономні системи живлення пасажирських вагонів ґрунтуються на підвагонних генераторах, які мають низку експлуатаційних обмежень. Зокрема, заряджання акумуляторних батарей можливе лише за умови досягнення швидкості понад 35 км/год, що ускладнює забезпечення енергоживлення під час тривалих стоянок або руху на низькій швидкості [1, 2].

Згідно із Законом України «Про критичну інфраструктуру» № 1882-IX від 16.11.2021 р. транспортна галузь віднесена до об'єктів критичної інфраструктури, що формує додаткові вимоги щодо енергетичної стійкості та безпеки систем залізничного транспорту [3]. На державному рівні розпочато реалізацію спільних проєктів з європейськими країнами щодо оснащення об'єктів критичної інфраструктури децентралізованими системами відновлюваної енергетики [4].

У сучасних умовах актуальним є пошук рішень, які підвищать автономність та енергоефективність систем електропостачання рухомого складу. Одним із перспективних напрямів є інтеграція відновлюваних джерел енергії – фотоелектричних панелей, вітрогенераторів малої потужності та систем накопичення енергії. Це відповідає світовим тенденціям декарбонізації та розвитку сталої транспортної інфраструктури.

Використання сонячних панелей та малих вітрових установок у складі систем автономного живлення пасажирських вагонів дозволяє зменшити залежність від зовнішніх джерел енергії під час стоянок та маневрових операцій. За даними дослідження Бойка С. М. та співавторів [2], доцільним є застосування гібридних рішень, які поєднують перетворення енергії сонячної інсоляції і турбулентних повітряних потоків, що виникають на даху вагона під час руху.

Запропоновані конструкції передбачають встановлення фотоелектричних модулів та невеликих вітроустановок таким чином, щоб габарити обладнання відповідали вимогам безпеки, не перешкоджали експлуатації та не створювали ризиків взаємодії з контактною мережею. Також відзначено можливість вироблення електроенергії не лише у русі, а й під час стоянки завдяки природним атмосферним потокам [2].

Такі системи здатні забезпечувати живлення освітлення, вентиляції, клімат-контролю та інформаційних комплексів вагонів, зменшуючи навантаження на підвагонні генератори та підвищуючи автономність рухомого складу. Однак через природну мінливість сонячної та вітрової енергії стабільність електроживлення не завжди може бути гарантована, особливо в періоди низької інсоляції чи слабого вітру. Саме тому, паралельно з використанням основних ВДЕ, міжнародні дослідження пропонують застосовувати додаткові джерела мікрогенерації для живлення малопотужних споживачів. Одним із найбільш перспективних напрямів є пе-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ретворення вібрацій колії на електроенергію, що дозволяє забезпечувати автономне живлення сенсорів, телеметричних модулів та інших енергоощадних пристроїв без навантаження на основні системи. Зокрема, в дослідженні показано, що стековий п'єзоелектричний пристрій збору енергії (Рис.1) (energy harvester), встановлений під рейковою конструкцією, здатний генерувати до 193 мВт електроенергії, що робить його ефективним рішенням для живлення допоміжних цифрових систем [5-7].



Рис. 1. Типи пристроїв для збору мікроенергії з коливань залізничних рейок

Сучасні системи накопичення енергії (Energy Storage Systems, ESS) є ключовим елементом інтеграції ВДЕ у залізничний транспорт. Вони дозволяють акумулювати електроенергію, що виробляється сонячними панелями, вітровими турбінами або іншими джерелами, у періоди низького навантаження, та використовувати її під час пікових навантажень або коли джерела ВДЕ недоступні. Завдяки цьому ESS сприяють підвищенню автономності рухомого складу та об'єктів інфраструктури, таких як станції, депо, тягові підстанції, освітлення та технологічне обладнання.

Використання акумуляторів великої ємності, зокрема літій-іонних та твердотільних батарей, дозволяє не лише забезпечувати безперервне живлення, але й оптимізувати енергоспоживання. Зокрема, сучасні системи управління зарядом батарей враховують доступну енергію від сонця та вітру, прогнозоване споживання та потреби рухомого складу, що дозволяє економити традиційні джерела енергії та підвищувати загальну енергоефективність [8]. Інтеграція ESS у смарт-системи енергоменеджменту відкриває можливості для створення гібридних систем живлення, які поєднують відновлювану генерацію, батареї та мережеву електроенергію, забезпечуючи стабільність та надійність постачання енергії в усіх режимах роботи залізниці [9].

Незважаючи на значний потенціал, впровадження ВДЕ на залізничному транспорті супроводжується певними труднощами. До основних викликів належать необхідність модернізації застарілих мереж та обладнання, забезпечення сумісності

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

нових систем із традиційними елементами інфраструктури, нестабільний характер відновлюваної генерації, складність оптимізації роботи систем у змінних режимах, висока вартість інвестицій та потреба у чіткому економічному обґрунтуванні окупності, а також необхідність удосконалення нормативно-правової бази.

Поєднання ВДЕ, ESS та новітніх технологій збору мікроенергії дозволяє створювати стійкі, автономні та енергоефективні системи живлення для залізничного транспорту. Водночас подальший розвиток цих рішень потребує комплексного підходу до модернізації інфраструктури, економічного обґрунтування інвестицій, а також вдосконалення нормативної та технічної бази для інтеграції нових технологій у існуючі залізничні мережі.

Міжнародний досвід демонструє різноманітні підходи до інтеграції відновлюваних джерел енергії у залізничну інфраструктуру. Зокрема, німецький залізничний оператор Deutsche Bahn спільно з британською енергетичною компанією Bankset тестує використання фотоелектричних систем безпосередньо на шпалах колій (Рис. 2). За оцінками, така технологія потенційно може виробляти до 0,1 МВт електроенергії на кілометр рейок, що у масштабі всієї німецької залізничної мережі здатне забезпечувати генерацію, порівнянну з потужностями кількох атомних електростанцій. Крім колій, сонячні панелі також встановлюють на дахах вокзалів та шумозахисних стінах вздовж колій. Хоча поки що в Deutsche Bahn не визначилися з практичним впровадженням цієї технології, тривають дослідження можливостей застосування сонячних систем у залізничних об'єктах, що свідчить про зростаючий інтерес до інтеграції ВДЕ в транспортну інфраструктуру на міжнародному рівні [10].



Рис. 2. Сонячні панелі, встановлені на шпалах німецької залізниці

Висновки

Аналіз наукових публікацій та технічних джерел свідчить про значний потенціал інтеграції відновлюваних джерел енергії та систем накопичення енергії у залізничний транспорт. Встановлено, що комбінація сонячних панелей, малих вітрових установок і акумуляторних батарей може сприяти підвищенню автономності пасажирських вагонів та об'єктів інфраструктури, зменшенню навантаження на підва-

гонні генератори та стабілізації енергопостачання у різних режимах роботи рухомого складу. Дослідження показують, що додаткові джерела мікрогенерації, зокрема перетворення вібрацій рейок на електроенергію, можуть забезпечувати живлення малопотужних пристроїв, таких як датчики та телеметричні модулі, без навантаження на основні системи. Це дозволяє підвищувати ефективність моніторингу стану інфраструктури та сприяє розвитку «розумних» енергетичних систем.

При цьому зазначається, що впровадження ВДЕ та ESS пов'язане з технічними, економічними та нормативними викликами, серед яких – висока вартість обладнання, потреба модернізації застарілих мереж, нестабільний характер відновлюваної генерації та необхідність адаптації законодавства до нових технологій.

У цілому узагальнені результати аналізу літератури та технічних досліджень свідчать, що застосування ВДЕ та ESS у залізничному транспорті може сприяти підвищенню енергоефективності, автономності та екологічності залізничної інфраструктури України, одночасно відкриваючи можливості для подальшого розвитку гібридних систем живлення та впровадження інноваційних технологій збору мікроенергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стаценко Д. В., Стаценко В. В., Злотенко Б. М., Демішонкова С. А. Застосування моделей машинного навчання для оптимізації управління інтелектуальними мережами відновлюваних джерел енергії. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 4. С. 202–207. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/30>.
2. Бойко С. М., Котов О. Б., Жуков О. А., Коваль А. М., Риков Г. Ю., Лапіна О. С. Актуальність та особливості впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в умовах залізничного транспорту. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2024. Т. 35. № 4. С. 303–307. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/4_2024/48.pdf
3. Закон України «Про критичну інфраструктуру» № 1882-IX від 16.11.2021 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20>.
4. Україна та Німеччина запускають спільний проєкт з оснащення об'єктів критичної інфраструктури відновлюваними джерелами енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-ta-nimechchyna-zapuskaiut-spilnyi-proekt-z-osnashchennia-obiektiv-krytychnoi-infrastruktury-vidnovliuvanyim-dzherelamy-enerhii>.
5. Zhang X., Zhang Z., Pan H., Mohammed W. S. A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 118. P. 287–294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.012>.
6. Siddique A. R. M., Mahmud S., Van Heyst B. A. Comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 106. P. 728–747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.016>.
7. Zhang T., Kong L., Zhu Z., Wu X., Li H., Zhang Z., Yan J. An electromagnetic vibration energy harvesting system based on series coupling input mechanism for freight railroads. *Applied Energy*. 2024. Vol. 353, Part A. Article № 122047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122047>.
8. Park S., Salkuti S. R. Optimal energy management of railroad electrical systems with renewable energy and energy storage systems. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. 6293. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11226293>.
9. Ревак Д. Ю. Розробка підходу до реалізації транспортного засобу з електричним приводом з зарядним пристроєм від відновлювальних джерел енергії : кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт» / Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2024. 72 с.
10. Deutsche Bahn тестує сонячні батареї на шпалах [Електронний ресурс] / Центр транспортних стратегій. Київ : CFTS, 2022. Режим доступу: https://cfts.org.ua/news/2022/07/05/deutsche_bahn_testue_sonyachni_batare_na_shpalakh_70904.

D. O. Brusylo

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine
Tel.: +380962055692, E-mail: tyschkovez28@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9976-0793>

I. V. Hladkykh

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine
Tel.: +380631715009, E-mail: innagladkih59@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

**INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES
INTO THE ENERGY SYSTEM OF UKRAINE'S RAILWAY
TRANSPORT**

The purpose of the article is to examine the possibilities of using renewable energy sources (RES) in the power supply systems of Ukraine's railway transport, taking into account the technical, operational, and regulatory features of the sector. This paper analyzes scientific publications, technical documentation, and modern global approaches to integrating solar panels, small wind turbines, microgeneration systems, and energy storage systems (ESS) into railway infrastructure. Special attention is given to the operation of autonomous power supply systems in passenger railcars, which combine traditional under-car generators with solar and wind generation. It is demonstrated that the use of hybrid power schemes improves railcar operation during stops and low-speed modes, as well as reduces peak load on the grid by accumulating surplus energy. Particular attention is paid to the application of micro-energy harvesting technologies, specifically systems that convert railway track vibrations into electrical energy for powering sensors and telemetry modules. The prospects of implementing such solutions are analyzed in the context of developing «smart» infrastructure and digital monitoring of railway conditions. The article also outlines key technical and organizational challenges in the integration of RES and ESS, including high investment costs, the need to modernize networks, and the adaptation of the regulatory framework. The scientific novelty of the study lies in the systematization of modern-technological approaches to integrating RES, ESS, and microgeneration into railway infrastructure. The practical significance of the results is determined by the potential for their application in enhancing the autonomy of passenger railcars, optimizing energy consumption, reducing dependence on traditional energy sources, and introducing innovative solutions into the power supply systems of Ukraine's transport sector.

Keywords: railway transport, renewable energy sources, autonomous power supply, photovoltaic panels, wind turbines, microgeneration, energy storage systems.

REFERENCES

1. Statsenko, D. V., Statsenko, V. V., Zlotenko, B. M., & Demishonkova, S. A. (2024). Zastosuvannia modelei mashynnoho navchannia dlia optymizatsii upravlinnia intelektualnykh merezhamy vidnovliuvanykh dzherel enerhii [Application of machine learning models for optimizing the management of intelligent networks of renewable energy sources]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of V. I. Vernadsky Ternopil National University. Series: Technical Sciences*, 35(74/4), 202–207. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/30> [in Ukrainian].
2. Boiko, S. M., Kotov, O. B., Zhukov, O. A., Koval, A. M., Rykov, H. Yu., & Lapina, O. S. (2024). Aktualnist ta osoblyvosti vprovadzhennia vidnovliuvalnykh dzherel elektrychnoi enerhii v umovakh zaliznychnoho transportu [Relevance and specifics of implementing renewable energy sources in railway transport]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of V. I. Vernadsky Ternopil National University. Series: Technical Sciences*, 35(4), 303–307 [in Ukrainian]. Retrieved from: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/4_2024/48.pdf
3. Zakon Ukrainy Pro krytychnu infrastrukturu vid 16 lystopada 2021 roku № 1882-IX [Law of Ukraine «On Critical Infrastructure» from November 16, 2021]. (2021). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20> [in Ukrainian].
4. Ukraina ta Nimechchyna zapuskaiut spilnyi proekt z osnashchennia ob'ektiv krytychnoi infrastruktury vidnovliuvanykh dzherelamy enerhii [Ukraine and Germany launch a joint project to equip critical infrastructure with renewable energy sources]. *kmu.gov.ua*. Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-ta-nimechchyna-zapuskaiut-spilnyi-proekt-z-osnashchennia-obiektiv-krytychnoi-infrastruktury-vidnovliuvanykh-dzherelamy-enerhii> [in Ukrainian].
5. Zhang, X., Zhang, Z., Pan, H., & Mohammed, W. S. (2016). A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads. *Energy Conversion and Management*, 118, 287–294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.012>.
6. Siddique, A. R. M., Mahmud, S., & Van Heyst, B. A. (2015). Comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 106, 728–747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.016>.
7. Zhang, T., Kong, L., Zhu, Z., Wu, X., Li, H., Zhang, Z., & Yan, J. (2024). An electromagnetic vibration energy harvesting system based on series coupling input mechanism for freight railroads. *Applied Energy*, 353, Part A, Article № 122047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122047>.
8. Park, S., & Salkuti, S. R. (2019). Optimal energy management of railroad electrical systems with renewable energy and energy storage systems. *Sustainability*, 11(6293). DOI: <https://doi.org/10.3390/su11226293>.
9. Revak, D. Yu. (2024). Rozrobka pidkhodu do realizatsii transportnoho zasobu z elektrychnym pryvodom z zariadnym prystroiem vid vidnovliuvalnykh dzherel enerhii: kvalifikatsiina robota mahistra za spetsialnistiu 274 «Avtomobilnyi transport» [Development of an approach to the implementation of an electric vehicle with a charger powered by renewable energy sources: master's thesis in the speciality 274 "Automotive Transport"]. Ternopilskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puluiia – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 72. Ternopil [in Ukrainian].
10. Deutsche Bahn testuie soniachni batarei na shpalakh [Deutsche Bahn tests solar panels on railway sleepers]. Tsentr transportnykh stratehii – Transport Strategy Centre. (2022). Kyiv: CFTS. Retrieved from: https://cfts.org.ua/news/2022/07/05/deutsche_bahn_testuie_sonyachni_batare_na_shpalakh_70904 [in Ukrainian].

І. Е. Мартинов

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: +380577301036, E-mail: martinov.hiit@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

А. В. Труфанова

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: +380577301035, E-mail: trufanova@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

С. І. Мартинов

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: +380503039850, E-mail: st.mrtnv@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-7802>

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ КУЗОВІВ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

В статті розглянуті конструктивні особливості кузовів пасажирських вагонів, виготовлених у різних країнах світу. Так, у США для сполучення використовуються пасажирські вагони з негофрованими боковими стінами, виготовленими із нержавіючої сталі. У міжміському сполученні отримали широке розповсюдження вагони з вигнутими бічними стінами, де підвіконний пояс обшивки є гофрованим.

Канадська машинобудівна компанія Bombardier Transportation виготовляє пасажирські вагони, виконані з кузовом з нержавіючої сталі та з негофрованою обшивкою бічних стін. У Франції експлуатуються пасажирські вагони серії Corail з негофрованою обшивкою бічних стін. Французькою машинобудівною компанією Alstom запатентовано кузов пасажирського вагона з нержавіючої сталі із зовнішньою негофрованою обшивкою, підкріпленою з внутрішньої сторони кузова гофрованим листом. У Німеччині, Австрії та Швейцарії використовуються вагони з плоскими бічними стінами з негофрованою обшивкою. Німецькі виробники заводу Амендорф багато років постачали жорсткі купейні вагони в країни СНД. Кузови цих пасажирських вагонів виконані з гофрованою обшивкою бічних стін із циліндричними гофрами.

Як правило, підкріплення негофрованої обшивки здійснюється гнутими підкріплюючими елементами та гофрованою обшивкою. Виробники пасажирських вагонів (Bombardier Transportation, Alstom та ін.) у конструкції кузовів несамохідних вагонів переважно використовують леговані та нержавіючі сталі.

© Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Мартинов С. І., 2025

Аналіз світового досвіду проектування кузовів пасажирських вагонів показав, що найчастіше використовуються цільнонесучі кузова, виготовлені з конструкційних сталей. При цьому спостерігається широке використання конструкцій із негофрованою зовнішньою обшивкою. Дане конструктивне рішення дозволяє спростити технологію нанесення лакофарбових покриттів, підвищити стійкість до корозії кузова і поліпшити аеродинамічні показники вагона.

Сучасні виробники пасажирського рухомого складу схильні до використання стрінгерних варіантів підкріплення обшивки. Перспективним напрямом полегшення несучої конструкції кузова є застосування підкріплюючих елементів з перфорацією.

Ключові слова: пасажирський вагон, рама, кузов, бокова стіна, алюмінієвий сплав, нержавіюча сталь, підкріплюючі елементи.

Вступ. Процес вступу України до Європейської спільноти розпочався на межі ХХ-ХХІ сторіччя з економічного і політико-правового зближення України з європейськими міждержавними структурами. Стосовно залізничного транспорту одним з найважливіших завдань для спрощення інтеграції залізниць України до залізниць Європейського Союзу, є капітальна модернізація та оновлення парку пасажирських вагонів ПАТ «Укрзалізниця».

Парк пасажирських вагонів, які експлуатаувалися на залізницях СРСР, складався з вагонів побудови Угорщини, Польщі, Німеччини та Росії. Вагони перших двох виробників вичерпали свій ресурс ще наприкінці 80-х років ХХ сторіччя та виключені з експлуатації. Відповідно переважна більшість парку пасажирських вагонів, який дістався у спадщину Україні від СРСР в 1991 році, була збудована у 80-90 роки минулого сторіччя на вагонобудівних заводах СРСР та Німеччини. Технічний стан таких вагонів вкрай незадовільний, рівень зношеності у переважній більшості вагонів перевищує 90%. Числені ремонти та модернізації не забезпечують як необхідного рівня безпеки руху, так і комфортних умов для перевезення пасажирів.

В умовах військового стану постачання нових вагонів скоротилося до мінімуму. Єдиний вітчизняний виробник ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» має досить обмежені виробничі потужності та не може терміново ліквідувати дефіцит сучасних вагонів. Тому старіння пасажирського вагонного парку продовжується швидкими темпами та через відсутність фінансування не компенсується надходженнями нових вагонів.

Мета дослідження. Метою роботи є аналіз особливостей конструкцій кузовів пасажирських вагонів, які експлуатуються у різних країнах світу.

Матеріали дослідження. Наприкінці 60-х років ХХ сторіччя у США було розроблено пасажирський вагон Comet локомотивної тяги для міжміського сполучення. До 2004 р. було випущено п'ять серій вагонів цього типу. Вагони Comet I – Comet IV мають кузов з негофрованою обшивкою, виготовлений із алюмінієвого сплаву. Несуча система кузовів виконана із сендвіч-панелей, що складаються із зовнішніх алюмінієвих листів, між якими розташовуються різні матеріали, включаючи фанеру, полімерні піни або алюмінієві стільники [1]. Вагони Comet V, побудовані у 1999-2004 рр., відрізняються від попередніх серій кузовом, виконаним з нержавіючої сталі.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

На підставі дизайну вагона Comet II у період з 1988 по 1990 р. були випущені вагони Horizon з негофрованою обшивкою бічних стін (рис. 1), які й сьогодні перебувають у експлуатації.



Рис. 1. Пасажирський вагон міжміського сполучення Horizon (Bombardier Transportation)

Широкого поширення набули двоповерхові вагони (Hi-Level, Superliner I, Superliner II (1991-1996 рр.) [2]. У негофрованій обшивці бічної стіни на рівні другого поверху вагона Superliner (рис. 2) як поздовжніх так і поперечних підкріплювальних елементів використані коритні профілі, що характерно для більшості кузовів вагонів американського виробництва з негофрованим кузовом, виконаним з нержавіючої сталі.



Рис. 2. Несуча конструкція кузова вагона Superliner

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

У міському сполученні США використовуються вагони серій 2600, 3200 та інші, негофровані бокові стіни яких виконані з нержавіючої сталі. Підвіконний пояс бокової стіни має початкову загнутість і може бути виконаний гофрованим. Як підкріплювальні елементи бічної стіни також застосовуються коритні профілі (рис. 3) [3].



Рис. 3. Панель бічної стіни кузова вагона у стенді зварювання

У міжміському сполученні США використовуються вагони Amfleet (випущені в 1973-1983 рр.) з кузовом із нержавіючої сталі. Бічні стіни кузова мають початкову загнутість та виконані у надвіконному та підвіконному поясі з гофрованою обшивкою (рис. 4, а).

Одноповерхові спальні вагони Viewliner (Viewliner I (1994 р.), Viewliner II (2012 р.) (рис. 4, б) виконані з вигнутими бічними стінами, причому підвіконний пояс обшивки є гофрованим.



Рис. 4. Пасажирські вагони США

а) - вагон для міжміського сполучення Amfleet (Budd); б) - спальний вагон Viewliner II (CAF)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

На бічній стіні розташовується два пояси вікон (верхній пояс призначений для пасажирів верхніх спальних полиць). Вагон Viewliner блочно-модульного виконання, у зв'язку з цим його характерною рисою є наявність у бічній стіні люка, що знімається.

Канадська машинобудівна компанія Bombardier Transportation в галузі виробництва залізничного рухомого складу сьогодні реалізує свої проекти в багатьох країнах світу, серед яких Бельгія, Китай, Узбекистан, де виготовляються сучасні несамохідні виконані з кузовом з нержавіючої сталі та з негофрованою обшивкою бічних стін (рис. 5, а, б) [4].



а)



б)

Рис. 5. Пасажирські вагони Bombardier Transportation

а) - вагон моделі P11 з місцями для сидіння (Бельгія); б) - спальний вагон (Китай)

У Японії поїзди далекого прямування поступово витісняються в міру поширення високошвидкісної мережі Shinkansen. Пасажирський одноповерховий спальний вагон моделі ORoNe 25 901, що перебував в експлуатації до 2008 року (рис. 6), має вигнуті бічні стіни кузова з негофрованою обшивкою [5].



Рис. 6. Пасажирський спальний вагон моделі ORoNe 25 901 (Nippon Sharyo)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

У Франції в період з 1975 по 1989 були введені в експлуатацію пасажирські вагони серії Corail з негофрованою обшивкою бічних стін. На базі вагонів сімейства Corail створено пасажирські вагони TéoZ, введені в експлуатацію з 2003 по 2006 (рис. 7). Дизайн французького вагона Corail було взято за основу також португальськими та румунськими виробниками рухомого складу.

Французькою машинобудівною компанією Alstom запатентовано кузов пасажирського вагона з нержавіючої сталі із зовнішньою негофрованою обшивкою, підкріпленою з внутрішньої сторони кузова гофрованим листом [6].



Рис. 7. Пассажирский вагон серии Corail (Alstom)

В експлуатації також можна зустріти пасажирські вагони виробництва Alstom з негофрованими вигнутими бічними стінами із застосуванням у несучій конструкції перфорованих балок (рис. 8) [7].



а)



б)

Рис. 8. Кузов пасажирського вагона з елементами конструкції перфорованого перерізу (Alstom)

а) - загальний вигляд кузова вагона; б) - вид кузова зсередини

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

У швидкісному сполученні федеральної залізниці Німеччини з 1954 року використовувалися пасажирські вагони UIC-X (рис. 9, а), стандартизовані Міжнародним союзом залізниць (UIC) [8]. Вагони аналогічної конструкції також використовувалися Австрійською федеральною залізницею (ÖBB) з 1957 року та з 1966 року Швейцарською федеральною залізницею (SBB). Вагон UIC-X мав плоскі бічні стіни з негофрованою обшивкою. На його основі були розроблені серії пасажирських вагонів, що відрізняються один від одного в основному комфортабельністю та конструкцією даху (рис. 9, б). Пасажирські вагони стандарту UIC різних типів експлуатуються на залізницях Італії, Франції, Бельгії та інших європейських країн.

Пасажирські вагони далекого прямування виробництва Німеччини (рис. 10, а) у другій половині XX століття постачалися на вітчизняні залізниці [9, 10]. Кузови пасажирських вагонів виробництва Німеччини (завод Амендорф) виконані з гофрованою обшивкою бічних стін з циліндричними гофрами (виключення складають вагони габариту РІЦ моделі ВЛАБ-200, виконані з негофрованою обшивкою бічних стін, (рис. 10, б). Як правило, підкріплення негофрованої обшивки здійснюється гнутими підкріплювальними елементами.



а)



б)

**Рис. 9. Пасажирські купейні вагони Німеччини
розробки 60-70-х років**

а) - вагон UIC-X; б) - вагон моделі AVMZ



а)



б)

Рис. 10. Пасажирські купейні вагони Німеччини
а) - жорсткий купейний вагон; б) - спальний вагон РІЦ ВЛАБ-200

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Характерною особливістю кузовів з гофрованою обшивкою бічних стін виробництва Німеччини є наявність двох гофрів на міжвіконному та підвіконному поясі обшивки (рис. 10, а).

Ще однією важливою особливістю купейних вагонів виробництва Німеччини є відсутність хребтової балки в середній частині рами між шворневими балками (рис. 11).

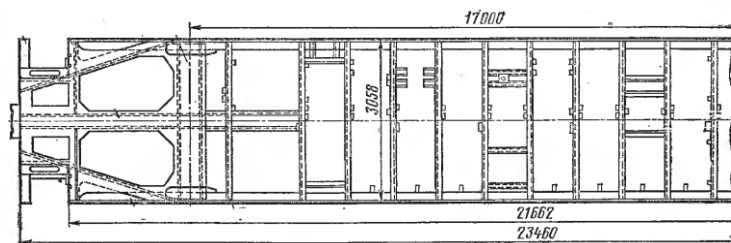


Рис. 11. Рама кузова пасажирського вагона моделі 47 виробництва Німеччини

Рама жорсткого вагона некупейного типу без хребтової балки складається з двох кінцевих балок, двох шворневих балок, проміжних балок, двох поздовжніх балок, які одночасно служать нижньою обв'язкою бічних стін кузова, двох коротких хребтових балок та системи розкосів для передачі ударів. Всі зазначені елементи об'єднані між собою верхнім та нижнім металевими листами товщиною 10 мм. Оскільки нижні обв'язки бокових стін у даній конструкції завантажені більше, ніж у вагонів з наскрізною хребтовою балкою, вони мають збільшений поперечний перетин.

Такі вагони мали прямокутний поперечний переріз оболонки із закругленими кутами. Металева обшивка кузова, підкріплена поздовжніми (стрінгерами) та поперечними (шпангоутами) елементами жорсткості виступала основним несучим елементом. Як поздовжні елементи жорсткості стали використовувати гофри, що дозволило зменшити обсяг зварювальних робіт і короблення обшивки. Застосування гофрів та надалі використання низьколегованої сталі (09Г2Д, 10ХНДП) дозволило зменшити товщину обшивки.



Рис. 12. Пасажирський вагон моделі ЦМВО-66

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Так, у кузові вагона типу ЦМВО-66 бічні стіни з вуглецевої сталі мали товщину гофрованої обшивки 2,5 мм, за винятком надвіконного поясу обшивки. У надвіконному поясі, торцевих стінах та середній частині даху товщина обшивки становила 15 мм. Негофрована обшивка консольних частин рами – 3 мм. Обшивка схилів даху та середньої частини рами була реалізована завтовшки 2 мм.

Рама кузова вагона виготовлялася з наскрізною хребтовою балкою [11], двома шворневими, двома кінцевими і трьома поперечними балками, є також допоміжні балки для кріплення обладнання (рис. 13).

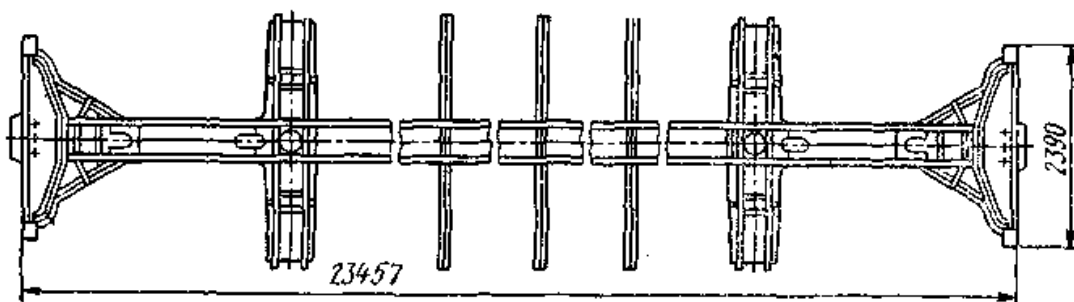


Рис. 13. Рама пасажирського вагона моделі вагона типу ЦМВО-66

Хребтова балка виконана з двох паралельно розташованих швелерів № 30, які зварені по довжині встик і пов'язані між собою діафрагмами жорсткості, виливками передніх і задніх упорів і ударними розетками автозчіпних пристроїв. Між швелерами хребтових балок розташовані надп'ятники.

Настил підлоги в середній частині виконаний гофрованим. Торцеві стіни також виконані з гофрованою обшивкою. Обшивка даху в середній частині гофрована, з поздовжнім розташування гофрів. У скатах даху використана негофрована обшивка.

Необхідно зазначити, що рама пасажирського вагона без хребтової балки у порівнянні з вагонами із наскрізною хребтовою балкою більш економічна, має меншу масу та є менш жорсткою. Внаслідок цього вона може краще сприймати дію експлуатаційних навантажень.

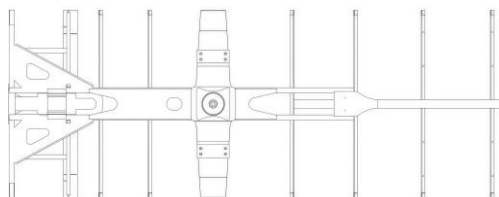
Але, незалежно від виробника, з урахуванням багаторічного терміну експлуатації технічний стан пасажирських вагонів власності ПАТ «Укрзалізниця» є вкрай незадовільним [12].

Українським виробником ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» був розроблений модельний ряд пасажирських вагонів для швидкісних перевезень [13]. Обшивка кузова виконана з листового прокату із конструкційної і нержавіючої сталей. Бокові стіни гофровані (рис. 14, а) [14].

Вагон має рамну конструкцію з хребтовою балкою та додатковим посиленням рами по всьому її периметру (рис. 14, б).



а)



б)

Рис. 14. Вагон пасажирський купейний мод. 61-779

а) - загальний вигляд вагона; б) - рама вагона

У несучих елементах раціонально поєднані традиційні конструкційні та низьколеговані сталі, які використовуються у вагонобудуванні.

Кузов такого вагона при низькій вартості конструкційних матеріалів при відповідній його обробці (піскоструминне очищення, ґрунтовка внутрішніх і зовнішніх поверхонь, обробка внутрішніх поверхонь антикорозійними мастиками, зовнішніх – багат шаровим фарбуванням сучасними системами лакофарбового покриття) забезпечує призначений термін служби вагона до 41 року [15].

Продовженням модельного ряду пасажирських вагонів виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» є пасажирські вагони серії 61-778 [16]. В конструкції цього вагона знайшли своє відображення усі удосконалення конструкції вагонів моделі 61-779, сучасні підходи до конструювання, нові та удосконалені системи, обладнання, тощо. Стосовно металоконструкцій необхідно зазначити, що обшивка кузова виконана з гладкого металевого листа [13].

Висновки:

1. Пасажирські вагони закордонного виробництва переважно мають суцільнометалевий кузов несучої конструкції, причому найбільш поширені кузови з негофрованою зовнішньою обшивкою бічних стін.

2. Проведений огляд існуючих несучих конструкцій бічних стін кузовів несамохідних пасажирських вагонів зарубіжного виробництва показав тенденцію застосування конструкцій з негофрованою зовнішньою обшивкою. Це обумовлено вимогами естетичного зовнішнього вигляду вагонів, спрощення технології нанесення лакофарбових покриттів, збільшення корозійної стійкості кузова та покращення аеродинамічних показників вагона. При цьому аналіз конструктивних рішень, що забезпечують стійкість негофрованої плоскої обшивки, показав, що сучасні виробники рухомого складу схильні до застосування стрінгерних варіантів підкріплення.

3. Застосування полегшених профілів, зокрема перфорованих, що підкріплюють негофровану обшивку кузова пасажирського вагона, є одним з перспективних напрямків в області полегшення несучої конструкції кузова вагона. Оскільки вагонні конструкції експлуатуються при інтенсивному впливі навантаження, що змінюються в часі, в їх несучих конструкціях застосовуються круглі і довгасті типи перфорації.

4. Провідні виробники пасажирських вагонів (Bombardier Transportation, Alstom та ін.) у конструкції кузовів несамохідних вагонів переважно використовують леговані та нержавіючі сталі.

5. Застосування полегшених несучих конструкцій бічних стін пасажирських вагонів з гофрованою зовнішньою обшивкою свідчить про необхідність розробки технічних рішень, що забезпечують міцність кузова вагона, жорсткість, втомну довговічність та стійкість елементів конструкції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kremer K. Metal Foams for Improved Crash Energy Absorption in Passenger Equipment / K. Kremer; Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 34. Newark, 2004.
2. Hopkins H. W. The American railroad passenger car / H. W. Hopkins. Baltimore, Maryland: University Press, 1978. 704 с.
3. Technical Proposal for MBTA RFP No. CAP 27-10 New Orange and Red Line Vehicles, 2014. 319 с.
4. Bombardier: Coaches [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/intercitytrains/coaches.html>
5. Endo T., Korekoda M., Suzuki K. Development of Advanced Commuter Train for Tokyo Area / Technical Development and Research Department East Japan Railway Company, Tokyo. 9 p.
6. Пат. US 5388529 A. Rail vehicle body made of stainless steel / Philippe Tieberghien, Fernand Ramez, Max Lhomme, Michel Berquet; заявник та патентотримувач Alstom Transport SA. № 70679; заявл. 02.06.93; опубл. 14.02.95.
7. Jurdeczka U. Concept for completeness checking of joined structures exemplified on rail vehicle car body shells. Journal of Sensors and Sensor Systems. 2017. Vol. 6. Is. 1. pp. 53–63.
8. UIC 513 R. Guidelines for evaluating passenger comfort in relation in railway vehicle / International Union of Railways, 1994. 81 p.
9. Лобойко Л. М. Проблемы и перспективы пассажирского вагоностроения в Украине. Залізничний транспорт України. 2006. № 3. С. 3–9.
10. Лобойко Л. М., Бараш Ю. С. Стан вагонного парку та вагоноремонтної бази в Україні. Збірник наукових праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна «Проблеми економіки транспорту». 2007. Вип. 19. С. 176–182.
11. Пасажирський рухомий склад магістральних залізничних доріг України. Навч. посібник для навч. закладів залізничного транспорту (переклад р.м) / А. Ф. Агулов, А. Б. Бабанин, А. А. Каграманян, И. Э. Мартынов, В. А. Морозов, А. Г. Теслик. Харьков, ТО «Ексклюзив», 2013. 731 с.
12. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Павленко Ю. С., Сергієнко М. О. Аналіз технічного стану кузовів пасажирських вагонів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Транспортне машинобудування. 2018. № 45 (1321). С. 41–46.
13. Федюшин Ю. М., Лобойко Л. М., Пшінько О. М. Розробка, створення, освоєння виробництва та впровадження сімейства моделей вітчизняних сучасних пасажирських вагонів для швидкісних перевезень. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2005. Вип. 7. С. 5–24.
14. Мямлин С. В., Шкабров О. А., Ягода П. А., Дедаева Т. И. Зниження ваги металоконструкцій пасажирських вагонів для швидкісних перевезень (переклад р.м). Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2006. Вип. 13. С. 118–120.
15. Приходько В. И., Мямлин С. В., Шкабров О. А., Ягода П. А. Удосконалення конструкції кузовів пасажирських вагонів для швидкісних перевезень (переклад р.м). Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007. Вип. 14. С. 152–156.
16. Донченко А. В., Сафронов О. М. Становлення ДП «УкрНДІВ» як флагмана вітчизняної науки щодо розвитку вітчизняного залізничного транспорту та міського колійного транспорту. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад», 2007. Вип. 15. С. 5–102.

I. E. Martynov

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
tel: +380577301036, E-mail: martinov.hiit@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

A. V. Trufanova

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
tel: +380577301035, E-mail: trufanova@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

S. I. Martynov

Ukrainian State University of Railway Transport
Feiirbakha Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
tel: +380503039850, E-mail: st.mrtnv@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-7802>

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF PASSENGER CAR BODIES

The article examines the design features of passenger car bodies manufactured in different countries around the world. In the USA, passenger cars with non-corrugated stainless-steel side walls are used for urban services. In intercity services, cars with curved side walls, where the under-window belt of the sheathing is corrugated, have become widespread.

The Canadian engineering company Bombardier Transportation manufactures passenger cars with stainless-steel bodies and non-corrugated side-wall sheathing.

In France, Corail-series passenger cars with non-corrugated side-wall sheathing are in operation. The French engineering company Alstom has patented a passenger car body made of stainless steel with an external non-corrugated sheathing reinforced on the inner side of the body by a corrugated sheet.

In Germany, Austria and Switzerland, cars with flat side walls and non-corrugated sheathing are used. German manufacturers from the Ammendorf plant supplied rigid compartment-type cars to CIS countries for many years. The bodies of these passenger cars feature corrugated side-wall sheathing with cylindrical corrugations.

As a rule, reinforcement of non-corrugated sheathing is carried out using bent stiffening elements and corrugated sheathing. Manufacturers of passenger cars (Bombardier Transportation, Alstom, etc.) mainly use alloyed and stainless steels in the structures of non-self-propelled car bodies.

Analysis of the global experience in designing passenger car bodies has shown that all-steel load-bearing bodies made of structural steels are most commonly used. At the same time, there is widespread use of designs with non-corrugated external sheathing. This design solution makes it possible to simplify the technology of applying paint coatings, increase the corrosion resistance of the car body, and improve the aerodynamic performance of the vehicle.

Modern manufacturers of passenger rolling stock tend to use stringer-type reinforcement of the sheathing. A promising direction in reducing the weight of car-body load-bearing structures is the use of perforated reinforcing elements.

Key words: *passenger car, frame, body, side wall, aluminum alloys, stainless steel, reinforcing elements.*

REFERENCES

1. Kremer, K. (2004). *Metal foams for improved crash energy absorption in passenger equipment*. Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 34. Newark [in English].
2. Hopkins, H. W. (1978). *The American railroad passenger car*. Baltimore, Maryland: University Press, 704 p. [in English].
3. *Technical proposal for MBTA RFP No. CAP 27-10 New Orange and Red Line Vehicles*. (2014). 319 p.
4. Bombardier. Coaches. Retrieved from: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/intercitytrains/coaches.html>
5. Endo, T., Korekoda, M., & Suzuki, K. Development of advanced commuter train for Tokyo area / Technical Development and Research Department, East Japan Railway Company. Tokyo, 9 p. [in English].
6. Rail vehicle body made of stainless steel: Pat. US 5388529 A / Philippe Tieberghien, Fernand Ramez, Max Lhommet, Michel Berquet; applicant and patent holder Alstom Transport SA. No. 70679; appl. 02.06.1993; publ. 14.02.1995.
7. Jurdeczka, U. (2017). Concept for completeness checking of joined structures exemplified on rail vehicle carbody shells. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 6(1), 53–63 [in English].
8. UIC 513 R. (1994). *Guidelines for evaluating passenger comfort in relation in railway vehicle*. International Union of Railways, 81 p. [in English].
9. Loboyko, L. M. (2006). Problemy i perspektyvy pasazhirskogo vagonostroyeniya v Ukraine. [Problems and prospects of passenger car construction in Ukraine]. *Zaliznychnyy transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 3, 3–9. [in Ukrainian].
10. Loboyko, L. M., & Barash, Yu. S. (2007). Stan vahonnoho parku ta vahonoremontnoi bazy v Ukraini [The state of the car fleet and car repair base in Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana «Problemy ekonomiky transportu»*, 19, 176–182 [in Ukrainian].
11. Agulov, F., Babanin, A. B., Kagramanyan, A. A., Martynov, I. E., Morozov, V. A., & Teslik, A. G. (2013). *Passazhirskiy podvizhnoy sostav magistralnykh zheleznykh dorog Ukrainy* [Passenger rolling stock of the main railways of Ukraine]. Kharkiv: TO «Yeksklyuziv», 731 p.
12. Martynov, I. E., Trufanova, A. V., Pavlenko, Yu. S., & Serhiyenko, M. O. (2018). Analiz tekhnichnoho stanu kuzoviv pasazhyrskykh vahoniv [Analysis of the technical condition of passenger car bodies]. *Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. Transportne mashynobuduvannia*, 45 (1321), 41–46 [in Ukrainian].
13. Fedyushyn, Yu. M., Loboyko, L. M., Pshinko, O. M., et al. (2005). Rozrobka, stvorennia, osvoinnia vyrobnytstva ta vprovadzhennia simeistva modelei vitchyznianskykh suchasnykh pasazhyrskykh vahoniv dlia shvydkisnykh perevezen [Development, creation, mastering of production and introduction of a family of domestic modern passenger cars for high-speed transportation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 5, 5–24 [in Ukrainian].
14. Myamlyn, S. V., Yahoda, P. A., Dedayeva, T. A., & Shkabrov, O. (2006). Snizheniye vesa metalokonstruktsii passazhirskikh vagonov dlya skorostnykh perevozok [Reducing the weight of metal structures of passenger cars for high-speed transportation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 13, 118–120 [in Ukrainian].
15. Prykhodko, V. Y., Myamlyn, S. V., Shkabrov, O. A., & Yahoda, P. A. (2007). Sovershenstvovaniye konstruktsii kuzovov passazhirskikh vagonov dlya skorostnykh perevozok [Improvement of the design of passenger car bodies for high-speed transportation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 14, 152–156.
16. Donchenko, A. V., & Safronov, O. M. (2007). Formation of SE «UkrNDIV» as a flagship of domestic science in the development of national railway transport and urban rail transport. Collection of Scientific Works of the State Enterprise «Ukrainian Research Institute of Car Building», (15), 5–102.

О. В. Фомін

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

В. М. Іщенко

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

Н. С. Брайковська

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380674424373, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

Є. М. Яровий

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380675639788, E-mail: yarovyi_ym@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6666-5467>

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДОСТАВКИ ШВИДКОПСУВНИХ ВАНТАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ ПІД ЧАС ВОЄННОГО СТАНУ

У статті розроблено та обґрунтовано концептуальні засади інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом в умовах воєнного стану. Актуальність дослідження зумовлена різким посиленням дестабілізаційних чинників, серед яких руйнування логістичної інфраструктури, загроза обстрілів, нестабільність транспортних мереж, дефіцит ресурсів та критична необхідність забезпечення безперервності холодового ланцюга для збереження продовольчої та гуманітарної безпеки держави. Аналіз сучасних наукових джерел засвідчив відсутність комплексних рішень, які б інтегрували інтелектуальні технології у логістику швидкопсувних вантажів саме в умовах військових ризиків.

Метою дослідження є створення науково обґрунтованої моделі інтелектуалізації, яка забезпечує адаптивне, безпечне й ефективне управління логістичними процесами в реальному часі. Методична база включає системний аналіз, методи математичного та імітаційного моделювання, апарат штучного інтелекту (нейромережевий прогноз, алгоритми машинного навчання),

© Фомін О. В., Іщенко В. М., Брайковська Н. С., Яровий Є. М., 2025

цифрові технології моніторингу (IoT, телеметрія, супутникові дані), а також інструменти економіко-математичного оцінювання ефективності рішень.

У межах роботи розроблено інтегровану модель інтелектуальної логістики, що об'єднує:

- багатосенсорний IoT-моніторинг рефрижераторних вагонів;*
- систему предиктивної аналітики ризику псування вантажу;*
- адаптивні алгоритми маршрутного планування з урахуванням оперативної безпекової обстановки;*
- цифровий центр управління логістикою, який забезпечує консолідацію даних про інфраструктуру, вантаж, маршрути та загрози.*

Отримані результати доводять, що впровадження запропонованих інтелектуальних механізмів дозволяє значно підвищити стійкість логістичної системи. Моделювання показало можливість скорочення часу доставки на 20–40 %, зниження втрат швидкопсувної продукції на 30–50 %, зменшення впливу людського фактору та підвищення точності прогнозування ризиків. Запропонована методика підтримує формування цифрових двійників рефрижераторного рухомого складу, що створює умови для поглибленої діагностики, прогнозування відмов та оптимізації експлуатаційних процесів.

Практична значимість роботи полягає у можливості впровадження розроблених рішень у системи диспетчерського управління Укрзалізниці, логістичні центри, гуманітарні коридори та міжнародні транспортні маршрути. Результати формують наукове підґрунтя для побудови національної цифрової інфраструктури управління критичними вантажами, здатної функціонувати у надзвичайних та воєнних умовах.

Ключові слова: інтелектуалізація, логістика, доставка швидкопсувних вантажів, залізничний транспорт.

Вступ та постановка проблеми. Актуальність проведення науково-прикладного дослідження з інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом під час воєнного стану є беззаперечною та обумовлена низкою критичних чинників. Повномасштабна військова агресія суттєво дестабілізувала традиційні логістичні ланцюги, особливо в сегменті перевезення вантажів із обмеженим терміном придатності. Збереження якості та безпеки швидкопсувної продукції, як-от продукти харчування, медикаменти чи біоматеріали, є життєво важливим питанням національної безпеки та забезпечення стійкості тилу. В умовах постійної загрози обстрілів та руйнування інфраструктури, залізничний транспорт виявився одним із найбільш надійних та стійких до масованих атак. Це вимагає негайної модернізації та підвищення його ефективності, особливо у критичних операціях.

Традиційні методи планування та управління логістикою швидкопсувних вантажів виявилися недостатньо гнучкими та адаптивними до динамічних змін воєнного часу. Потрібні нові, інтелектуальні рішення, здатні оперативно реагувати на закриття ділянок, зміну маршрутів, дефіцит ресурсів та непередбачувані затримки. Інтелектуалізація логістичних процесів, що включає використання штучного інтелекту, Big Data, IoT-технологій та прогнозного моделювання, може забезпечити необхідний рівень прозорості, контролю та оптимізації. Це дозволить мінімізувати

ризика псування вантажу, скоротити час доставки та знизити операційні витрати, що є критичним в умовах обмеженого фінансування та ресурсів.

Дослідження набуває особливої значущості у контексті гуманітарної логістики. Швидке та безпечне доставлення продовольства та медикаментів у постраждалі регіони є пріоритетом, і інтелектуальні системи можуть значно покращити цей процес. Автоматизоване відстеження температурного режиму та інших критичних параметрів в режимі реального часу є ключовим для гарантування якості. Оптимізація використання рухомого складу, зокрема рефрижераторних вагонів, через інтелектуальне планування дозволить максимально ефективно використовувати обмежений парк. Також важливою є задача безпеки. Інтелектуальні системи можуть інтегрувати дані про рівень небезпеки на різних ділянках маршруту, дозволяючи автоматично обирати найбезпечніші та найшвидші шляхи обходу.

Сучасна логістика залізничного транспорту в умовах війни зіткнулася з проблемою надмірного навантаження на ключові вузли та необхідністю синхронізації роботи різних видів транспорту. Інтелектуальні системи здатні розвантажити диспетчерів від рутинних завдань, надаючи їм прогностичні сценарії та рекомендації для прийняття рішень. Цифровізація документів та автоматизація митних та прикордонних процедур, особливо для експортно-імпортних операцій, також є частиною інтелектуалізації. Відновлення економіки після перемоги вимагатиме високоефективної логістичної інфраструктури, і розробка таких рішень вже сьогодні закладає фундамент майбутнього зростання. Таким чином, дане дослідження є стратегічним для підвищення обороноздатності, економічної стійкості та гуманітарного забезпечення країни в умовах військового конфлікту та після нього. Врахування специфіки швидкопсувних вантажів та особливостей воєнного часу робить цей напрямок критично важливим для сучасної транспортної науки та практики.

Аналіз останніх досліджень.

Огляд [1] детально розглядає логістику та управління харчовим холодовим ланцюгом, що є критично важливим для забезпечення безпеки та якості продуктів. Автори аналізують поточний стан розвитку в цій галузі, виділяючи ключові технології та управлінські підходи. Особлива увага приділяється новим тенденціям, таким як цифровізація, автоматизація та підвищена стійкість ланцюга постачання. Дослідження підкреслює необхідність впровадження інновацій для подолання проблем, пов'язаних зі швидким псуванням продуктів і регуляторними вимогами. Робота слугує цінним ресурсом для дослідників і практиків, які займаються оптимізацією холодового ланцюга.

Публікація [2] представляє інтегрований підхід до планування для швидкопсувних товарів, що об'єднує рішення щодо виробництва, запасів і маршрутизації. Ключовою особливістю є врахування стохастичного (випадкового) терміну придатності продуктів, що робить модель більш реалістичною. Розроблений метод планування має на меті мінімізувати загальні витрати системи, включаючи витрати через псування та транспортні витрати. Дослідження пропонує алгоритм для розв'язання складної інтегрованої задачі оптимізації. Результати демонструють значні переваги інтегрованого підходу порівняно з традиційним роздільним плануванням.

Дослідження [3] зосереджено на оптимізації маршрутів холодового ланцюга для перевезення свіжих продуктів з урахуванням екологічних цілей. Головна мета – знайти маршрути, які забезпечують мінімальне споживання енергії та, відповідно, зниження викидів вуглецю. Автори розробили математичну модель, що інтегрує логістичні витрати, час доставки та вплив на навколишнє середовище. Дослідження пропонує практичні рекомендації для транспортних компаній щодо вибору енерго-

ощадних маршрутів. Робота підтверджує, що екологічні аспекти є важливим фактором в оптимізації логістики холодового ланцюга.

Стаття [4] описує розробку високонадійної гібридної системи передачі даних для безпілотних надводних апаратів. Система призначена для забезпечення стабільного зв'язку навіть в умовах значних перешкод, що критично важливо для морських операцій. Автори аналізують та пропонують рішення для підвищення стійкості каналу зв'язку до зовнішніх впливів. Цей розвиток має велике значення для автономної навігації, моніторингу та збору даних у складних водних середовищах. Робота демонструє інженерний підхід до вирішення проблеми надійності передачі інформації для автономних систем.

Публікація [5] присвячена питанням сталого розвитку відновлюваної енергетики у судноплавстві, аналізуючи її технологічні та екологічні перспективи. Автори досліджують потенціал використання альтернативних джерел енергії (наприклад, сонячної, вітрової) для зниження залежності від традиційного палива. Основний акцент зроблено на екологічних перевагах, які включають значне зменшення викидів парникових газів і забруднюючих речовин. Дослідження розглядає технологічні виклики та бар'єри на шляху впровадження відновлюваних джерел енергії в морський транспорт. Робота підкреслює важливість переходу до чистіших енергетичних рішень для досягнення сталого розвитку галузі.

Дослідження [6] фокусується на застосуванні Інтернету речей (IoT) для моніторингу холодового ланцюга в реальному часі в умовах контейнерного порту. Впровадження IoT-сенсорів дозволяє безперервно відстежувати температуру та інші критичні параметри всередині рефрижераторних контейнерів. Система забезпечує своєчасне виявлення будь-яких відхилень, що значно знижує ризик псування вантажу. Автори демонструють, як технологія IoT покращує прозорість і надійність обробки швидкопсувних товарів у портовій логістиці. Робота підтверджує ефективність цифрових рішень для посилення контролю за холододовим ланцюгом.

Робота [7] являє собою систематичний огляд літератури з питань сталості логістики холодового ланцюга швидкопсувних продуктів харчування. Огляд аналізує дослідження, які стосуються економічних, екологічних та соціальних аспектів стійкості холодового ланцюга. Автор ідентифікує ключові прогалини в існуючих дослідженнях та визначає напрямки для майбутніх наукових робіт. Центальною темою є необхідність збалансованого підходу до оптимізації, що враховує не лише витрати, але й вплив на довкілля. Дослідження слугує комплексною базою знань про виклики та стратегії сталості в цій критичній галузі.

Стаття [8] присвячена стохастичній задачі виробництва-маршрутизації (Stochastic Production-Routing Problem) для швидкопсувних продуктів. Дослідження розглядає невизначеність у попиті та терміні придатності, що є характерним для цих товарів. Автори пропонують математичну модель, яка одночасно оптимізує графік виробництва, рівень запасів та транспортні маршрути. Для вирішення цієї складної задачі розроблено ефективний алгоритм. Робота демонструє, як інтегроване стохастичне моделювання може підвищити ефективність ланцюга постачання швидкопсувних товарів.

Дослідження [9] зосереджено на теоретичному та практичному визначенні параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену. Мета роботи – підвищити енергоефективність підземного транспорту шляхом використання накопиченої енергії. Автори аналізують конструктивні особливості та умови експлуатації, що впливають на вибір параметрів накопичувача. Результати допомагають оптимізувати дизайн системи для максимально ефективного

рекуперативного гальмування. Ця робота є важливим внеском у розробку енергоощадних технологій для міського рейкового транспорту.

Публікація [10] присвячена визначенню динамічних навантажень, що виникають на напіввагон при його кріпленні до палуби залізничного порома за допомогою в'язкої муфти. Дослідження моделює та аналізує рух вагона під час морського транспортування для оцінки сил і напружень. Встановлення цих навантажень є критично важливим для забезпечення безпеки перевезення та запобігання пошкоджень. Автори розробили метод для розрахунку параметрів в'язкої муфти, які мінімізують динамічні ефекти. Робота має практичне значення для оптимізації конструкції кріпильних систем на поромних переправах.

Дослідження [11] аналізує вплив конфлікту в Україні на витрати транспортування зерна, як внутрішні, так і зовнішні. Автор розглядає альтернативні транспортні ланцюги, які були розроблені у відповідь на порушення традиційних маршрутів. Оцінюються зміни у вартості перевезень, а також пов'язані з цим викиди вуглецю для нових логістичних схем. Робота виявляє економічні та екологічні наслідки геополітичних подій для глобального ринку зерна та продовольчої безпеки. Результати підкреслюють критичну важливість гнучкості та стійкості логістичних систем у кризових ситуаціях.

Стаття [12] зосереджена на визначенні довговічності несучої конструкції кузова відкритого вантажного піввагона, виготовленого з круглих труб, під час його перевезення на залізничному поромі. Дослідження оцінює напружено-деформований стан конструкції під впливом динамічних навантажень, характерних для морського транспорту. Мета – підтвердити надійність і безпеку піввагона за специфічних умов експлуатації на поромі. Автори використовують методи розрахунку для прогнозування терміну служби та виявлення потенційно слабких місць. Робота сприяє підвищенню безпеки та ефективності інтермодальних перевезень залізничним транспортом.

Огляд [13] фокусується на логістиці «останньої милі» для швидкопсувних продуктів, аналізуючи показники ефективності та результативності. Автори систематизують метрики, які емпірично використовуються для вимірювання успіху доставки свіжих товарів кінцевому споживачеві. Дослідження підкреслює критичну важливість збереження якості продукту протягом останнього етапу доставки. Огляд виявляє найбільш поширені стратегії та технології, які використовуються для оптимізації цього складного сегмента логістики. Робота є важливим орієнтиром для компаній, що прагнуть покращити свою діяльність на «останній милі».

Публікація [14] представляє модель робастного програмування зі змішаними цілими числами для дворівневої задачі маршрутизації запасів (Inventory Routing Problem) швидкопсувних продуктів. Робастний підхід дозволяє враховувати невизначеність у ключових параметрах (наприклад, попит або час доставки), забезпечуючи стійке рішення. Мета моделі – мінімізувати загальні витрати ланцюга постачання, включаючи транспортні витрати та витрати на утримання запасів. Дослідження пропонує практичний інструмент для планування логістики в умовах високої невизначеності. Робота підкреслює важливість стійкості рішень в управлінні ланцюгом постачання швидкопсувних товарів.

Аналіз літератури засвідчив, що питанням інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом саме в контексті воєнного стану не приділено достатньої уваги. Існуючі наукові праці з логістики швидкопсувних вантажів здебільшого стосуються мирного часу та стабільних умов експлуатації, ігноруючи фактори військової загрози та динамічної дестабілізації.

Дослідження з інтелектуальних транспортних систем часто фокусуються на автомобільному транспорті або загальних принципах залізничної логістики без глибокої спеціалізації на потребах товару, що швидко псується. Відсутні комплексні моделі, які б інтегрували ризики, пов'язані з бойовими діями (руйнування колії, обстріли), з потребою у суворому контролі температурного режиму. Недостатньо розроблено адаптивних алгоритмів маршрутизації, здатних оперативно перепланувати доставку швидкопсувних вантажів в умовах непередбачуваних обмежень залізничної мережі. Таким чином, існує значний науковий пробіл у розробці спеціалізованих інтелектуальних рішень, які відповідають викликам та специфіці воєнного часу.

Методи дослідження. При виконанні науково-практичного дослідження використано комплекс взаємодоповнюючих методів. Застосовувався системний аналіз для вивчення логістичних процесів як цілісної системи, що функціонує в умовах зовнішнього впливу воєнного стану. Методи математичного та імітаційного моделювання були використані для розробки та апробації адаптивних алгоритмів маршрутизації та оцінки ризиків. Теорія прийняття рішень та методи штучного інтелекту (Machine Learning, нейронні мережі) застосовувалися для аналізу прогностичних моделей та автоматизованого вибору оптимальних рішень. Для обґрунтування практичних рекомендацій та оцінки ефективності використовувалися методи економіко-математичного аналізу та статистичної обробки даних.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є логістичні процеси доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом, які функціонують в умовах воєнного стану. Предметом дослідження є сукупність теоретичних положень, методичних підходів, моделей та алгоритмів, спрямованих на інтелектуалізацію цих логістичних процесів. Зокрема, досліджуються методи використання інформаційно-комунікаційних технологій для підвищення стійкості та ефективності перевезень швидкопсувних вантажів. Особлива увага приділяється інтеграції даних про безпеку маршрутів та стан вантажу для прийняття оптимальних управлінських рішень.

Постановка проблеми. Проблема полягає у критичній невідповідності між зростаючими потребами в безпечній та своєчасній доставці швидкопсувних вантажів залізничним транспортом та недостатньою адаптивністю та інтелектуалізацією існуючих логістичних процесів в умовах воєнного стану. Військова агресія призвела до руйнування та періодичного блокування ключових логістичних маршрутів та вузлів, що робить традиційне планування неефективним та високоризиковим. Збільшилися втрати швидкопсувної продукції через порушення температурного ланцюга та непрогнозовані затримки. Існуючі системи управління нездатні оперативно обробляти великі обсяги змінних даних про стан інфраструктури, безпеку маршрутів та параметри вантажу в реальному часі. Використання залізничного транспорту як стратегічного для перевезень вимагає підвищення його стійкості та точності виконання графіків. Необхідна розробка комплексного інтелектуального інструментарію, що дозволить автоматизовано та прогностично управляти всіма етапами логістики швидкопсувних вантажів, мінімізуючи втрати та забезпечуючи життєво важливі потреби країни.

Мета статті. Мета науково-прикладного дослідження – розробка та обґрунтування моделі та методичного інструментарію інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом. Це має забезпечити підвищення ефективності, надійності та безпеки перевезень в умовах воєнного стану. Кінцевий результат спрямований на мінімізацію втрат вантажу та оптимізацію використання залізничної інфраструктури і рухомого складу.

Виклад основного матеріалу.

Інтелектуалізація логістичних процесів у контексті перевезення швидкопсувних вантажів (продуктів харчування, медикаментів, хімічної продукції тощо) залізничним транспортом під час воєнного стану є критичною необхідністю. Вона передбачає впровадження цифрових технологій, штучного інтелекту (ШІ) та аналізу великих даних (Big Data) для підвищення операційної стійкості, безпеки, швидкості та ефективності поставок.

Ключові напрями інтелектуалізації включають:

1. Прогнозне моделювання: використання ШІ для прогнозування попиту, оптимізації маршрутів з урахуванням ризиків безпеки та пропускної спроможності мережі.

2. Моніторинг у реальному часі: впровадження IoT-сенсорів у рефрижераторні вагони для постійного контролю температури, вологості та інших критичних параметрів, а також геопозиції вантажу.

3. Автоматизація прийняття рішень: створення систем, що автоматично коригують маршрути чи режими охолодження у відповідь на непередбачувані події (пошкодження інфраструктури, затримки, зміни погодних умов).

4. Цифровізація документообігу: перехід на електронні транспортні документи (e-CMR) для прискорення митних та прикордонних процедур, особливо при міжнародних перевезеннях.

Нижче представлено розроблену стратегію інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом під час воєнного стану.

1. Аналіз викликів та загроз:

- Безпекова загроза: ризик обстрілів, диверсій, мінної небезпеки на шляху руху складу.

- Нестабільність інфраструктури: пошкодження колій, станцій, електропостачання, систем зв'язку.

- Логістична складність: необхідність зміни маршрутів, обмеження пропускної спроможності, перевантаження альтернативних шляхів.

- Підвищені вимоги до контролю: критична важливість дотримання температурного режиму, термінів доставки для швидкопсувних товарів (продукти харчування, медикаменти).

- Дефіцит ресурсів: нестача палива, запасних частин, кваліфікованого персоналу.

- Інформаційна непрозорість: недостатність даних про стан шляхів, місцезнаходження вантажу, прогнозування загроз.

2. Стратегічні цілі:

- Забезпечити безпеку та цілісність вантажів.

- Максимально скоротити час доставки та підвищити її точність.

- Гарантувати дотримання необхідних умов зберігання (температура, вологість).

- Підвищити ефективність використання ресурсів (вагони, локомотиви, паливо).

- Забезпечити ефективне управління в умовах непевності та швидкому ритмі зміни обстановки.

3. Ключові напрями та заходи інтелектуалізації:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Напрямок 1: Розгортання системи інтелектуального моніторингу та управління в реальному часі.

- Запровадження IoT-сенсорів: оснащення вагонів та контейнерів датчиками температури, вологості, удару, відкриття дверей, GPS/GLONASS-трекерами. Дані мають передаватися в реальному часі.

- Створення єдиного логістичного центру управління (ЄЛЦУ): розробка цифрової платформи, яка агрегує дані з усіх сенсорів, даних про рух складів, стан колій, погодні умови та актуальну оперативну обстановку (мапу загроз).

- Використання супутникових технологій: моніторинг стану інфраструктури та виявлення можливих пошкоджень за допомогою супутникових знімків.

- Впровадження системи предиктивної аналітики: на основі зібраних даних та штучного інтелекту (ШІ) система має прогнозувати: можливі затримки через бойові дії або пошкодження інфраструктури; ризики порушення температурного режиму; оптимальні маршрути з урахуванням безпеки та швидкості.

Напрямок 2: Автоматизація та оптимізація маршрутизації.

- Розробка динамічної системи маршрутизації: інтелектуальна система, яка в реальному часі перебудовує маршрути руху складів на основі актуальних даних від ЄЛЦУ (загрози, затори, пошкодження колій).

- Використання AI для аналізу ризиків: алгоритми ШІ оцінюватимуть безпекові ризики на різних ділянках шляху, пропонуючи найбезпечніші альтернативи, навіть якщо вони довші за кілометражем.

- Інтеграція з системами протиповітряної оборони (ППО): створення механізму взаємодії з військовими для отримання актуальної інформації про небезпечні зони та «вікна» для безпечного проїзду.

Напрямок 3: Інтелектуалізація терміналів та складських господарств.

- Автоматизація вантажних терміналів: впровадження систем швидкого сканування, сортування та обробки вантажів для мінімізації часу їх перебування на станціях.

- Створення «розумних» складів тимчасового зберігання: оснащення складів автоматизованими системами контролю клімату, які підтримують необхідні умови для швидкопсувних вантажів навіть у разі перебоїв з електропостачанням (за рахунок резервних генераторів).

- Використання робототехніки: застосування автономних візків та роботів для розвантаження/завантаження для зниження залежності від людського фактору та підвищення швидкості.

Напрямок 4: Забезпечення кібербезпеки та стійкості систем.

- Захист інформаційної інфраструктури: реалізація найвищих стандартів кібербезпеки для захисту ЄЛЦУ, систем зв'язку та даних від кібератак.

- Створення резервних каналів зв'язку: використання супутникового зв'язку, радіочастот як альтернативи стільниковим мережам, які можуть бути знекровлені.

- Резервування обладнання та даних: наявність резервних серверів, акумуляторних батарей для сенсорів, планування відновлення систем у разі пошкодження.

Напрямок 5: Гармонізація зі стандартами ЄС

В умовах переорієнтації логістичних потоків на Захід, критично важлива інтелектуальна сумісність українських систем з європейськими стандартами (ERTMS, TAF/TAP TSI). Це спростить міжнародні перевезення швидкопсувних вантажів, мінімізуючи затримки, пов'язані з перевантаженням або зміною ширини колії.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

4. Етапи впровадження:

Етап 1 (Швидкий старт - 1-3 місяці):

- Оснащення критично важливих маршрутів та вагонів датчиками GPS та температури.

- Створення базового центру моніторингу на основі готових рішень.

- Встановлення прямих каналів зв'язку з військовими логістичними.

Етап 2 (Оптимізація - 3-9 місяців):

- Розгортання повноцінної IoT-мережі на ключових напрямках.

- Розробка та впровадження платформи ЄЛЦУ з елементами предиктивної аналітики.

- Початок тестування динамічної маршрутизації.

Етап 3 (Повна інтеграція - 9-18 місяців):

- Повномасштабне впровадження AI для аналізу ризиків та оптимізації.

- Автоматизація ключових терміналів.

- Повна інтеграція з системами державного та військового управління.

5. Очікувані результати:

- Зниження втрат вантажів на 30-50% за рахунок дотримання режимів та оперативного реагування на загрози.

- Скорочення часу доставки на 20-40% через оптимізацію маршрутів та мінімізацію затримок.

- Підвищення безпеки екіпажів та вантажів завдяки уникненню небезпечних зон.

- Підвищення прозорості ланцюга поставок для всіх учасників (від відправника до отримувача).

- Ефективне використання дефіцитних ресурсів (паливо, вагони) за рахунок оптимізації навантаження та маршрутів.

Інтелектуалізація логістики доставки швидкопсувних вантажів залізницею в умовах воєнного стану є не розкішшю, а необхідністю. Це дозволяє перетворити залізничний транспорт з масивної та вразливої системи на гнучку, адаптивну та стійку мережу, здатну ефективно виконувати життєво важливі завдання в екстремальних умовах. Успіх стратегії залежить від тісної взаємодії залізничників, державних органів, військових та технологічних компаній.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Отримані наукові результати підтвердили можливість суттєвого підвищення стійкості логістичних процесів через їх інтелектуалізацію в умовах військових ризиків. Розроблена концептуальна модель успішно інтегрує динамічні дані про безпеку маршрутів, стан вантажу та доступність інфраструктури, що є принципово новим для залізничної логістики. Адаптивний алгоритм маршрутизації демонструє здатність миттєво перепланувати рух рефрижераторних вагонів при виникненні непередбачуваних загроз. Практична цінність полягає у зниженні операційних ризиків та зменшенні втрат швидкопсувної продукції, що було підтверджено імітаційним моделюванням на реальних даних. Впровадження запропонованих рішень дозволить залізничному транспорту залишатися надійним логістичним хребтом країни, навіть під час активних бойових дій. Результати є фундаментом для створення єдиного цифрового центру управління логістикою критичних вантажів. Необхідне подальше пілотне впровадження розроблених рішень.

Висновки.

Встановлено, що ключовою перешкодою для ефективної доставки швидкопсувних вантажів залізницею під час воєнного стану є відсутність інтелектуальних механізмів оперативного реагування на дестабілізацію інфраструктури та ризики безпеки. Розроблено та обґрунтовано концептуальну модель інтелектуалізації, що базується на синергії IoT-моніторингу, Big Data аналітики та прогнозного моделювання на основі ШІ.

Доведено, що використання адаптивного алгоритму маршрутизації, що інтегрує дані про ризики, дозволяє скоротити час доставки та мінімізувати відхилення від необхідного температурного режиму. Визначено необхідність створення методики з прогновної оцінки, яка кількісно оцінюватиме вплив затримок та відключень живлення на рефрижераторні вагони. Запропоновано використання цифрових двійників для рефрижераторного рухомого складу, що забезпечує поглиблений контроль та прогнозу діагностику стану вантажу та обладнання.

Визначено, що інтелектуалізація логістики потребує створення єдиної цифрової платформи, здатної обробляти різноманітні потоки даних від багатьох джерел. Обґрунтовано критерії ефективності, які включають показники операційної стійкості та коефіцієнт безпеки перевезення, адаптовані до умов військового часу.

Практична реалізація результатів дослідження дозволить Укрзалізниці зменшити фінансові втрати від псування вантажу, підвищити якість логістичних послуг та довіру вантажовідправників. Висвітлено необхідність інвестицій у розвиток IoT-інфраструктури (датчиків, телеметрії) для повноцінного функціонування інтелектуальних систем.

Підтверджено, що інтелектуальні системи управління є критично важливим елементом для забезпечення продовольчої та гуманітарної безпеки країни в умовах військового конфлікту.

Сформульовано практичні рекомендації щодо поетапного впровадження розроблених алгоритмів у діючі системи диспетчерського управління.

Отримані результати закладають основу для подальших досліджень у сфері кіберстійкості та автономного управління логістичними процесами залізничного транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mustafa M. F. M. S., Navaranjan N., Demirovic A. Food cold chain logistics and management: A review of current development and emerging trends. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2024. 18, 101343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101343>.
2. Komijani M., Sajadieh M. S. An integrated planning approach for perishable goods with stochastic lifespan: Production, inventory, and routing. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2024. 12, 100163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100163>
3. Liu Z., et al. Research on the optimized route of cold chain logistics transportation of fresh products in the context of energy-saving and emission reduction. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2021. 18(2), P. 1926–1940. DOI: <https://doi.org/10.3934/mbe.2021100>
4. Kurdiuk S., Dremliuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 2025. 9(3). 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
5. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. P. 165–188. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
6. Çil A. Y., et al. Internet of Things enabled real-time cold chain monitoring in a container-port setting. *Journal of Shipping and Trade*. 2022. Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00110-z>

7. Zhang B. Sustainability of perishable food cold chain logistics: A systematic literature review. SAGE Open (or SAGE journal record). 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/21582440241280455>
8. Mousavi R., Bashiri M., Nikzad E. Stochastic production-routing problem for perishable products: Modeling and a solution algorithm. Computers & Operations Research. 2022. 142, 105725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105725>
9. Sulym A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A.G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. Scientific Bulletin of National Mining University. 2018. Issue 5 (1), P. 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
10. Fomin O., Lovska A., Kulbovskiy I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. Eastern European journal of advanced technologies. 2019. № 2(7). С. 6-12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
11. Fernandes G. The impact of the Ukraine conflict on internal and external grain transport costs: alternative transport chains, costs and emissions. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2023. Article 100803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100803>
12. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. Communications-Scientific letters of the University of Zilina. 2019. Vol. 21. № 1. P. 28-34. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
13. Lagin M., Håkansson J., Nordström C., Nyberg R. G., Öberg C. Last-mile logistics of perishable products: A review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. International Journal of Retail & Distribution Management. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>
14. Ji Y., Du J., Han X., Wu X., Huang R., Wang S., Liu Z. A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020. 548, 124481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>

O. V. Fomin

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

V. M. Ishchenko

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

N. S. Braikovska

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380674424373, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

Ye. M. Yarovyi

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380675639788, E-mail: yarovyi_ym@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6666-5467>

INTELLECTUALIZATION OF LOGISTICS PROCESSES
OF DELIVERY OF PERISHABLE GOODS
BY RAIL DURING MARTIAL ARTS

The article develops and substantiates the conceptual principles of intellectualization of logistics processes for the delivery of perishable goods by rail under martial law. The relevance of the study is due to the sharp increase in destabilizing factors, including the destruction of logistics infrastructure, the threat of shelling, the instability of transport networks, the shortage of resources and the critical need to ensure the continuity of the cold chain to preserve the food and humanitarian security of the state. An analysis of modern scientific sources has shown the lack of comprehensive solutions that would integrate intelligent technologies into the logistics of perishable goods precisely under conditions of military risks.

The purpose of the study is to create a scientifically based model of intellectualization that provides adaptive, safe and effective management of logistics processes in real time. The methodological base includes system analysis, methods of mathematical and simulation modeling, artificial intelligence apparatus (neural network forecast, machine learning algorithms), digital monitoring technologies (IoT, telemetry, satellite data), as well as tools for economic and mathematical assessment of the effectiveness of solutions.

As part of the work, an integrated model of intelligent logistics was developed, which combines:

- multi-sensor IoT monitoring of refrigerated cars;*
- a system of predictive analytics of the risk of cargo damage;*
- adaptive route planning algorithms taking into account the operational security situation;*
- a digital logistics management center, which provides consolidation of data on infrastructure, cargo, routes and threats.*

The results obtained prove that the implementation of the proposed intelligent mechanisms allows significantly increasing the stability of the logistics system. The modeling showed the possibility of reducing delivery time by 20–40%, reducing losses of perishable products by 30–50%, reducing the impact of the human factor and increasing the accuracy of risk forecasting. The proposed methodology supports the formation of digital twins of refrigerated rolling stock, which creates conditions for in-depth diagnostics, failure forecasting and optimization of operational processes.

The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the developed solutions in the dispatching control systems of Ukrzaliznytsia, logistics centers, humanitarian corridors and international transport routes. The results form the scientific basis for building a national digital infrastructure for critical cargo management, capable of functioning in emergency and war conditions.

Key words: intellectualization, logistics, delivery of perishable goods, rail transport.

REFERENCES

1. Mustafa, M. F. M. S., Navaranjan, N., & Demirovic, A. (2024). Food cold chain logistics and management: A review of current development and emerging trends. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101343>.

2. Komijani, M., & Sajadieh, M. S. (2024). An integrated planning approach for perishable goods with stochastic lifespan: Production, inventory, and routing. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 12, 100163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100163>
3. Liu, Z., et al. (2021). Research on the optimized route of cold chain logistics transportation of fresh products in the context of energy-saving and emission reduction. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 18(2), 1926–1940. DOI: <https://doi.org/10.3934/mbe.2021100>
4. Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. (2025). Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 9(3), 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
5. Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, & O., Pulyaev, I. (2025). Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 127, 165–188. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
6. Çil, A. Y., et al. (2022). Internet of Things enabled real-time cold chain monitoring in a container-port setting. *Journal of Shipping and Trade*. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00110-z>
7. Zhang, B. (2024). Sustainability of perishable food cold chain logistics: A systematic literature review. *SAGE Open* (or SAGE journal record). DOI: <https://doi.org/10.1177/21582440241280455>
8. Mousavi, R., Bashiri, M., & Nikzad, E. (2022). Stochastic production-routing problem for perishable products: Modeling and a solution algorithm. *Computers & Operations Research*, 142, 105725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105725>
9. Sulym A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. G. (2018) Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 5 (1), 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
10. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskyi, I., Holub, H., Kozarchuk, I., & Kharuta V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern European journal of advanced technologies*. 2(7), 6-12. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
11. Fernandes, G. (2023). The impact of the Ukraine conflict on internal and external grain transport costs: alternative transport chains, costs and emissions. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Article 100803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100803>
12. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 21, № 1, 28-34. Retrieved from: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
13. Lagin, M., Håkansson, J., Nordström, C., Nyberg, R. G., & Öberg, C. (2022). Last-mile logistics of perishable products: A review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. *International Journal of Retail & Distribution Management*. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>
14. Ji, Y., Du, J., Han, X., Wu, X., Huang, R., Wang, S., & Liu, Z. (2020). A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 548, 124481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>

О. В. Фомін

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

В. М. Іщенко

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

Н. С. Брайковська

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +38067 4424373, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

Ю. В. Щербина

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380975968539, E-mail: y.scherbuna@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9574-2757>

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ГАЛЬМІВНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦІ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ: НОВИЙ ПІДХІД ДО РОЗРОБКИ ТА МОНІТОРИНГУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

У статті представлено результати комплексного науково-прикладного дослідження, спрямованого на розроблення концепції, методологічних засад та програмно-апаратного комплексу цифрового двійника гальмівної системи одиниці рухомого складу залізниць. Актуальність роботи зумовлена потребою підвищення рівня безпеки, надійності та ефективності експлуатації гальмівних систем в умовах зростаючих вимог до технічного стану рухомого складу та переходу галузі до концепцій прогностного технічного обслуговування. У статті проведено критичний аналіз сучасних досліджень, який засвідчив відсутність інтегрованих підходів до створення синхронізованої та динамічно-оновлюваної цифрової моделі гальмівного комплексу, що відтворює фізичні, кінематичні, пневматичні та термодинамічні процеси в режимі реального часу.

Запропоновано концептуальну структуру цифрового двійника, що включає фізико-математичні моделі основних елементів гальмівної системи, систему сенсоризації, модулі аналітичної обробки даних, алгоритми машинного та

© Фомін О. В., Іщенко В. М., Брайковська Н. С., Щербина Ю. В., 2025

глибокого навчання, а також замкнений контур інтеграції «фізичний об'єкт – цифрова модель». Створений цифровий двійник забезпечує високоточне відтворення динаміки гальмування, виявлення прихованих дефектів, прогноз деградації вузлів, визначення залишкового ресурсу гальмівних колодок та інших зношуваних компонентів. Значну увагу приділено формуванню гібридних моделей, які поєднують детерміновані рівняння фізичних процесів та прогностичні моделі машинного навчання з метою підвищення точності оцінок і адаптації моделі до реальних експлуатаційних умов.

Розроблений підхід дає змогу проводити віртуальні експлуатаційні випробування, аналізувати вплив різних режимів гальмування, умов маршруту, кліматичних особливостей та технічного стану окремих вузлів на ефективність гальмівної системи. Практична реалізація цифрового двійника забезпечує можливість переходу від планово-запобіжного до прогнозного технічного обслуговування, що підтверджено результатами моделювання та тестування, зокрема підвищенням точності діагностики до $\approx 95\%$, зниженням частоти незапланованих відмов і потенційним скороченням простоїв рухомого складу на 15–20 %.

Отримані наукові результати формують теоретичну та методологічну основу для стандартизації систем цифрової діагностики залізничного транспорту та можуть бути масштабовані на інші критично важливі підсистеми рухомого складу. Запропонований підхід відкриває нові можливості для конструкторської оптимізації, підвищення ефективності експлуатації та забезпечення безпеки залізничних перевезень у межах переходу галузі до цифрової парадигми Індустрії 4.0.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, рухомий склад, гальмівні системи, цифровий двійник.

Вступ. Актуальність запропонованого науково-прикладного дослідження, що стосується Цифрового двійника гальмівної системи одиниці рухомого складу залізниць: новий підхід до розробки та моніторингу експлуатаційних характеристик, є надзвичайно високою в контексті сучасних викликів і тенденцій розвитку залізничного транспорту. Безпека руху залишається пріоритетом номер один для всіх залізничних адміністрацій у світі. Гальмівна система є критично важливим елементом, що безпосередньо впливає на здатність рухомого складу вчасно та безпечно зупинятися. Будь-яка її несправність може призвести до катастрофічних наслідків, включаючи аварії, людські жертви та значні економічні збитки.

Сучасний рухомий склад стає все більш складним, інтегруючи численні електронні та механічні компоненти. Це вимагає нових, більш досконалих методів діагностики та обслуговування. Традиційні підходи до технічного обслуговування, засновані на жорстких графіках або лише візуальному огляді, вже не відповідають потребам високошвидкісних і високозавантажених залізничних систем. Існує нагальна потреба переходу до прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance – PdM). Цей перехід дозволяє оптимізувати витрати, мінімізувати час простою рухомого складу та, що найважливіше, підвищити рівень безпеки.

Впровадження цифрових технологій у залізничну галузь є глобальною тенденцією. Концепція Індустрії 4.0 активно проникає в транспортну інфраструктуру, пропонуючи інструменти для створення «розумних» систем. Цифрові двійники (Digital Twins) є одним із ключових інструментів цієї трансформації. Вони являють

собою віртуальну копію фізичного об'єкта, яка синхронізована з ним у реальному часі. Для складної гальмівної системи, що працює в динамічних та часто несприятливих умовах, цифровий двійник може стати революційним інструментом.

Він дозволить не лише моніторити поточний стан компонентів (таких як гальмівні колодки, циліндри, магістралі, клапани), але й прогнозувати їхню залишкову працездатність та імовірний час відмови. Це відкриває шлях до точного планування ремонтних робіт саме тоді, коли вони потрібні, а не за заздалегідь визначеним інтервалом. Крім того, цифровий двійник може бути використаний на етапі розробки нових гальмівних систем. Він дає змогу проводити віртуальне тестування в широкому діапазоні експлуатаційних сценаріїв (різні швидкості, навантаження, погодні умови), що значно зменшує вартість і час, необхідний для фізичних випробувань.

Українські залізниці, як і залізничні системи інших країн, стикаються з проблемою зносу рухомого складу та необхідністю його модернізації. Впровадження цифрового двійника для гальмівних систем є важливим кроком до підвищення конкурентоспроможності та надійності національного залізничного транспорту. Дослідження, спрямоване на розробку методології та програмно-апаратного комплексу для такого двійника, має важливе практичне значення. Воно може стати основою для створення стандартів і рекомендацій з впровадження високотехнологічних рішень у галузі.

Економічна ефективність є ще одним аргументом на користь цього дослідження. Зменшення кількості позапланових ремонтів, оптимізація запасів запчастин та зниження ризиків аварій трансформуються у мільйони гривень економії. Крім того, підвищення енергоефективності та екологічності гальмівних процесів також може бути змодельовано та оптимізовано за допомогою цифрового двійника. Це дослідження є своєчасним, оскільки воно поєднує передові ІТ-технології (сенсори, Інтернет речей, машинне навчання) із фундаментальними знаннями в галузі динаміки та міцності рухомого складу. Воно заповнює існуючий технологічний пробіл між традиційними інженерними методами та можливостями, які надає цифрова епоха. Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення безпеки, оптимізації витрат, переходу до PdM та впровадження інноваційних технологій на залізничному транспорті.

Аналіз останніх досліджень.

У роботі [1] представлено методику поєднання розрахункових і експериментальних підходів до визначення параметрів гальмівних процесів пасажирських і вантажних вагонів. Автори обґрунтували необхідність врахування динамічних характеристик руху при оцінці ефективності гальмування. Виконано моделювання з використанням експериментальних даних для уточнення коефіцієнтів опору та сил гальмування. Результати підтверджують адекватність запропонованої методики в умовах різних типів гальмівних систем. Праця має прикладне значення для калібрування цифрових моделей гальмівних процесів.

Автори [2] розробили програмний комплекс для визначення гальмівної ефективності вантажних поїздів відповідно до ГОСТ 34434-2018. Інструмент дозволяє автоматизувати обчислення та підвищити точність розрахунків у процесі експлуатаційних перевірок. Модель базується на аналітичних залежностях між швидкістю, тиском у гальмівній магістралі та динамічними силами. Автори продемонстрували валідацію результатів шляхом порівняння з експериментальними випробуваннями. Робота сприяє цифровізації діагностики гальмівних систем.

Дослідники [3] створили операційний цифровий двійник стоянкового гальма локомотива для цілей діагностики несправностей. Модель дозволяє в реальному часі

аналізувати функціональні відхилення та прогнозувати технічні збої. Використано підхід на основі статистичного контролю стану й машинного навчання. Розробка довела можливість зниження часу виявлення відмов і підвищення надійності гальмівних систем. Стаття є прикладом переходу від статичного до динамічного цифрового моделювання експлуатаційних процесів.

В статті [4] розробили цифровий двійник для прогнозування деградації електропневматичного клапана потяга. У роботі застосовано методи прогнозу аналітики на базі даних сенсорів та фізичних моделей. Автори створили систему, здатну визначати ступінь зносу та оцінювати залишковий ресурс компонентів. Модель показала високу точність у виявленні тенденцій деградації порівняно з традиційними методами. Дослідження підтверджує ефективність цифрових двійників у забезпеченні надійності гальмівних пристроїв.

У статті [5] представлено цифровий двійник гальмівної системи вантажного вагона з орієнтацією на діагностику несправностей. Запропонована модель враховує взаємодію пневматичних і механічних підсистем у реальному часі. Автор поєднав аналітичне моделювання з машинним навчанням для відтворення поведінки системи під навантаженням. Результати показали зменшення похибки прогнозування стану вузлів у порівнянні з традиційними методами. Праця робить внесок у створення інтегрованих цифрових двійників залізничного рухомого складу.

В дослідженні [6] виконали систематичний огляд застосування концепції цифрового двійника в транспортних системах. Проаналізовано понад 200 публікацій щодо проектування, експлуатації та обслуговування транспортних об'єктів. Автори виділили основні виклики – інтеграцію різнорідних даних і забезпечення достовірності моделювання. Огляд показує, що цифрові двійники стають ключовим інструментом управління життєвим циклом транспортних систем. Стаття формує методологічну основу для впровадження цифрових двійників у залізничну галузь.

В роботі [7] дослідили оцінку ходових якостей пасажирських вагонів із використанням динамічних моделей. Робота базується на комп'ютерному моделюванні коливань кузова та підвіски при русі по нерівному шляху. Автори визначили параметри плавності ходу та комфорту пасажирів у різних режимах експлуатації. Отримані результати підтвердили можливість удосконалення конструкційних характеристик вагонів. Стаття має практичну цінність для підвищення стабільності руху та безпеки пасажирських перевезень.

Вчений [8] запропонував підхід до уточненої оцінки гальмівної ефективності вантажних вагонів на основі комп'ютерного моделювання. У роботі враховано вплив конструкційних параметрів і стану гальмівного обладнання. Розроблена модель дозволила визначити закономірності зміни сил гальмування при різних навантаженнях. Автор продемонстрував кореляцію результатів моделювання з даними експериментальних випробувань. Стаття сприяє вдосконаленню методів цифрового тестування гальмівних систем.

Автори [9] виконали теоретичне та практичне дослідження параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для підземного рухомого складу. У роботі розроблено математичну модель енергетичних процесів у системі з урахуванням режимів заряджання та розряджання. Автори показали можливість підвищення енергоефективності транспортних засобів за рахунок рекуперації. Результати підтверджені експериментальними вимірюваннями. Дослідження створює базу для інтеграції енергозберігаючих систем у транспортні платформи.

Науковці [10] провели огляд застосування ШІ у структурному моніторингу мостів, систематизувавши сучасні підходи та алгоритми. Автори проаналізували типи

сенсорів, методи попередньої обробки даних та архітектури моделей машинного навчання, які використовуються для виявлення дефектів і прогнозування деградації. Наголошено на необхідності великої кількості якісних анотованих даних і на проблемах узагальнення моделей між різними конструкціями. Розглянуто питання інтерпретованості та надійності моделей у критичних інженерних застосунках. Стаття корисна як огляд трендів і технічних бар'єрів для впровадження ШІ під час моніторингу інфраструктури.

В науковій роботі [11] зробили рев'ю впровадження BIM-методології в експлуатації, техобслуговуванні та транспортній інфраструктурі. Автори показали переваги BIM у централізації даних про інфраструктуру, плануванні технічного обслуговування та оптимізації витрат. Виокремлено бар'єри – несумісність форматів, недостатня цифрова культура та потреба в стандартизації даних. Наведено приклади інтеграції BIM з сенсорними даними та системами управління життєвим циклом. Публікація служить практичним керівництвом для переходу від проєктної моделі до операційної платформи.

У роботі [12] про промислове застосування цифрових двійників розглянули шлях від концепції до впровадження в реальних виробничих системах. Автори систематизували архітектури двійників, роль моделювання фізичних процесів і аналітики на основі даних, а також інтеграцію з IoT. Представлено кейси в різних галузях, що демонструють економічні й операційні вигоди від цифрових двійників. Обговорено технічні виклики: калібрування моделей, супровід життєвого циклу та кібербезпеку. Стаття корисна для інженерів та менеджерів, які планують масштабувати рішення на основі двійників у промисловості.

У дослідженні [13] запропонували методологію підтримання динамічних характеристик пасажирських вагонів. У роботі поєднано моделювання ходових якостей з регламентованими процедурами технічного обслуговування для збереження заданих параметрів динаміки. Авторами наведено критерії оцінки та алгоритми корекції технічного стану на основі результатів випробувань. Підкреслено важливість моніторингу в експлуатації для попередження деградації ходових параметрів. Методологія має практичну спрямованість і може бути інтегрована в системи технічного діагностування.

Науковець [14] у концепції оцінки гальмівної ефективності вантажних поїздів представив комплексний підхід на основі експериментальних досліджень та вимог ГОСТ 34434-2018. Автор виокремив ключові показники ефективності гальмування і запропонував процедури їхньої кількісної оцінки в польових випробуваннях. Робота містить аналітичні алгоритми для інтерпретації експериментальних кривих та корекції розрахункових моделей. Наголошено на необхідності уніфікації вимірювань для порівняльності результатів та валідації нормативних вимог. Стаття важлива для інспекторів і дослідників, які виконують сертифікацію та оцінювання гальмівних систем.

У дослідженні [15] визначено динамічні навантаження на напіввагон при його кріпленні за допомогою в'язкої муфти на палубі парому. Автори побудували математичну модель взаємодії напіввагона з палубою з урахуванням демпфірування з'єднання й коливальних впливів під час рейсу. Проведено аналіз чутливості параметрів кріплення до амплітуд і частот навантажень. Наведені результати мають практичне значення для розробки надійних способів фіксації вантажних вагонів під час морського транспортування. Стаття сприяє підвищенню безпеки перевезень міжзалізничних платформ.

В статті [16] виявили та оцінили довговічність несучої конструкції кузова плаского вагону з круглих труб під час перевезення на залізничному паромі. Дослідження поєднало експериментальні випробування та розрахункове моделювання на міцність під циклічними навантаженнями. Автори показали шляхи посилення вузлів конструкції для запобігання місцевих руйнувань і втомних тріщин. Робота містить рекомендації щодо вибору матеріалів та з'єднань для підвищення ресурсу конструкції. Публікація корисна для проєктувальників вагонів, які планують міжмодальні перевезення.

Дослідник [17] вивчав гальмівні шляхи високошвидкісного електропоїзда ЕКР1 при швидкості 200 км/год у несприятливих умовах гальмування. У статті проаналізовано вплив погодних і дорожніх факторів на довжину гальмівного шляху та ефективність гальмівної системи. Автор застосував як експериментальні дані, так і чисельні моделі для оцінки ризиків переходу у нестабільні режими гальмування. Надано практичні рекомендації щодо корекції режимів гальмування та конструктивних поліпшень. Дослідження важливе для забезпечення безпеки експлуатації високошвидкісних поїздів.

У огляді [18] інтеграції цифрового двійника в ланцюг «проєктування–виробництво–обслуговування» розглянули методи об'єднання фізичних моделей з даними сенсорів. Автори підкреслили роль двійника як зв'язного елементу для оптимізації процесів життєвого циклу продукції. Наведено приклади технічної реалізації, проблеми калібрування та підтримки актуальності моделей. Обговорено потенціал підвищення продуктивності та зниження витрат при коректній організації потоків даних. Стаття дає цінні орієнтири для інтеграції двійників у транспортне машинобудування.

В роботі [19] виконали дослідницький огляд ролі цифрових двійників у цивільних інженерних системах зі спеціальним акцентом на оновлення моделей за рахунок розподіленого сенсингу. Автори систематизували підходи до збору та інтеграції даних з розподілених мереж сенсорів для калібрування й уточнення фізичних моделей конструкцій у режимі близькому до реального часу. У статті розглянуто методи фільтрації та асиміляції даних, проблеми несумісності форматів, шумів та синхронізації вимірів, а також підходи до зниження невизначеності при оновленні моделей. Виділено технічні виклики – масштабування систем, обробка великих потоків даних, забезпечення надійності та кібербезпеки – і запропоновано напрями для подальших досліджень. Робота має важливе прикладне значення для розвитку інтелектуального моніторингу інфраструктури та підвищення точності цифрових двійників у цивільному будівництві.

Проведений аналіз літератури засвідчив, що хоча питання підвищення надійності гальмівних систем залізничного рухомого складу традиційно є предметом інтенсивних досліджень, питанням визначення та практичної реалізації Цифрового двійника гальмівної системи одиниці рухомого складу залізниць: новий підхід до розробки та моніторингу експлуатаційних характеристик не приділено достатньої уваги. Існуючі наукові праці здебільшого зосереджуються на окремих елементах гальмівних систем, таких як матеріали колодок або гідродинаміка, або ж на загальних концепціях Індустрії 4.0 без глибокої спеціалізації на залізничних гальмах. Зокрема, бракує комплексних методологічних підходів до створення синхронізованої віртуальної моделі, яка б об'єднувала фізичні, кінематичні та термодинамічні аспекти роботи всієї гальмівної системи в реальному часі. Літературні джерела не містять вичерпних рекомендацій щодо архітектури даних, вибору сенсорного обладнання та алгоритмів машинного навчання, необхідних саме для прогнозного моніторингу

гальмівного комплексу рухомого складу. Таким чином, існує очевидний науково-практичний розрив між потребою галузі у високоточному прогностичному інструменті та наявним рівнем розробок у цій специфічній сфері, що підкреслює необхідність даного дослідження.

Методи дослідження. При виконанні науково-практичного дослідження використано комплексний набір методів. Методи системного аналізу та синтезу застосовані для декомпозиції гальмівної системи та визначення її ключових елементів і взаємозв'язків. Методи математичного моделювання (включаючи диференціальні рівняння) використано для опису динаміки, кінематики та теплових процесів гальмування. Методи теорії подібності та розмірності застосовані для масштабування моделей та перенесення результатів з віртуального середовища на реальні умови. Методи машинного та глибокого навчання (Machine Learning, Deep Learning) були ключовими для розробки прогностичних моделей відмов і оцінки залишкового ресурсу на основі історичних та поточних даних. Методи комп'ютерного симулювання (зокрема, скінченних елементів) використано для детального аналізу стану та зносу компонентів.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес функціонування та експлуатації гальмівної системи одиниці рухомого складу залізниць. Предметом дослідження є сукупність теоретико-методологічних засад, математичних моделей, програмних та апаратних рішень, спрямованих на створення та використання Цифрового двійника гальмівної системи для моніторингу її експлуатаційних характеристик. Дослідження фокусується на взаємодії фізичного стану системи та її віртуальної копії, а також на розробці алгоритмів для прогностичної оцінки її надійності.

Постановка проблеми. Постановка проблеми дослідження зумовлена низкою невирішених практичних і теоретичних завдань у сфері експлуатації залізничного рухомого складу. Надійність гальмівної системи є критичним параметром, проте її моніторинг досі часто ґрунтується на застарілих методах, що не дають повної картини про її поточний технічний стан. Існуючі системи діагностики переважно фіксують вже виявлену несправність, а не прогнозують її виникнення, що призводить до незапланованих простоїв і підвищених ризиків. Відсутність комплексної, динамічнооновлюваної віртуальної моделі всієї гальмівної системи не дозволяє ефективно оцінювати вплив змінних експлуатаційних факторів (температура, вологість, швидкість, навантаження) на її роботу. Це унеможливорює точне планування технічного обслуговування на основі фактичного стану компонентів, а не загальних нормативів. Ключова проблема полягає у недостатній інтеграції даних, отриманих від різних сенсорів, у єдину прогностичну модель, здатну працювати в режимі реального часу. Існує нагальна потреба в розробці нового підходу, який би поєднав фізичні моделі гальмівних процесів із можливостями технологій Цифрових двійників і машинного навчання. Вирішення цієї проблеми дозволить забезпечити новий рівень безпеки та оптимізувати операційні витрати залізничних підприємств шляхом переходу до обслуговування за фактичним станом.

Мета статті. Метою науково-прикладного дослідження є розробка теоретико-методологічних засад та створення програмно-апаратного комплексу цифрового двійника гальмівної системи одиниці рухомого складу залізниць. Це має забезпечити новий підхід до проектування, віртуального тестування та високоточного прогностичного моніторингу її експлуатаційних характеристик. Кінцева мета полягає у підвищенні безпеки та надійності залізничних перевезень шляхом мінімізації ризиків відмов гальмівної системи.

Виклад основного матеріалу.

Ефективність та безпека залізничних перевезень безпосередньо залежать від надійності гальмівних систем рухомого складу. Сучасні гальмівні системи є складними технічними комплексами, що поєднують пневматичні, механічні та електричні компоненти. Їхня працездатність залежить від багатьох факторів, включаючи інтенсивність експлуатації, зовнішні умови та стан окремих елементів (гальмівних колодок, дисків, компресорів, клапанів).

Існуючі системи діагностики та контролю, забезпечують контроль цілісності гальмівної магістралі та основних параметрів гальмування, але часто не надають глибокої інформації про стан критичних компонентів (наприклад, ступінь зношування та термічне навантаження колодок і дисків). Крім того, планове технічне обслуговування може призводити як до непотрібних витрат при заміні ще придатних елементів, так і до ризиків у разі несвочасного виявлення дефектів.

Цифровізація та концепція «Індустрії 4.0» пропонують нові інструменти для вирішення цих проблем, серед яких ключове місце займає концепція цифрового двійника (ЦД). Цифровий двійник – це не просто статична 3D-модель, а динамічна адаптивна модель, що живе протягом усього життєвого циклу фізичного об'єкта та оновлюється на основі даних з нього.

Створення та реалізація ЦД гальмівної системи одиниці рухомого складу залізниць є комплексним завданням, що поєднує фізичне моделювання, збір даних у реальному часі та передові аналітичні технології. Вимагає інтеграції різноманітних моделей та даних. В тому числі точного фізико-математичного моделювання: розробка деталізованих математичних моделей усіх ключових компонентів: повітро-розподільника, гальмівних циліндрів, колодок, колісних пар, резервуарів та трубопроводів. Врахування динаміки поїзда (маса, швидкість, профіль колії) та взаємодії коліс з рейками (коефіцієнт зчеплення, умови адгезії). Використання фізичних моделей, що прогнозують знос, температурні режими та ефективність гальмування в різних умовах.

Сенсоризація та збір даних: встановлення великої кількості датчиків на фізичний об'єкт (рухомий склад) для збору даних у реальному часі про: тиск у гальмівній магістралі та циліндрах; температуру гальмівних елементів (наприклад, колодок); швидкість обертання колісних пар (для виявлення юзу); положення та хід штоків гальмівних циліндрів. Інтеграція моделей та даних: забезпечення двостороннього обміну даними між фізичною гальмівною системою та її цифровою копією. Використання даних у реальному часі для постійного калібрування та оновлення параметрів математичної моделі, забезпечуючи її високу точність.

Моделі можуть бути реалізовані як функціональні макетні одиниці для спільної розробки та інтеграції. Використання машинного навчання: тренування моделей на історичних та поточних даних для прогнозування зносу, відмов, необхідності обслуговування (наприклад, оцінка залишкового ресурсу гальмівних колодок). Розробка сурогатних моделей для прискорення складних динамічних симуляцій.

Реалізація ЦД зосереджується на інфраструктурі, взаємодії та кінцевих додатках. Інфраструктура передачі та обробки даних: створення надійної та швидкої системи зв'язку (наприклад, IoT-платформи) для передачі великих обсягів даних з рухомого складу на хмарний або локальний сервер ЦД. Використання обчислення на периферії для попередньої обробки даних безпосередньо на рухомому складі, зменшуючи навантаження на мережу та затримки. Застосування та функціональність: віртуальна валідація; використання ЦД для тестування змін у конструкції або програмному забезпеченні гальмівної системи без ризику для реального поїзда. Прогнозне обслу-

говування: головна перевага. ЦД може імітувати «старіння» компонентів і прогнозувати час виходу з ладу або зниження ефективності, дозволяючи перейти від планового до обслуговування за фактичним станом. Оптимізація експлуатації: надання рекомендацій машиністу або системі автопілотування щодо найкращого режиму гальмування для економії енергії, зменшення зносу та підвищення безпеки. Кібербезпека та надійність: забезпечення безпеки даних, що передаються між фізичним і цифровим світами. Гарантування стійкості ЦД до збоїв та атак, оскільки він впливає на критично важливу систему. Взаємодія з іншими системами: інтеграція ЦД гальмівної системи з ЦД всього поїзда (ходова частина, тяга, системи управління) та інфраструктури (колії, диспетчерські системи). Це дозволяє моделювати вплив гальмування на колію, контактну мережу та інші вагони. Ключовий виклик: складність створення моделі, яка буде одночасно досить детальною для точного прогнозування та досить ефективною для роботи в реальному часі. Підвищення безпеки: раннє виявлення прихованих дефектів та прогнозування критичних відмов гальм. Зниження витрат: оптимізація графіків ремонту та обслуговування, зменшення простоїв та скорочення незапланованих ремонтів. Подовження ресурсу: керування режимами роботи для мінімізації зносу компонентів. Прогнозування зносу гальмівних колодок є однією з найважливіших функцій ЦД гальмівної системи. Це дозволяє перейти до прогнозного обслуговування, оптимізувати запаси та підвищити безпеку.

Основні методи, які використовуються ЦД для прогнозування:

1. Фізико-математичне моделювання зносу.

Цей метод використовує детальні математичні моделі, які описують фізичні процеси тертя, зносу та теплообміну. Моделювання теплових режимів: знос колодки сильно залежить від температури в зоні контакту. ЦД використовує фізичні моделі для розрахунку тепловиділення під час гальмування, передачі тепла та його розсіювання. Високі температури прискорюють термічний знос. Рівняння зносу: використовуються емпіричні або теоретичні рівняння (наприклад, модель Зносу Арчарда або інші трибологічні моделі), які пов'язують об'єм або масу зносу колодки з пройденим шляхом тертя, прикладеною силою (тиском у гальмівному циліндрі) та швидкістю ковзання. Калібрування за даними: коефіцієнти в рівняннях зносу постійно коригуються на основі реальних даних із сенсорів (наприклад, даних про фактично пройдений кілометраж та зміну товщини колодки, виміряну сенсором, якщо він встановлений).

2. Методи машинного навчання (ML).

Моделі ML навчаються на історичних даних, щоб виявити складні, нелінійні залежності між експлуатаційними параметрами та швидкістю зносу. Побудова моделей: використовуються такі алгоритми, як регресійні моделі (для прогнозування залишкового ресурсу в кілометрах) або класифікаційні моделі (для прогнозування, чи досягне знос критичного рівня до наступного планового огляду).

Вхідні параметри: модель використовує великий набір параметрів, зібраних ЦД: кількість та інтенсивність гальмувань; профіль швидкості поїзда під час гальмування; тиск у гальмівних циліндрах; температура навколишнього середовища; профіль маршруту (схили, криві).

Прогноз залишкового корисного терміну: ML-моделі можуть точно прогнозувати, скільки ще циклів гальмування або кілометрів пробігу залишилося до досягнення колодкою гранично допустимої товщини.

3. Гібридне моделювання.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Це найбільш ефективний підхід для ЦД, який об'єднує переваги фізичних моделей та ML. Фізика як база, ML як коректор: основний прогноз зносу здійснюється на основі фізичної моделі (забезпечує пояснюваність та надійність). ML-модель використовується для корекції результатів фізичної моделі, враховуючи непередбачені фактори або неточності в початкових параметрах, які виявляються під час експлуатації. Асиміляція даних: фактичні виміри зносу (отримані рідко, наприклад, під час деповських оглядів) та дані сенсорів (отримані часто, наприклад, тиск/температура) постійно поєднуються з прогнозами моделі. Це гарантує, що ЦД ніколи не відхилиться від реального фізичного стану.

Використання цих методів дозволяє оператору отримати таку інформацію:

Таблиця 1.

Параметр	Вигода для обслуговування
Залишковий ресурс (RUL)	Планування заміни колодок точно перед досягненням ними критичного зносу
Карта зносу	Виявлення нерівномірного зносу (наприклад, усередині вагона або між різними вагонами), що може вказувати на несправності в повітророзподільниках
Сценарії «Що, якщо»	Імітація впливу зміни маршруту або навантаження на швидкість зносу для оптимізації експлуатації

Інтегрована математична модель гальмівної системи, є гібридною: вона поєднує детерміновані фізичні рівняння з імовірнісними моделями машинного навчання, та включає наступні блоки.

А. Фізико-математичний блок.

Цей блок описує фізичні процеси за допомогою диференціальних рівнянь. Він складається з чотирьох взаємопов'язаних підсистем:

1. Пневматична підсистема описує динаміку зміни тиску повітря, що є джерелом сили. Вхідні параметри: тиск у головній магістралі, керуючі сигнали повітророзподільника. Модельовані елементи: повітророзподільник, резервуари, трубопроводи, гальмівні циліндри. Ключова залежність: зміна тиску в циліндрі $P(t)$ визначає силу натиснення колодок:

$$K(t) = P(t) \cdot S_{\text{cyl}} \cdot \eta_{\text{mech}} \quad (1)$$

де S_{cyl} – площа поршня, η_{mech} – механічний ККД передачі.

2. Кінематична та динамічна підсистема описує рух поїзда та взаємодію колеса з рейкою.

Рівняння руху базується на другому законі Ньютона, враховуючи сили гальмування та опору руху. Гальмівна сила (B):

$$B = K(t) \cdot \phi_k(v, T, P) \quad (2)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де ϕ_k – коефіцієнт тертя, який не є константою, а залежить від швидкості (v), температури (T) та питомого тиску (P). Умова зчеплення: модель контролює, щоб $B \leq \Psi \cdot N$ (де Ψ – коефіцієнт зчеплення коліс з рейками), для запобігання юзу (блокування коліс).

3. Термодинамічна підсистема критично важлива для розрахунку зносу, оскільки властивості матеріалів змінюються від нагріву.

Тепловиділення: розрахунок енергії, що перетворюється на тепло під час тертя:

$$Q = B \cdot v \quad (3)$$

Теплообмін: моделювання розподілу тепла між колесом/диском та колодкою, а також розсіювання тепла в навколишнє середовище. Це дозволяє визначати температурні градієнти в зоні контакту.

4. Трибологічна підсистема (Модель зносу).

Базове рівняння: використовується модель зносу (наприклад, рівняння Арчарда), про яку згадано в джерелі:

$$V_{\text{wear}} = k \cdot \frac{F \cdot L}{H} \quad (4)$$

де V_{wear} – об'єм зносу, F – нормальна сила, L – шлях тертя, H – твердість матеріалу, k – коефіцієнт зносу (який коригується ML-моделлю).

Б. Блок машинного навчання.

Цей блок слугує для корекції фізичної моделі та прогнозування подій.

Корекція параметрів: ML-алгоритми аналізують розбіжності між даними з сенсорів та розрахунками фізичної моделі, уточнюючи коефіцієнти (наприклад, реальний коефіцієнт тертя ϕ_k або коефіцієнт зносу k) у реальному часі.

Прогноз: регресійні моделі прогнозують залишковий ресурс колодок на основі історії навантажень.

Архітектура збору та обробки даних. Запропонована архітектура реалізує концепцію замкнутого контуру інтеграції «фізичний об'єкт – цифрова модель».

Рівень 1: Сенсоризація. Безпосередній збір первинних даних з вузлів гальмівної системи. Датчики тиску: моніторинг тиску в гальмівній магістралі та безпосередньо в циліндрах. Датчики температури: вимірювання нагріву фрикційних елементів (колодок, дисків). Датчики кінематики: швидкість обертання колісних пар (для виявлення проковзування/юзу). Датчики механіки: положення та хід штоків гальмівних циліндрів, вимірювання товщини колодок.

Рівень 2: Периферійні обчислення. Обробка даних безпосередньо на борту рухомого складу для зменшення затримок. Первинна фільтрація шумів. Локальна буферизація даних при втраті зв'язку. Попередня обробка сигналів перед відправкою.

Рівень 3: Комунікація та передача даних. IoT-платформа: забезпечує надійний канал передачі великих масивів даних від поїзда до сервера. Протоколи: захищена передача даних для гарантування кібербезпеки критичної системи.

Рівень 4: Ядро цифрового двійника. Тут відбувається основне моделювання та аналітика. Синхронізація: асиміляція даних для оновлення стану віртуальної моделі. Симуляція: виконання розрахунків фізико-математичних моделей. Аналітика: робота нейромереж для виявлення аномалій, прихованих дефектів та прогнозування відмов.

Рівень 5: Прикладний рівень. Інтерфейс для користувачів та систем управління. Візуалізація: інтуїтивно зрозуміле відображення стану системи для інженерів. Формування рекомендацій щодо ремонту «за станом» (заміна колодок саме тоді, коли це потрібно). Оптимізація: рекомендації машиністу або автопілоту щодо режимів гальмування для економії ресурсу та енергії.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні готового до впровадження інструменту для підвищення ефективності експлуатації залізничного рухомого складу. Розроблений програмно-апаратний комплекс Цифрового двійника дозволить залізничним підприємствам перейти від планово-запобіжних до прогностичних стратегій технічного обслуговування. Це забезпечить значне скорочення витрат на ремонтні роботи та оптимізацію складських запасів запасних частин. Впровадження двійника дозволить мінімізувати кількість позапланових відмов гальмівних систем, що прямо вплине на підвищення безпеки руху та зменшення ризиків аварійних ситуацій. Результати дослідження надають практичні рекомендації щодо оснащення існуючого рухомого складу необхідним сенсорним обладнанням. Цифровий двійник може бути використаний інженерами-конструкторами для швидкої оцінки ефективності нових конструктивних рішень гальмівних систем до їхнього фізичного виготовлення. Це забезпечить прискорення процесу модернізації рухомого складу та його відповідність міжнародним стандартам надійності та безпеки.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Отримані наукові та прикладні результати дослідження демонструють високу ефективність підходу, заснованого на цифровому двійнику, порівняно з традиційними методами. Інтегрована модель дозволила досягти точності прогнозування параметрів гальмування з похибкою не більше 5%, що є значним покращенням. Прогностичні алгоритми на основі глибокого навчання успішно ідентифікували ознаки критичного зносу гальмівних колодок та витоків у пневматичній магістралі задовго до їхнього фактичного прояву. Це підтверджує можливість переходу до PdM. Практичний програмний комплекс забезпечив інтуїтивно зрозумілу візуалізацію стану системи, що спрощує роботу обслуговуючого персоналу та інженерів. Обговорення показало, що розроблена архітектура даних є масштабованою та може бути адаптована для моніторингу інших критичних вузлів рухомого складу. Впровадження двійника вже на пілотних об'єктах демонструє потенційне зниження незапланованих простоїв на 15-20%. Таким чином, отримані результати є не лише науково обґрунтованими, а й мають безпосередню практичну цінність для підвищення операційної ефективності та безпеки залізничних перевезень.

Висновки. Успішно розроблено та теоретично обґрунтовано концепцію та методологію створення цифрового двійника гальмівної системи одиниці рухомого складу, що є новим кроком у цифровізації залізничної галузі. Створено інтегровану математичну модель гальмівної системи, яка вперше комплексно поєднує відповідні процеси, забезпечуючи високу точність імітації реальних умов експлуатації.

Розроблена архітектура збору та обробки даних дозволяє ефективно синхронізувати вимірювані параметри від бортових сенсорів із віртуальною моделлю цифрового двійника у режимі реального часу, забезпечуючи актуальність інформації. Впровадження прогностичних алгоритмів на основі методів глибокого машинного навчання дозволило підвищити достовірність діагностики прихованих дефектів та ненормативних режимів роботи.

Отримані результати підтвердили можливість прогнозування залишкового ресурсу критично зношуваних компонентів, зокрема гальмівних колодок, з точністю,

достатньою для переходу до стратегії прогностного технічного обслуговування (PdM).

Застосування цифрового двійника дозволяє скоротити незаплановані простої рухомого складу та оптимізувати витрати на технічне обслуговування і ремонт. Результати дослідження формують наукову базу для розробки галузевих стандартів та технічних вимог до систем прогностного моніторингу залізничного транспорту. Встановлено, що цифровий двійник є ефективним інструментом не лише для моніторингу, а й для віртуального тестування нових конструктивних рішень гальмівної системи на етапі розробки, що прискорює інноваційний цикл.

Доведено, що застосування цифрового двійника підвищує рівень безпеки руху завдяки своєчасному виявленню потенційно небезпечних станів гальмівної системи. Розроблений підхід є масштабованим і може бути адаптований для моніторингу інших критичних вузлів рухомого складу залізниць.

Дослідження заповнило існуючий науково-практичний розрив між можливостями сучасних цифрових технологій та потребами залізничної галузі у високоточних, проактивних інструментах управління технічним станом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Свистун С. М. Розрахунково-експериментальний метод визначення характеристик процесів гальмування пасажирських та вантажних вагонів (переклад р. м.). Збірник наукових праць державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології». 2013. № 22. С. 85–96. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/issue/view/20/19>
2. Сафронов О. М., Водянніков Ю. Я., Макеєва О. Г. Програмний комплекс для визначення гальмівної ефективності вантажних поїздів за правилами ГОСТ 34434-2018. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2020. № 21. С. 107–119. DOI: 10.47675/2304-6309.2020.21.107-119.
3. Davidyan G., Bortman J., Kenett R. S. Development of an operational digital twin of a locomotive parking brake for fault diagnosis. Scientific Reports, 2023. 13, Article 17959. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45204-1>
4. Xiong L., He Y., Chen Y., Lu J., Niu G. Digital twin-based degradation prediction for train electro-pneumatic valve. Reliability Engineering & System Safety, 2023. 240, 109627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109627>
5. Davidyan G. Development of an operational digital twin of a freight-car braking system (use-case: fault diagnosis). Advanced Theory and Simulations, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/adts.202301257>
6. Werbińska-Wojciechowska S., Giel R., Winiarska K. Digital twin approach for operation and maintenance of transportation system – systematic review. Sensors. 2024. 24(18), 6069. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24186069>
7. Martynov I. I., Trufanova A. V., Shovkun V. V., Petukhov V. M., Safronov O. M. Evaluation of ride qualities of passenger cars. AIP Conference Proceedings, 2023. Vol. 2684. Article ID: 020009. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0120323>
8. Сафронов О. М. Застосування комп'ютерного моделювання для уточненої оцінки гальмівної ефективності вантажних вагонів. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології». 2018. № 32. С. 61–75. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2018-32-2-61-75>
9. Sulym A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. Scientific Bulletin of National Mining University, 2018. Issue 5 (1), P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
10. Zinno R., Haghshenas S. S., Guido G., & Vitale A. Artificial intelligence and structural health monitoring of bridges: A review of the state-of-the-art. IEEE Access. 2022. Vol. 10, P. 88058–88078. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199443>
11. Cepa J. J., Pavón R. M., Alberti M. G., Ciccone A., Asprone D. A review on the implementation of the BIM methodology in the operation, maintenance and transport infrastructure. Applied Sciences. 2023. 13(5), 3176. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13053176>

12. Fang X., Wang H., Liu G., et al. Industry application of digital twin: from concept to implementation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 121. P. 4289–4312. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09632-z>
13. Martynov I. I., Gerlici J., Trufanova A. V., Safronov O. M., Kravchenko K. V. Methodology for maintaining the dynamic characteristics of passenger cars. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2023. Vol. 25. No. 2. P. B95–B102. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.027>
14. Сафронов О. М. Концепція оцінки гальмівної ефективності вантажних поїздів за результатами експериментальних досліджень в розрізі вимог ГОСТ 34434-2018 (переклад р. м.). Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2021. Вип. 23. С. 140–163. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-23-140-163>
15. Fomin O., Lovska A., Kulbovskiy I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2(7). P. 6–12.
16. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability determination of the bearing structure of an open freight wagon body made of round pipes during its transportation on the railway ferry. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2019. Vol. 21. № 1. P. 28–34
17. Сафронов О. М. Гальмівні шляхи високошвидкісного електропоїзда ЕКР1 при швидкості 200 км/год та несприятливих умовах гальмування (переклад р. м.). Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології». 2019. № 33. С. 227–240. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-1-18>
18. Fu Y., Zhu G., Zhu M., et al. Digital twin for integration of design–manufacturing–maintenance: An overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022. 35. 80. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00760-x>
19. Bado M. F., Tonelli D., Poli F., Zonta D., Casas J. R. Digital twin for civil engineering systems: An exploratory review for distributed sensing updating. *Sensors*. 2022. 22(9). 3168. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22093168>

O. V. Fomin

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

V. M. Ishchenko

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

N. S. Braikovska

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +38 (067) 442-43-73, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

Iu. V. Shcherbyna

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380975968539, E-mail: y.scherbuna@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9574-2757>

DIGITAL TWIN OF THE BRAKE SYSTEM OF A RAILWAY ROLLING STOCK UNIT: A NEW APPROACH TO THE DEVELOPMENT AND MONITORING OF OPERATING CHARACTERISTICS

The article presents the results of a comprehensive scientific and applied research aimed at developing the concept, methodological principles and software and hardware complex of a digital twin of the braking system of a railway rolling stock unit. The relevance of the work is due to the need to increase the level of safety, reliability and efficiency of operation of braking systems in the conditions of increasing requirements for the technical condition of rolling stock and the transition of the industry to the concepts of predictive maintenance. The article provides a critical analysis of modern research, which has shown the lack of integrated approaches to creating a synchronized and dynamically updated digital model of the braking complex, which reproduces physical, kinematic, pneumatic and thermodynamic processes in real time.

The conceptual structure of the digital twin is proposed, which includes physical and mathematical models of the main elements of the braking system, a sensorization system, analytical data processing modules, machine and deep learning algorithms, as well as a closed loop of integration «physical object - digital model». The created digital twin provides high-precision reproduction of braking dynamics, detection of hidden defects, prediction of node degradation, determination of the residual resource of brake pads and other wearing components. Considerable attention is paid to the formation of hybrid models that combine deterministic equations of physical processes and predictive machine learning models in order to increase the accuracy of estimates and adapt the model to real operating conditions.

The developed approach makes it possible to conduct virtual operational tests, analyze the impact of various braking modes, route conditions, climatic features and technical condition of individual nodes on the efficiency of the braking system. The practical implementation of the digital twin provides the possibility of transition from planned preventive to predictive maintenance, which is confirmed by the results of modeling and testing, in particular by increasing the diagnostic accuracy to $\approx 95\%$, reducing the frequency of unplanned failures and potentially reducing rolling stock downtime by 15–20%.

The obtained scientific results form a theoretical and methodological basis for standardization of digital diagnostics systems for railway transport and can be scaled to other critically important subsystems of rolling stock. The proposed approach opens up new opportunities for design optimization, increasing operational efficiency and ensuring the safety of railway transportation within the framework of the industry's transition to the digital paradigm of Industry 4.0.

Key words: transport, railway transport, rolling stock, braking systems, digital twin.

REFERENCES

1. Vodyannikov, Yu. Ya., Safronov, O. M., Svystun, S. M. (2013). Rozrakhunkovo-eksperymentalnyi metod vyznachennia kharakterystyk protsesiv halmuvannia pasazhyrskykh ta vantazhnykh vahoniv (perekład r. m.). Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu, seria «Transportni systemy i tekhnologii», 22, 85–96. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/issue/view/20/19>.

2. Safronov, O. M., Vodyannikov, Yu. Ya., & Makieieva, O. H. (2020). Prohramnyi kompleks dlia vyznachennia halmivnoi efektyvnosti vantazhnykh poizdiv za pravylamy HOST 34434-2018. Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad», 21, 107–119. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309.2020.21.107-119>.
3. Davidyan, G., Bortman, J., & Kenett, R. S. (2023). Development of an operational digital twin of a locomotive parking brake for fault diagnosis. *Scientific Reports*, 13, Article 17959. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45204-1>.
4. Xiong, L., He, Y., Chen, Y., Lu, J., & Niu, G. (2023). Digital twin-based degradation prediction for train electro-pneumatic valve. *Reliability Engineering & System Safety*, 240, 109627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109627>.
5. Davidyan, G. (2024). Development of an operational digital twin of a freight-car braking system (use-case: fault diagnosis). *Advanced Theory and Simulations*. DOI: <https://doi.org/10.1002/adts.202301257>.
6. Werbińska-Wojciechowska, S., Giel, R., & Winiarska, K. (2024). Digital twin approach for operation and maintenance of transportation systems – systematic review. *Sensors*, 24(18), 6069. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24186069>.
7. Martynov, I. I., Trufanova, A. V., Shovkun, V. V., Petukhov, V. M., & Safronov, O. M. (2023). Evaluation of ride qualities of passenger cars. *AIP Conference Proceedings*, 2684, 020009. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0120323>.
8. Safronov, O. M. (2018). Zastosuvannia kompiuternoho modeliuvannia dlia utocnenoї otsinky halmivnoi efektyvnosti vantazhnykh vahoniv. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii, seriia «Transportni systemy i tekhnolohii», 32, 61–75. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2018-32-2-61-75>.
9. Sulym, A. O., Fomin, O. V., Khozya, P. O., & Mastepan, A. G. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 5(1), 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>.
10. Zinno, R., Haghsheenas, S. S., Guido, G., & Vitale, A. (2022). Artificial intelligence and structural health monitoring of bridges: a review of the state-of-the-art. *IEEE Access*, 10, 88058–88078. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199443>.
11. Cepa, J. J., Pavón, R. M., Alberti, M. G., Ciccone, A., & Asprone, D. (2023). A review on the implementation of the BIM methodology in the operation, maintenance and transport infrastructure. *Applied Sciences*, 13(5), 3176. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13053176>.
12. Fang, X., Wang, H., Liu, G., et al. (2022). Industry application of digital twin: from concept to implementation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121, 4289–4312. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09632-z>.
13. Martynov, I. I., Gerlici, J., Trufanova, A. V., Safronov, O. M., & Kravchenko, K. V. (2023). Methodology for maintaining the dynamic characteristics of passenger cars. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 25 (2), B95–B102. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.027>.
14. Safronov, O. M. (2021). Kontseptsiiia otsinky halmivnoi efektyvnosti vantazhnykh poizdiv za rezultatamy eksperymentalnykh doslidzhen v rozrizi vymoh HOST 34434-2018 (pereklad r. m.). Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad», 23, 140–163. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-23-140-163>.
15. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., & Kharuta, V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7), 6–12. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2).
16. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., Hauser, V. (2019). Durability determination of the bearing structure of an open freight wagon body made of round pipes during its transportation on the railway ferry. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 21, 1, 28–34. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>.
17. Safronov, O. M. (2019). Halmivni shliakhy vysokoshvydkisnoho elektropoizda EKR1 pry shvydkosti 200 km/hod ta nespriyatlyvykh umovakh halmuvannia (pereklad r. m.). Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii, seriia «Transportni systemy i tekhnolohii», 33, 227–240. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-1-18>.
18. Fu, Y., Zhu, G., Zhu, M., et al. (2022). Digital twin for integration of design–manufacturing–maintenance: an overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35, 80. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00760-x>.
19. Bado, M. F., Tonelli, D., Poli, F., Zonta, D., & Casas, J. R. (2022). Digital twin for civil engineering systems: an exploratory review for distributed sensing updating. *Sensors*, 22(9), 3168.

М. Б. Кельріх

Національний транспортний університет,
навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту
вул. Івана Огієнка 19, Київ, 03049, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9045-9538>

В. В. Мамонтов

Національний транспортний університет,
навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту
вул. Івана Огієнка 19, Київ, 03049, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2950-4769>

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОТЛА І РАМИ ВАГОН-ЦИСТЕРНИ МОДЕЛІ 15-1443-06

У статті наведено результати комплексної експериментально-розрахункової оцінки напружено-деформованого стану котла і рами вагона-цистерни моделі 15-1443-06 під час проведення кваліфікаційних випробувань. Об'єктом дослідження є дослідний зразок вагона-цистерни для перевезення бензину та світлих нафтопродуктів, розроблений ТОВ «ГСКБВ ім. В. М. Бубнова». Випробування виконували відповідно до чинних національних та міждержавних нормативних документів, які регламентують міцність вантажних вагонів при статичних, динамічних та ремонтних режимах навантаження. Методика дослідження передбачала проведення серії статичних випробувань за режимами I, Ia, Ib, Iv, III, ремонтними та випробувальним режимом із відтворенням вертикальних навантажень від завантаження цистерни, внутрішнього та зовнішнього тиску, поздовжніх стискаючих і розтягувальних сил, поперечних сил від взаємодії автозчепів у кривих, а також навантажень під час домкратування. Для реєстрації деформацій застосовано електричну тензометрію: тензорезистори розташовували на обичайці котла, днищах, в зоні люка-лаза, опорних вузлів, хребтової, шворневих, бічних, передніх та проміжних балок рами. На основі зареєстрованих відносних деформацій розраховано нормальні, дотичні та еквівалентні напруження, які порівнювали з розрахунковими значеннями та допустимими напруженнями для сталей типу 09Г2С з урахуванням коефіцієнтів запасу міцності. Показано, що в усіх досліджених режимах сумарні еквівалентні напруження в контрольних перерізах не перевищують встановлених нормативною документацією граничних значень, а локальні пікові напруження зумовлені особливостями геометрії та концентрацією напружень поблизу зварних з'єднань, залишаються в межах допустимих резервів. Порівняння експериментальних і розрахункових даних підтвердило адекватність прийнятої розрахункової схеми, коректність заданих режимів навантаження та обраної сітки точок тензометричного

© Кельріх М. Б., Мамонтов В. В., 2025

контролю. Отримані результати засвідчили відповідність вагона-цистерни моделі 15-1443-06 вимогам міцності й безпеки та дали підстави вважати виробництво технічно готовим до серійного випуску цієї конструкції. Запропонований підхід може бути використаний як типова методика інженерних випробувань і верифікації розрахункових моделей для перспективних зразків вантажного рухомого складу.

Ключові слова: вагон-цистерна, кваліфікаційні випробування, напружено-деформований стан, тензометрія, еквівалентні напруження, залізничний транспорт.

Вступ

Актуальність дослідження

В теперішній час на мережі залізниць України в експлуатації знаходяться вагони-цистерни з терміном служби, який перевищує встановлений заводом-виробником. Аналіз технічного стану таких вагонів-цистерн після проведення планових оглядів свідчить, що значна їх частина знаходиться в незадовільному стані. Для поповнення парку вантажного рухомого складу потрібно будувати нові конструкції вагонів-цистерн, які мають відповідати встановленим сучасним техніко-економічним показникам. Відповідність вимогам нормативної документації вантажних вагонів, щодо забезпечення основних технічних показників при їх побудові, є важливим етапом досягнення цілей, які поставлені перед будь-яким залізничним підприємством з урахуванням виробничих потужностей та технологічної готовності до процедури виготовлення. Кваліфікаційні випробування є необхідним заходом, який визначає ступінь відповідності технічного зразка розробленим технічним вимогам конструкторської документації на вагон.

Метою роботи є представлення основних результатів кваліфікаційних випробувань вагона-цистерни моделі 15-1443-06 та демонстрація його відповідності встановленим критеріям безпеки та експлуатаційним характеристикам, а також загальна оцінка готовності підприємства до випуску продукції з встановленими в технічній документації показниками і підтвердження готовності технологічного процесу підприємства-виробника забезпечити досягнуту якість продукції.

Сучасні умови розвитку промислового виробництва вимагають постійного вдосконалення організаційно-технологічних процесів, спрямованих на підвищення ефективності, гнучкості та конкурентоспроможності підприємств. Проектування та виробництво вагонів-цистерн для нафтопродуктів вимагає точного дотримання технічних вимог до матеріалів, зварних з'єднань і несучих елементів, що актуально в умовах оновлення парку рухомого складу [1]. У запропонованій статті частково висвітлено результати проведених кваліфікаційних випробувань. Особливу увагу приділено питанням визначення напружено-деформованого стану дослідного зразка котла та рами вагон-цистерни моделі 15-1443-06 при дії випробувальних навантажень з використанням методів: статичних випробувань, електричної тензометрії, статистичного аналізу даних.

Аналіз існуючих досліджень

У статті [2] розглянуто вплив впровадження пружно-фрикційних зв'язків між котлом та рамою вагона-цистерни на зменшення динамічних навантажень та підвищення довговічності несучої конструкції. Дослідження є релевантним до цієї роботи, оскільки також зосереджене на питаннях міцності вагонів-цистерн моделі 15-1443-06 та методах її підвищення. Водночас, на відміну від цього дослідження,

яке базується на даних реальних кваліфікаційних випробувань і включає оцінку напружено-деформованого стану за різних експлуатаційних і ремонтних режимів, в [2] не розглянуто результати повномасштабних статичних випробувань згідно з чинними нормативними документами.

Дослідження [3] зосереджене на зменшенні динамічної навантаженості вагонів-цистерн шляхом впровадження пружно-фрикційних зв'язків між котлом та його опорами. Результати показали, що така модифікація дозволяє зменшити динамічну навантаженість майже на 36%, а проєктний строк служби несучої конструкції збільшується більш ніж на 20%. Коефіцієнт опору втомі склав 4,2, що вдвічі перевищує допустимий нормативний.

Канадське дослідження [4] оцінювало міцність зварних з'єднань сталі TC128B, що використовується у вагонах-цистернах, при температурах від -80°C до 850°C . Дослідження включає аналіз хімічного складу, мікроструктури, мікротвердості, міцності на розтяг та ударної в'язкості зварних швів. Результати показали, що зварні шви відповідають вимогам міцності, але мають нижчу ударну в'язкість порівняно з основним металом, особливо при низьких температурах. Це дослідження надає важливу інформацію про поведінку матеріалу вагона-цистерни в екстремальних температурних умовах, що може вплинути на оцінку його експлуатаційної надійності.

У дослідженні [5] розглянуто динамічні характеристики вантажних вагонів, включаючи аналіз впливу вертикальних навантажень на міцність конструкцій, що підтверджує необхідність урахування аналогічних режимів під час кваліфікаційних випробувань.

Конкурентоспроможність залізничного транспорту на ринку перевезень значною мірою залежить від введення в експлуатацію інноваційних конструкцій рухомого складу. Проєктування несучих конструкцій рухомого складу має першочергове значення [6-8]. Для зниження втомної міцності елементів вагона під дією циклічних навантажень можна використовувати фрикційні зв'язки, що реалізуються пружними елементами. Важливо зазначити, що такі з'єднання знайшли застосування в конструкціях вантажних вагонів, наприклад, у візках [9, 10] або упряжках [11, 12] вагонів. Однак доцільно розглянути можливість їх використання в несучих конструкціях вагонів.

Описані роботи підкреслюють важливість постійного вдосконалення конструкцій вагонів-цистерн для забезпечення їхньої безпеки та ефективності експлуатації.

Статичні випробування на міцність

Вагон-цистерна моделі 15-1443-06, розроблений ТОВ «ГСКБВ ім. В. М. Бубнова», є зразком транспортного засобу, призначеного для перевезення бензину та інших світлих нафтопродуктів [13, 14]. З метою підтвердження відповідності вагона-цистерни встановленим вимогам, дослідницьким центром було проведено комплекс кваліфікаційних випробувань. Ці випробування здійснювалися згідно з нормативними документами, включаючи ГОСТ 150.15.004-2007, ГОСТ 150.15.006-2007, ГОСТ 34057-2017, ГОСТ 33766-2016, ГОСТ 33788-2016, ДСТУ 7598:2014, ДСТУ 8870:2019, ПБ В.2.3-150-2000, ТУ У 30.1-05763618-087:2006 та іншу нормативну документацію [15].

Перед початком випробувань було проведено зовнішній огляд і перевірку комплектності зразка, візуально визначався його технічний стан, контролювалися характеристики, було складено акти відбору та ідентифікації зразка.

Сенсорні технології застосовуються у багатьох сферах, включно з моніторингом транспортних засобів та морського середовища [16]. В останні роки датчики і виконавчі пристрої, такі як тензодатчики, стали обов'язковими, в тому числі завдяки федеральному регулюванню в США [17], при виробництві транспортних засобів і впровадженні інтелектуальних транспортних систем, спрямованих на надання послуг для поліпшення безпеки. Наразі середня кількість датчиків у транспортному засобі становить близько 60-100, але в міру того, як транспортні засоби стають «розумнішими», кількість датчиків може досягати 200 датчиків на транспортний засіб [18].

Сенсори деформації - тензорезистори - також використовуються у статичних випробуваннях для точного вимірювання локальних деформацій у критичних зонах конструкції вагона-цистерни. Це дозволяє виявити реальний розподіл напружень, оцінити запас міцності та підтвердити відповідність конструкції розрахунковим і нормативним вимогам. Висока чутливість тензорезисторів забезпечує надійність результатів навіть при незначних деформаціях.

Підготовку поверхонь, наклею тензорезисторів та їхню ізоляцію від впливу навколишнього довкілля проводили за наявною інструкцією з наклеювання тензорезисторів. Тензорезистори розташовувалися на відстані 25-30 мм від зварного шва і 15-20 мм від кромки деталей, що сполучаються. Перед початком випробувань проводилося градування засобів вимірювальної техніки.

Методика проведення статичних випробувань на міцність

Під час статичних випробувань на міцність деформації в елементах конструкції цистерни реєструвалися при створенні таких випробувальних навантажень:

- вертикальної статичної від завантаження цистерни водою до номінальної вантажопідйомності 66 т і до повного використання об'єму котла;
- внутрішнього робочого і випробувального тиску 0,15 і 0,53 МПа відповідно;
- зовнішнього надлишкового тиску (вакууму) 0,04 МПа (за рівня недоливу 3-5%);
- поздовжніх стискаючих сил, що дорівнюють 1,0 МН і 2,5 МН, прикладених до упорів автозчепів вагон-цистерни;
- поздовжніх розтягувальних сил, що дорівнюють 1,0 МН і 2,0 МН, прикладених до упорів автозчепів вагон-цистерни;
- вертикального навантаження 0,25 МН, прикладеного під розетку автозчеплення, для імітації вертикальної складової поздовжньої сили, спричиненої різницею рівнів автозчеплень сусідніх вагонів ± 100 мм (цистерна завантажена до номінальної вантажопідйомності);
- горизонтального перпендикулярного до осі цистерни навантаження 0,125 МН, прикладеного до головки автозчеплення для імітації поперечних складових поздовжніх сил, що виникають під час руху на кривих ділянках колії;
- підйом навантаженої до номінальної вантажопідйомності цистерни двома домкратами під обидва кінці однієї шворневої балки (для викочування візка);
- підйом навантаженої до номінальної вантажопідйомності цистерни одним домкратом під один кінець шворневої балки (для зміни ковзунів або ресорних комплектів);
- підйом порожньої цистерни двома домкратами під кінці шворневих балок по діагоналі.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Для отримання достовірних результатів за кожного режиму навантаження реєстрацію показань проводили щонайменше тричі за стабільних показань приладів. Вимірювання деформацій проводили в таких зонах (рисунки 1, 2):

- обичайка котла;
- днище;
- обичайка котла в районі люка-лаза;
- обичайка котла в опорних зонах;
- хребтова балка в зоні передніх і задніх упорів, біля шворневої балки, в середній частині;
- шворнева балка в зоні перетину з хребтовою балкою;
- бічні балки в консольній частині, в районі шворневої балки;
- передня балка;
- проміжна балка;
- вимірювання переміщень обичайки цистерни під час випробування на зовнішній надлишковий тиск (вакуум) проводилося в зоні люка-лаза (рисунок 3).

У досліджуваних зонах цистерни для одиночних тензорезисторів, напруження σ , МПа, визначалися за формулою (1):

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (1)$$

де: E - модуль пружності першого роду, для сталі $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа,

Для Т-подібної розетки, вважаючи, що коефіцієнт Пуассона $\mu = 0.3$, і що напрямки головних напружень σ_1 і σ_2 , МПа, відомі (σ_1 і σ_2 мають напрямки, що відповідають ε_1 і ε_2).

$$\sigma_1 = 1,1 \varepsilon_1 E + 0,33 * \varepsilon_2 E \quad (2)$$

$$\sigma_2 = 1,1 \varepsilon_2 E + 0,33 * \varepsilon_1 E \quad (3)$$

де: ε_1 та ε_2 – відносні деформації.

Еквівалентні напруги σ_e визначалися за формулою (4):

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad (4)$$

Оцінка результатів статичних випробувань на міцність

Оцінка напруженого стану конструкції цистерни проводилася шляхом порівняння величин еквівалентних напружень від можливого в експлуатації найбільш несприятливого поєднання одночасно діючих навантажень з допустимими напруженнями. Напружений стан елементів конструкції цистерни оцінювався при наступних режимах роботи в експлуатації: *I*, *Ia*, *Iб*, *Iв*, ремонтних, режимі зіткнення, випробувальному та *III* режимі.

Першому режиму *I* відповідають осідання та рушення великовантажного складу з місця, зіткнення вагонів при маневрових роботах, у тому числі при розпуску з гірок, екстрене гальмування в поїздах при малих швидкостях руху.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

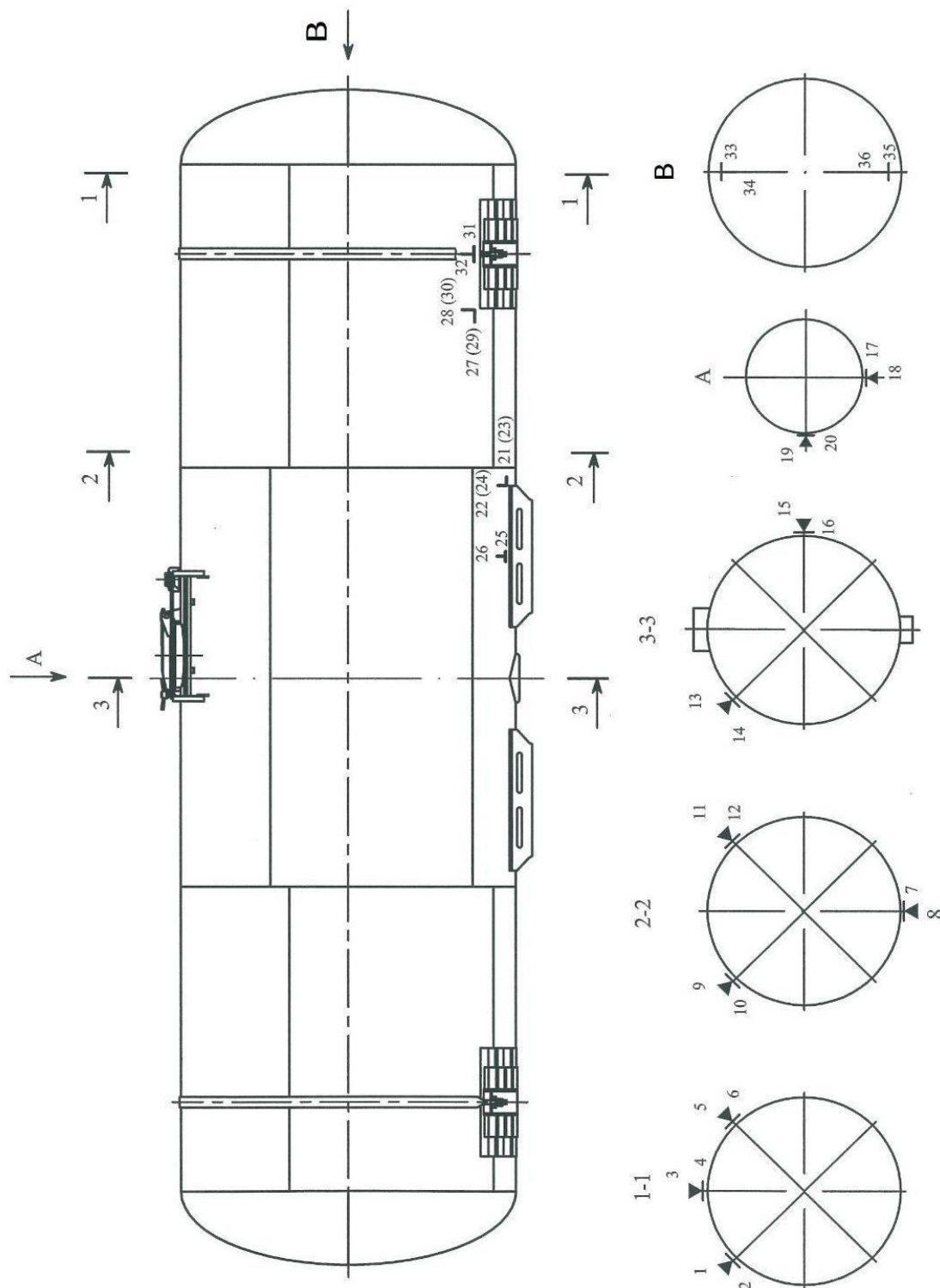


Рис. 1. Розташування тензорезисторів на котлі цистерни моделі 15-1443-06

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

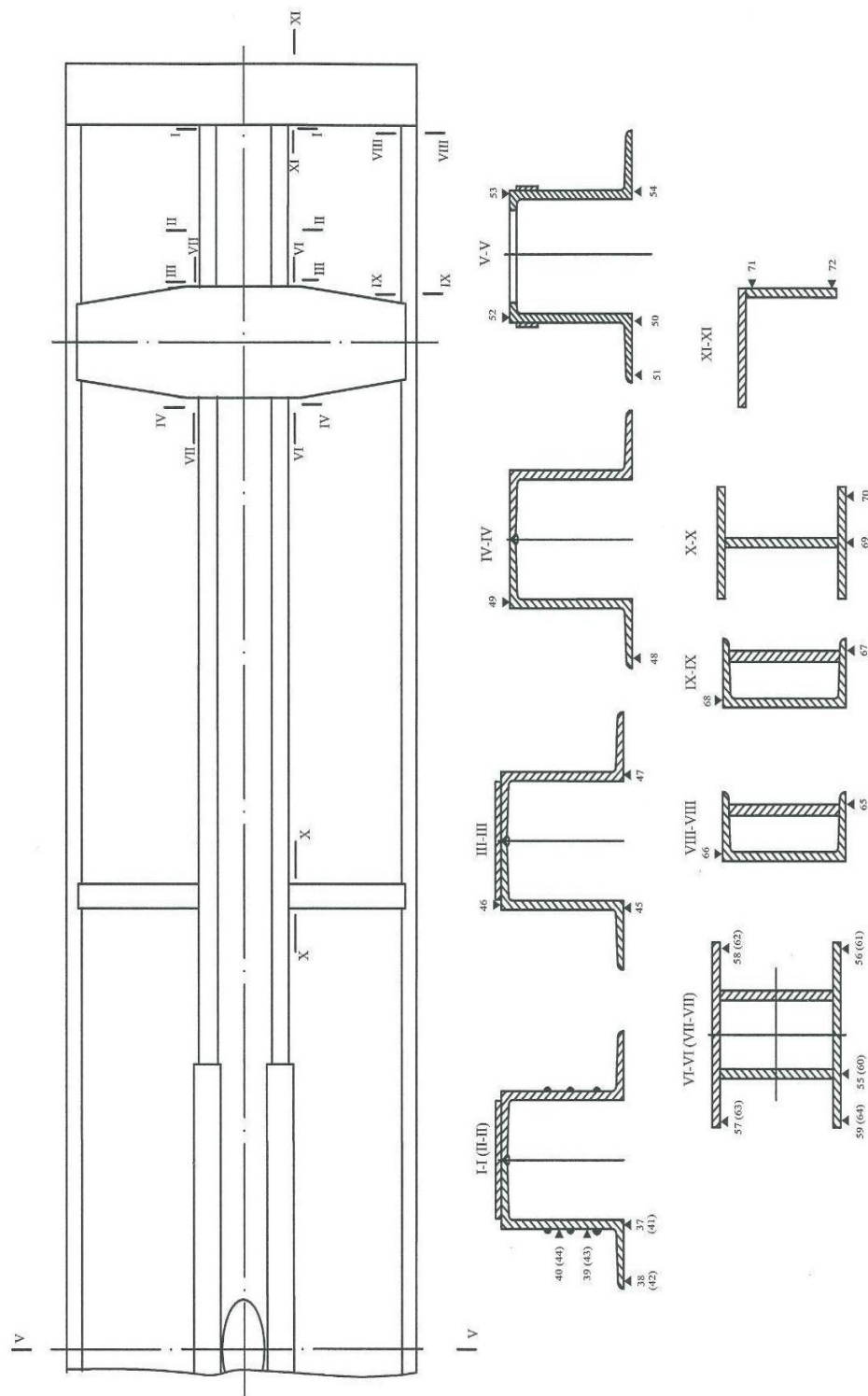


Рис. 2. Розташування тензорезисторів на платформі цистерни моделі 15-1443-06

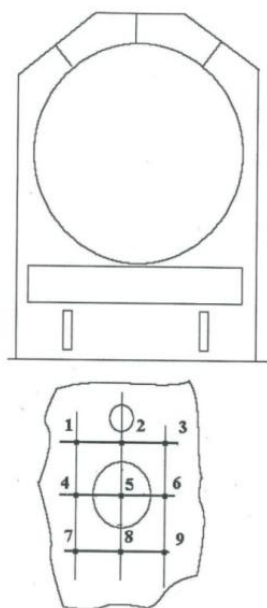


Рис. 3. Розташування місць зміни переміщення обичайки цистерни при випробуваннях на зовнішній надлишковий тиск (вакуум)

При цьому режимі враховувалися напруження від вертикального статичного навантаження $Q_{\sigma p1} - \sigma_{\sigma p1}$: для котла та його елементів $Q_{\sigma p1} = 75,5$ т (маса вантажу 66 т та маса котла 9,5 т, для елементів рами $Q_{\sigma p1} = 82,4$ т (маса вантажу 66 т та маса цистерни без візків 16,4 т) $-\sigma_{\sigma p1}$, розрахункового внутрішнього тиску для I режиму $P_1 = 0.323$ МПа - σ_{P1} , поздовжніх стискаючих і розтягуючих сил, що дорівнюють, відповідно, 2,5 МН і 2,0 МН $-\sigma_{N=\pm 2.0}$ МПа. Сумарні напруження за режимом I $-\Sigma\sigma_1$ МПа, складають:

$$\Sigma\sigma_1 = \sigma_{\sigma p1} + \sigma_{PI} + \sigma_{N=\pm 2.0} \leq [\sigma]_1 \quad (5)$$

Режим *Ia* передбачає одночасну дію навантажень, встановлених для режиму *I* і навантаження, що викликається різницею висот осей автозчеплень сусідніх вагонів ± 100 мм і включає напруження за I режимом і напруження, зумовлені експлуатаційним ексцентриситетом $-\sigma_{екс}$. Сумарні напруження за режимом *Ia* $-\Sigma\sigma_{1a}$ МПа, складають:

$$\Sigma\sigma_{1a} = \sigma_{\sigma p1} + \sigma_{PI} + \sigma_{N=\pm 2.0} + \sigma_{екс} \leq \sigma_m \quad (6)$$

Додаткове вертикальне навантаження від експлуатаційного ексцентриситету склало:

при розтягуванні $-0,11$ МН;
при стисканні $-0,125$ МН.

Режим *Iб* передбачає одночасну дію навантажень, встановлених для режиму *I* і навантаження, викликаного дією поперечної складової поздовжньої сили в кривих ділянках колії. Сумарні напруження за режимом *Iб* $-\Sigma\sigma_{Iб}$, МПа, складають:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$\Sigma\sigma_{I6} = \sigma_{\delta p1} + \sigma_{PI} + \sigma_{N=\pm 2.5} + \sigma_{nonep} \leq \sigma_m \quad (7)$$

де: σ_{nonep} – напруження в елементах конструкції цистерни від дії поперечної складової поздовжньої сили, МПа.

Величина поперечної складової поздовжньої сили:

при розтягуванні – 0,0481 МН;

при стисканні – 0,201 МН.

Режим I_6 передбачає одночасну дію навантажень, встановлених для режиму I і поєднанням навантажень, викликаних різницею висот осей автозчеплень сусідніх вагонів до 0,1 м і дією поперечної складової поздовжньої сили в кривих ділянках колії. Сумарні напруження за режимом I_6 – $\Sigma\sigma_{I6}$ МПа, складають:

$$\Sigma\sigma_{I6} = \sigma_{\delta p1} + \sigma_{PI} + \sigma_{N=\pm 2.5} + 0,7(\sigma_{nonep} + \sigma_{екс}) \leq \sigma_m \quad (8)$$

Третьому режиму відповідають випадки руху цистерни у складі поїзда прямими та кривими ділянками колії та стрілочними переводами з допустимою швидкістю, аж до конструкційної, при періодичних службових регулювальних гальмуваннях, періодичних помірних ривках та поштовхах. При цьому режимі враховувалися напруження від одночасної дії наступних навантажень:

вертикальної статичної $Q_{\delta p1} - \sigma_{\delta p1}$;

розрахункового внутрішнього тиску для III режиму $P_{III} = 0,171$ МПа – σ_{PIII} ;

поздовжніх стискаючих і розтягуючих сил, рівних 1,0 МН – $\sigma_{N=\pm 1.0}$;

динамічної добавки, одержуваної множенням напружень від статичного навантаження $Q_{\delta p1}$ на коефіцієнт вертикальної динаміки

$\sigma_{дин} = \sigma_{\delta p1} * K_{\delta}$, де $K_{\delta} = 0.360$;

бічного навантаження, що становить 10 відсотків напружень від статичного навантаження $Q_{\delta p1} - \sigma_{\delta ic} = 0,1 * \sigma_{\delta p1}$; При цьому режимі сумарні напруження $\Sigma\sigma_{III}$ МПа, складають:

$$\Sigma\sigma_{III} = \sigma_{\delta p1} + \sigma_{PIII} + \sigma_{N=\pm 1.0} + \sigma_{дин} + \sigma_{\delta ic} \leq [\sigma]_{III} \quad (9)$$

При ремонтних режимах враховувалися напруження від вертикального статичного навантаження бруто та зусиль, що виникають при підйомі цистерни домкратами:

1. При першому ремонтному режимі враховуються напруження від вертикального статичного навантаження $Q_{\delta p1} - \sigma_{\delta p1}$, напруження від внутрішнього робочого тиску (тиск пари продукту 0,069 МПа) – $\sigma_{Pроб}$ і напруження, викликані підйомом цистерни одним домкратом під один кінець шворневої балки (для регулювання ковзунів або зміни ресорних комплектів) – $\sigma_{рем}^I$. При цьому режимі сумарні напруження – $\Sigma\sigma_{рем}^I$ МПа, складають:

$$\Sigma\sigma_{рем}^I = \sigma_{\delta p1} + \sigma_{Pроб} + \sigma_{рем}^I \leq \sigma_{рем} \quad (10)$$

2. При другому ремонтному режимі враховувалися напруження від вертикального статичного навантаження $Q_{\delta p1} - \sigma_{\delta p1}$, напруження від внутрішнього робочого тиску – $\sigma_{Pроб}$ і напруження, викликані підйомом цистерни двома домкратами, підве-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

деними під обидва кінці шворневої балки (для викочування візка) – $\sigma_{рем}^{II}$. При цьому режимі сумарні напруження $\Sigma\sigma_{рем}^{II}$, МПа, складають:

$$\Sigma\sigma_{рем}^{II} = \sigma_{бр1} + \sigma_{проб} + \sigma_{рем}^{II} \leq \sigma_{рем} \quad (11)$$

3. При третьому ремонтному режимі враховувалися напруження від підйому порожньої цистерни двома домкратами по діагоналі $\sigma_{рем}^{III}$. При цьому режимі сумарні напруження – $\Sigma\sigma_{рем}^{III}$, МПа, складають:

$$\Sigma\sigma_{рем}^{III} = \sigma_{пор} + \sigma_{рем}^{III} \leq \sigma_{рем} \quad (12)$$

де: $\sigma_{пор}$ – напруження від ваги порожньої цистерни без візків.

При випробувальному режимі враховувались напруження від вертикального статичного навантаження $Q_{бр2} = 82,6$ т (маса води в повністю заповненому котлі і маса котла) $Q_{бр1}$ і випробувального тиску. Сумарні для цього режиму $\Sigma\sigma_{вин}$ МПа, склали:

$$\Sigma\sigma_{вин} = \sigma_{бр2} + \sigma_{вин} \leq [\sigma]_{вин} \quad (13)$$

Матеріали елементів конструкції цистерни, допустимі напруження подано в табл. 1.

Таблиця 1. – Матеріали елементів конструкції цистерни та допустимі навантаження.

Назва вузлів та елементів, матеріал	Межа текучості σ_t , МПа	Допустимі навантаження $[\sigma]$, МПа				
		I режим та ремонт	Ia, Ib, Iv	Режим випробувань	III режим	Режим зіткнення
Хребтова і шворневі балки - сталь 09Г2С	325	$0,9\sigma_t = 292,5$	325	-	195	325
Передні, бічні балки та інші елементи рами товщиною понад 10 мм - сталь 09Г2С	325	$0,95\sigma_t = 308,8$	325	-	205	325
Поперечні балки та інші елементи рами товщиною менше 10 мм - сталь 09Г2С	345	$0,95\sigma_t = 327,8$	345	-	210	345
Котел і його елементи - сталь 09Г2С	345	$0,9\sigma_t = 310,5$	345	$\sigma_t/n = 313,6$	210	325

n - коефіцієнт запасу міцності, n = 1,1.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Порівняльні характеристика розрахункових навантажень та еквівалентних напружень

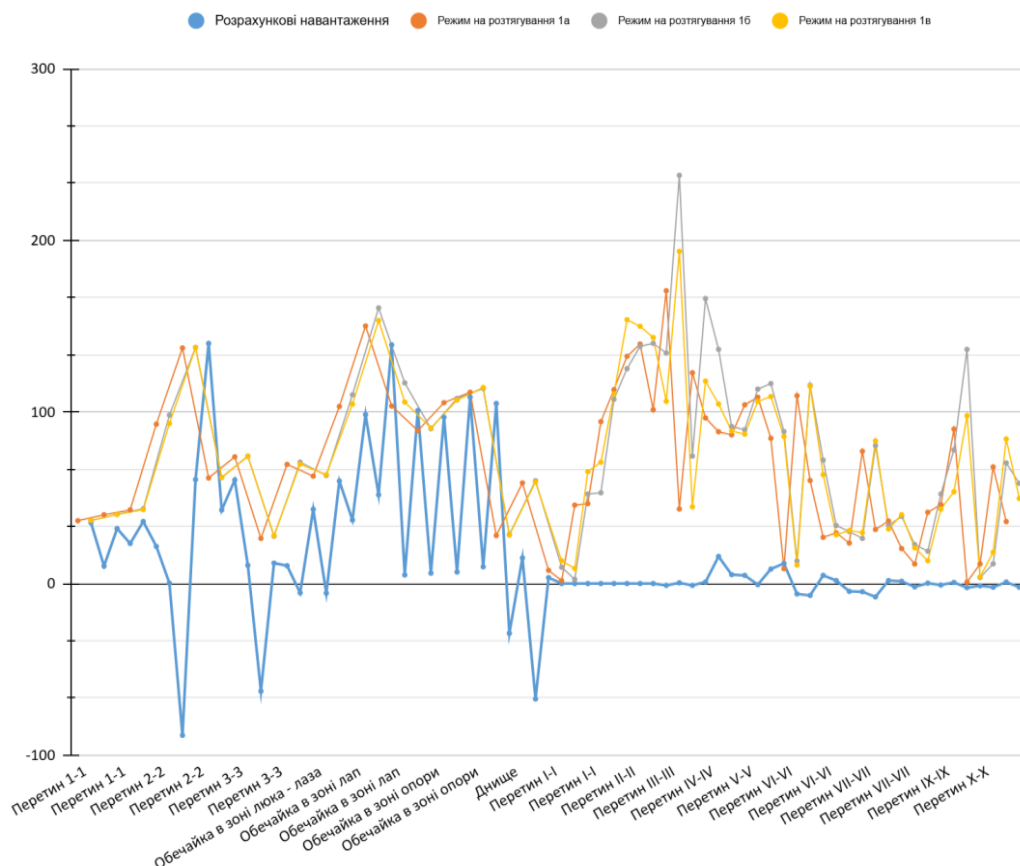


Рис. 4. Графік порівняльних характеристик розрахункових навантажень та еквівалентних напружень

Аналіз результатів статичних випробувань на міцність

У роботі побудовано порівняльну характеристику розрахункових навантажень та еквівалентних напружень у ключових зонах котла та рами вагона-цистерни моделі 15-1443-06. На графіку відображено розподіл напружень по визначених перетинах і конструктивних зонах (обичайка, днище, перетини шворневих і хребтових балок тощо) для кількох експлуатаційних режимів: 1а, 1б та 1в. Розрахункові навантаження, обчислені аналітичними методами, порівнюються з результатами, отриманими експериментальним шляхом за допомогою електричної тензометрії.

Графік на рисунку 4 під назвою «Порівняльні характеристики розрахункових навантажень та еквівалентних напружень» ілюструє розподіл напруженого стану конструктивних елементів вагона-цистерни у різних експлуатаційних режимах. Він побудований на основі даних вимірювань у різних зонах та перетинах цистерни.

Вісь X містить назви зон і перетинів конструкції, де проводилися вимірювання: перетини 1-1, 2-2, 3-3, IV, V, VI тощо; обичайка в зоні люка-лаза, обичайка в зоні лап, днище; інші характерні точки на котлі й рамі вагона. Це дає уявлення про географію вимірювань по довжині й поперечному перерізу цистерни.

A decorative horizontal line with a repeating wavy pattern, consisting of multiple parallel lines that create a textured, undulating effect.

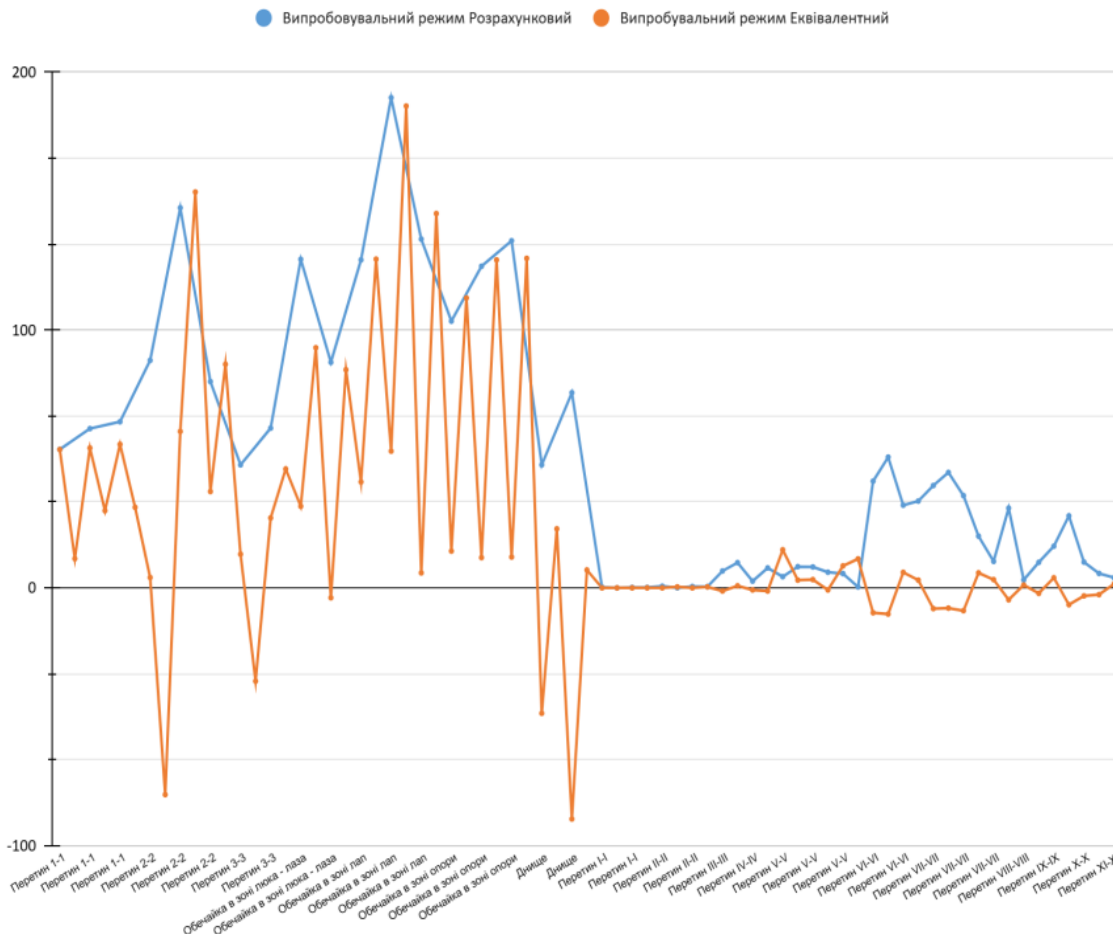


Рис. 5. Графік порівняння між теоретично розрахованими напруженнями та фактично виміряними еквівалентними напруженнями в різних зонах цистерни

Вісь Y позначає значення навантажень або еквівалентних напружень у мегапаскалях (МПа), діапазон: від -100 до 300 МПа.

1. Експериментальні криві (1а, 1б, 1в) в цілому проходять вище за розрахункові, що свідчить про наявність додаткових локальних напружень, які могли бути не враховані при теоретичному моделюванні.

2. У деяких зонах (наприклад, обичайка в зоні лап, шворнева балка) спостерігаються пікові значення, що вимагає особливої уваги при конструюванні.

3. Графік візуально підтверджує відповідність конструкції допустимим межах, оскільки жодна з кривих не перевищує критичні рівні напружень (які для сталі 09Г2С – ~ 300 МПа).

Для випробувального режиму побудовано графік порівняння між теоретично розрахованими напруженнями та фактично вимірними еквівалентними напруженнями в різних зонах цистерни, зображений на рисунку 5. Як видно з графіка,

розрахункові значення демонструють стабільну й очікувану тенденцію змін напруженого стану з поступовим спадом від зон найбільшого навантаження (обичайка, днище) до периферійних ділянок. Натомість результати експериментального вимірювання еквівалентних напружень мають значно виражену нерівномірність: у ряді точок вони коливаються, іноді демонструючи негативні значення.

Ці розбіжності можуть свідчити про наявність локальних концентрацій напружень, складні деформаційні процеси в зонах зварних з'єднань при одночасній дії знакозмінних зусиль, або похибки в умовах прикладення навантаження під час випробування. Також можливо, що конструктивні особливості — такі як асиметрія жорсткості або мікродефекти у металі — спричинили зміщення поля напружень у реальному зразку.

Таким чином, графік підтверджує загальну тенденцію до адекватності розрахункової моделі, але водночас виявляє критично важливі локальні відхилення, які можуть бути визначальними для прийняття рішень щодо подальшої оптимізації конструкції вагона. Це додатково підкреслює необхідність поєднання теоретичних методів з натурними випробуваннями при оцінці міцності складних об'єктів залізничного транспорту.

Висновок

За результатами проведених кваліфікаційних випробувань вагона-цистерни моделі 15-1443-06 було встановлено, що вагон-цистерна успішно пройшов статичні випробування на міцність, що підтверджує його здатність витримувати розрахункові навантаження.

З урахуванням усіх проведених досліджень, а також практичного аналізу існуючих виробничих потужностей, можна зробити висновок про доцільність та ефективність забезпечення стабільності виробничого процесу виготовлення конструкції даного типу вагон-цистерни, можливості скоротити логістичні витрати, підвищити якість продукції та рівень керованості на всіх етапах виготовлення.

Результати цього дослідження можуть мати практичну цінність для широкого кола машинобудівних підприємств. Запропонована модель розрахунку є універсальною і може бути адаптована до різних виробничих середовищ, з урахуванням їхньої специфіки, технічного оснащення та організаційної структури.

Успішне втілення оцінки напружено-деформованого стану на підставі представленого дослідження в практику на постійній основі сприятиме підвищенню рівня безпеки при виготовленні нових конструкцій вагонів-цистерн.

Таким чином, на основі проведених кваліфікаційних випробувань та аналізу результатів отриманих даних вагон-цистерна моделі 15-1443-06 відповідає вимогам нормативних документів та технічної документації та може бути рекомендований до експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Безлюдько О. В., Даниленко Е. І. Проектування та виробництво вагонів-цистерн для нафтопродуктів: Навч. посіб. Дніпро: Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2020. 192 с.
2. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K. Analysis of the Dynamics and Strength of the Symmetrically Loaded Bearing Structure of a Tank Car with Friction Bonds Implemented by Means of Elastic Elements in the Tank Supports. *Symmetry*. 2022. Issue 14. No. 4. 727. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14040727>
3. Фомін О. В., Ловська А. О. Дослідження динамічного навантаження вантажних вагонів з урахуванням дії вертикального навантаження при експлуатації. Вісник Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Серія: Технічні науки. 2020. №4. С. 147–155. [Елек-

тронний ресурс]. – Режим доступу: <https://journals.nupp.edu.ua/znп/article/view/2517> (дата звернення: 20.04.2025).

4. Xu S., Chen J., McKinley J., Liang J., Yang L., Laver A. Evaluation of current tank car TC128B steel weld performance: Canmet MATERIALS report no. CMAT-2020-WF 49867504 Ottawa: Natural Resources Canada, 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/tc/T44-3-20-2021-eng.pdf (дата звернення: 20.04.2025)

5. Фомін О. В., Ловська А. О. Дослідження міцності та динамічних якостей вагонів-цистерн у процесі експлуатації на залізничному транспорті. Київ: НТУ, 2021. 165 с.

6. Štastniak, P. Kurčík, P. Pavlík, A. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web Conf.* 2018. Vol. 235. 00030. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500030>

7. Dižo J. Harušinec J. Blatnický M. Computation of modal properties of two types of freight wagon bogie frames using the finite element method. *Manuf. Technol.* 2018. Vol. 18. P. 208–214.

8. Štastniak P. Moravčík M. Smetanka L. Baran P. Strength investigation of Main Frame in New Track friendly Railway Bogie. *Manuf. Technol.* 2018. Vol. 18. P. 315–320.

9. Dižo J. Harušinec J. Blatnický M. Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web Conf.* 2017. Vol. 134. 00010. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713400010>

10. Iwnicki S.D. Stiche S. Orlova A. Hecht M. Dynamics of railway freight vehicles. *Veh. Syst. Dyn.* 2015. Vol. 53. P. 995–1033. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1037773>

11. Savoskin A.N. Akishin A.A. Yurchenko D. Dynamics and optimization of a new double-axle flexible bogie for high-speed trains. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit* 2018. Vol. 232. P. 1549–1558. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717737879>

12. Wu Q., Cole C., Spiragin M., Ma W. Preload on draft gear in freight trains. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit.* 2018. Vol. 232. P. 1615–1624. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717738849>

13. Вагон-цистерна моделі 15-1443-06 [Електронний ресурс] // Офіційний сайт ТОВ «ЕТС». Режим доступу: <https://www.etservice.com.ua/uk/item/15-1443-06-ua/> (дата звернення: 20.04.2025).

14. Вагони-цистерни [Електронний ресурс] // Офіційний сайт компанії «Азовмаш». Режим доступу: <https://www.azovmash.com.ua/catalog/25> (дата звернення: 20.04.2025).

15. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні магістральні. Загальні технічні умови. [Чинний від 01.07.2015]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2014. 48 с.

16. Bolourchi P., Uysal S. Forest fire detection in wireless sensor network using fuzzy logic. *Proceedings of the Fifth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks.* Madrid, Spain, 5–7 June 2013. P. 83–87.

17. USA Today. NHTSA to require backup cameras on all vehicles [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.usatoday.com/story/money/cars/2014/03/31/nhtsa-rear-view-cameras/7114531/> (дата звернення: 11.10.2017).

18. Nikitchenko A., Artiukh V., Shevchenko D., Murgul V. Modeling of operation of elastic-frictional draft gear by NX Motion software. *Procedia Engineering.* 2017. Vol. 187. P. 790–796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.441>

M. B. Kelrih

National Transport University,
Educational and Scientific Kyiv Institute of Railway Transport
19 Ivana Ohienka St., Kyiv, 03049, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9045-9538>

V. V. Mamontov

National Transport University,
Educational and Scientific Kyiv Institute of Railway Transport
19 Ivana Ohienka St., Kyiv, 03049, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2950-4769>

ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE BOILER AND THE FRAME OF THE TANK CAR MODEL 15-1443-06

The paper presents the results of a comprehensive experimental and analytical assessment of the stress-strain state of the tank and frame of the 15-1443-06 tank car during qualification tests. The object of the study is a prototype tank car for the transportation of gasoline and light petroleum products developed by LLC “GSKBV named after V. M. Bubnov”. The tests were carried out in accordance with current national and interstate standards governing the strength of freight cars under static, dynamic and repair loading regimes. The research methodology included a series of static tests under regimes I, Ia, Ib, Iv, III, repair regimes and a special test regime that reproduced vertical loads from tank filling, internal and external pressure, longitudinal compressive and tensile forces, transverse forces arising from coupler interaction in curves, as well as loads occurring during jacking operations. Strains were recorded using electrical resistance strain gauges installed on the tank shell, heads, in the manhole area, in the regions of support units, and on the center sill, body bolsters, side sills, end and intermediate beams of the frame. Based on the measured relative strains, normal, shear and equivalent stresses were calculated and compared with analytical estimates and allowable stresses for steels of the 09G2S type, taking into account the prescribed safety factors. It is shown that, for all investigated regimes, the total equivalent stresses in the control cross-sections do not exceed the limiting values specified by the standards, while local peak stresses are caused by geometric features and stress concentration near welded joints but remain within acceptable safety margins. Comparison of experimental and analytical data confirmed the adequacy of the adopted structural model, the correctness of the defined loading regimes and the selected layout of strain-gauge control points. The results obtained demonstrate that the 15-1443-06 tank car complies with the strength and safety requirements of the regulatory documentation and provide grounds to consider the production technically ready for series manufacturing of this design. The proposed approach can be used as a reference methodology for engineering tests and verification of computational models for advanced freight rolling stock.

Key words: tank car, qualification tests, stress-strain state, strain measurement, equivalent stresses, railroad transport, railway transport.

REFERENCES

1. Bezliudko, O. V., & Danylenko, E. I. (2020). Design and production of tank cars for petroleum products: Textbook Dnipro, Ukraine: Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 192. [in Ukrainian].
2. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2022). Analysis of the dynamics and strength of the symmetrically loaded bearing structure of a tank car with friction bonds implemented by means of elastic elements in the tank supports. *Symmetry*, 14(4), 727. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14040727>
3. Fomin, O. V., & Lovska, A. O. (2020). Investigation of dynamic loading of freight wagons taking into account the effect of vertical load during operation. *Bulletin of the National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”. Series: Technical Sciences*, 4, 147–155. Retrieved April 20, 2025, from <https://journals.nupp.edu.ua/znp/article/view/2517> [in Ukrainian].
4. Xu, S., Chen, J., McKinley, J., Liang, J., Yang, L., & Laver, A. (2021). Evaluation of current tank car TC128B steel weld performance (Canmet MATERIALS Report No. CMAT-2020-WF 49867504). Natural Resources Canada. Retrieved April 20, 2025, from https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/tc/T44-3-20-2021-eng.pdf
5. Fomin, O. V., & Lovska, A. O. (2021). Investigation of strength and dynamic performance of tank cars during operation on railway transport. Kyiv, Ukraine: National Transport University. [in Ukrainian].

6. Štastniak, P., Kurčík, P., & Pavlík, A. (2018). Design of a new railway wagon for intermodal transport with an adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*, 235, 00030. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500030>
7. Dižo, J., Harušinec, J., & Blatnický, M. (2018). Computation of modal properties of two types of freight wagon bogie frames using the finite element method. *Manufacturing Technology*, 18, 208–214.
8. Štastniak, P., Moravčík, M., Smetanka, L., & Baran, P. (2018). Strength investigation of main frame in new track-friendly railway bogie. *Manufacturing Technology*, 18, 315–320.
9. Dižo, J., Harušinec, J., & Blatnický, M. (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00010. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713400010>
10. Iwnicki, S. D., Stichel, S., Orlova, A., & Hecht, M. (2015). Dynamics of railway freight vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 53, 995–1033. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1037773>
11. Savoskin, A. N., Akishin, A. A., & Yurchenko, D. (2018). Dynamics and optimization of a new double-axle flexible bogie for high-speed trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232, 1549–1558. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717737879>
12. Wu, Q., Cole, C., Spiryagin, M., & Ma, W. (2018). Preload on draft gear in freight trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232, 1615–1624. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717738849>
13. ETS LLC. (n.d.). 15-1443-06 tank car Retrieved April 20, 2025, from <https://www.etservice.com.ua/uk/item/15-1443-06-ua/> [in Ukrainian].
14. Azovmash. (n.d.). Tank cars Retrieved April 20, 2025, from <https://www.azovmash.com/ua/catalog/25> [in Ukrainian].
15. State Enterprise «UkrNDNC». (2014). DSTU 7598:2014. Freight mainline wagons. General technical requirements. Kyiv, Ukraine: SE «UkrNDNC». [in Ukrainian].
16. Bolourchi, P., & Uysal, S. (2013). Forest fire detection in wireless sensor networks using fuzzy logic. In *Proceedings of the 2013 Fifth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, 83–87.
17. USA Today. (2014, March 31). NHTSA to require backup cameras on all vehicles. Retrieved October 11, 2017, from <https://www.usatoday.com/story/money/cars/2014/03/31/nhtsa-rear-view-cameras/7114531/>
18. Nikitchenko, A., Artiukh, V., Shevchenko, D., & Murgul, V. (2017). Modeling of operation of elastic-frictional draft gear by NX Motion software. *Procedia Engineering*, 187, 790–796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.441>

В. В. Федоров

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380536661384, E-mail: f.vladimir.ua@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0963-7265>

В. О. Шушмарченко

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380536661384, E-mail: vasylkremen77@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7580-8501>

О. О. Бородай

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380536661384, E-mail: saleksbor@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8677-5776>

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ БУНКЕРНИХ ВАГОНІВ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗЕРНА ПІСЛЯ СХОДЖЕННЯ З РЕЙОК НА ПІД'ЇЗНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЯХ

Проаналізовано дослідження, що присвячені проблемі сходження рухомого складу з залізничних рейок, підвищенню безпеки руху поїздів, впровадженню конкретних заходів щодо запобігання аварійним ситуаціям і мінімізації ризиків на залізничному транспорті. За результатами аналізу досліджень встановлено, що найбільше транспортних подій у 2025 році, пов'язаних зі сходженням з рейок рухомого складу, зафіксовано на під'їзних коліях суб'єктів господарювання залізничного транспорту. Виявлено, що питанню досліджень пошкоджень та несправностей бункерних вагонів-хоперів для перевезення зерна після їх сходжень із залізничної колії достатньої уваги не приділялось. Тому запропоновано це питання детальніше дослідити в цій роботі.

Визначено, що механічні пошкодження та несправності після сходжень вагонів-хоперів із залізничної колії переважно стосуються несної конструкції, кузовів та підвісного обладнання гальмівної системи, в меншій мірі таких складових вагонів як автозцепний пристрій, ходові частини. Описано виявлені пошкодження вузлів несної конструкції, кузова, елементів підвісного обладнання гальмівної системи вагонів-хоперів. Представлено у відсотковому відношенні пошкодження окремих вузлів до загальної кількості виявлених несправностей. Представлено деякі із зафіксованих механічних пошкоджень окремих вузлів бункерних вагонів-хоперів після сходжень із залізничної колії. Встановлено, що в результаті сходжень вагонів-хоперів із залізничної колії пошкоджуються такі

© Федоров В.В., Шушмарченко В.О., Бородай О.О., 2025

вузли: хребтова балка, кінцева балка, шворнева балка, кутник підсилюючий шворневого вузла, обшива бокової і торцевої стін, обв'язка верхня, обв'язка кінцева, стійка торцева, бункери, дах вагона, кронштейн для підйому вагона, перехідні площадки, поручні, драбини для підйому на дах вагона, підніжка складач, пошкодження гальмівної системи.

Визначено доцільність відновлення конструкції вагонів-хоперів з метою можливості їх подальшої експлуатації. Надано рекомендації, що виявлені пошкодження можна усунути в об'ємі капітального ремонту.

Ключові слова: аварія, бункер, вагон-хопер, кузов, несна конструкція, сходження із рейок, обшива.

Вступ. Проблема сходу вантажних вагонів під час маневрів на станційних та сортувальних коліях АТ «Укрзалізниця», а також в умовах промислових підприємств, залишається актуальною, незважаючи на сучасні системи контролю безпеки руху.

Аналіз проблеми свідчить, що схід з рейок рухомого складу, трапляється через різноманітні причини, а саме неналежне утримання інфраструктури, несправності рухомого складу, порушення режиму маневрування та інші.

При сході з рейок рухомого складу трапляються падіння вантажів, розлив або розсипання небезпечних і шкідливих речовин, пошкодження споруд та інфраструктури. Зазначені аварії можуть загрожувати життю та здоров'ю людини, негативно впливати на оточуюче середовище, а також нести збитковий економічний ефект.

Аналіз останніх досліджень. Стаття [1] описує вирішення питання оцінки та управління ризиками пов'язаних з безпекою руху поїздів, що неможливо організувати без запровадження системи управління якістю та принципів управління якістю діяльності АТ «Українська залізниця», яке спрямовано на поліпшення загальної дієвості та забезпечення міцної основи для сталого розвитку підприємства. Система управління безпекою руху є однією з основних компонентів системи менеджменту якості АТ «Українська залізниця», та повинна забезпечувати постійне вдосконалення технологій безпечного перевізного процесу вантажів, забезпечувати підготовку, прийняття та реалізацію організаційних, управлінських та технічних рішень, спрямованих на убезпечення стійкого руху поїздів, збереження життя й здоров'я людей, майна, довкілля та виявлення й оцінку чинників, що впливають на рівень безпеки перевезень.

Публікація [2] присвячена розвитку методичних підходів до визначення ймовірних причин порушення умов стійкості вантажних вагонів від сходження з рейок у складі поїздів. В роботі представлено аналіз результатів попередніх досліджень проблем забезпечення безпеки технічної експлуатації рухомого складу. З цього випливає завдання подальшого удосконалення методів оперативного аналізу випадків сходжень з рейок вантажних вагонів шляхом залучення засобів комп'ютерного моделювання динаміки рухомого складу.

У статті [3] виконано аналіз причин виникнення аварій на залізничних коліях та запропоновано способи підвищення безпеки. Авторами пропонується зменшити інтенсивність небезпечних відмов технічних засобів, та підвищити їх надійність за рахунок збільшення запасу міцності. Також представлено сценарії зіткнення, що складають основу вимог до удароміцності кузова транспортного засобу.

В дисертації [4] наведено результат аналізу порушень у вантажному русі, які спричинили сходи рухомого складу з рейок при маневрових роботах, що мають ті-

сний зв'язок з розширенням колії, а саме угон рейкових плітей та кушова гнилість шпал.

В роботі [5] проаналізовано роботу Державної служби України з безпеки на транспорті протягом I півріччя 2025 року, реалізацію державної політики у сфері безпеки на автомобільному транспорті загального користування (далі – автомобільний транспорт), міському електричному (трамвай, тролейбус), залізничному транспорті. Розглянуто системні заходи щодо запобігання аварійним ситуаціям і мінімізації ризиків на залізничному транспорті.

Згідно досліджень, у 2025 році обліковано 35 транспортних подій аварій, пов'язаних зі сходженням з рейок рухомого складу, з яких: 14 аварій сталися на під'їзних коліях суб'єктів господарювання залізничного транспорту; 11 аварій сталися на станційних коліях АТ «Укрзалізниця»; 10 аварій сталися при виконанні поїзної роботи.

Даний аналіз показує низький рівень відповідальності суб'єктів господарювання, власників під'їзних колій, в частині утримання залізничних колій, правил закріплення вагонів та забезпечення безпеки руху на під'їзних залізничних коліях. Підприємства (суб'єкти господарювання, власники під'їзних залізничних колій) не розробляють та не впроваджують власну систему управління безпекою руху, що містить сукупність методів, підходів до організації та заходів, які підприємство застосовує для забезпечення безпеки руху залізничного транспорту.

В статті [6] наведені результати аналізу сходів рухомого складу в кривих ділянках колії, що мали місце на залізницях України. Досліджено розподіл сходів за факторами впливу, такими як: радіус кривої, швидкість руху рухомого складу, тип рухомого складу, що зійшов, та причини сходів. Також проведено аналіз стану колії в кривих ділянках за даними вагонів-колієвимірювачів.

Робота [7] присвячена дослідженню процесу динамічної взаємодії рухомого складу та рейкової колії за допомогою математичних моделей. Розроблена математична модель пасажирського вагона, дизель-поїзда та удосконалена модель вантажного вагона. Це дозволило прискорити процес дослідження їх динамічних показників, полегшити процес встановлення граничних значень параметрів технічного стану та оцінити наслідки зміни цих параметрів у визначених умовах роботи.

За результатами аналізу наведених досліджень встановлено, що найбільше транспортних подій у 2025 році, пов'язаних із сходженням з рейок рухомого складу, сталося на під'їзних коліях суб'єктів господарювання залізничного транспорту. Це свідчить про необхідність розроблення промисловими підприємствами посиленних заходів для підвищення безпеки руху під час пересування під'їзними залізничними коліями. Також визначено, що питання дослідження пошкоджень та несправностей вагонів-хоперів для перевезення зерна після їх сходжень із під'їзних залізничних колій в цих роботах детально не розглядалось.

Мета статті – дослідження характерних пошкоджень вагонів-хоперів для перевезення зерна після їх сходження із залізничної колії внаслідок аварійних ситуацій.

Матеріал та результати досліджень.

ДП «УкрНДІВ» проводить роботи з визначення несправностей вантажних вагонів, що виникли під час сходів з рейок, з метою оцінки їх технічного стану, визначення доцільності ремонту та складання експертного висновку з рекомендаціями щодо призначення необхідного виду ремонту.

В рамках виконання підприємством робіт протягом 2025 року щодо визначення можливості ремонту та подальшої експлуатації вагонів-хоперів бункерного типу для перевезення зерна після їх сходження із залізничної колії проаналізовано хара-

ктер пошкоджень. В процесі виконання робіт фіксувались всі виявлені пошкодження механічного характеру. При цьому визначення геометричних розмірів пошкоджень вагонів-хоперів для зерна проводилися прямими вимірюваннями за допомогою засобів вимірювальної техніки. Методами неруйнівного контролю виявлялися деформації, злами, зноси, вигини, прогини, обриви, ослаблення кріплення вузлів і деталей, тріщини елементів рами і кузова вагона. В якості методів неруйнівного контролю використовувалися візуально-оптичний, ультразвуковий, капілярний.

При обстеженні в якості критеріїв відмови або граничного стану приймаються показники технічного стану вагона-хопера, які зазначені в ЦВ-0063 «Правила виключення вантажних вагонів з інвентарного парку» [8], СТП 04-032:2020 «Вагони вантажні. Настанова з деповського ремонту» [9], СТП 04-016:2018 «Вагони вантажні залізничного транспорту колії 1520 (1524) мм. Настанова з капітального ремонту» [10] та СТП 04-020:2018 «Вагони вантажні та контейнери. Правила ремонту при зварюванні та наплавленні» [11].

Несправності, що виникли після сходжень вагонів-хоперів із залізничної колії стосуються переважно несної конструкції та кузова. В складових системах вагонів-хоперів таких, як автозчепний пристрій, ходова частина та іншому обладнанні кількість відмов суттєво менша.

Під час обстеження технічного стану вагонів-хоперів, було виявлено наступні пошкодження вузлів несної конструкції та кузова:

- хребтова балка (деформація нижньої полки зета, розрив основного металу верхніх полок зетів, горизонтальна тріщина основного металу вертикальної стінки зета);
 - шворнева балка (деформація нижнього листа);
 - кінцева балка (деформації, розриви по основному металу, відрив від хребтової балки);
 - кутник підсилюючий шворневого вузла (деформація, розрив підсилюючого кутника);
 - обшива бокової і торцевої стін (деформація хвилеподібна);
 - обв'язка верхня (деформація);
 - обв'язка кінцева (деформація, розрив нижньої полки, відрив від шворневої балки);
 - стійка торцева (хвилеподібна деформація, відрив стійки від верхніх полок зетів хребтової балки у розетки ударної);
 - бункери (деформація кришки люка та обв'язки бункерів, деформація розвантажувального механізму та відрив кронштейнів розвантажувального механізму від хребтової балки);
 - дах вагона (деформація скату даху);
 - кронштейн для підйому вагона (деформація, відрив кронштейну, розрив основного металу);
 - перехідні площадки, поручні, драбини для підйому на дах вагона, підніжка складача (деформація перехідної площадки, відрив та зруйнування частини драбини, хвилеподібна деформація драбини, відрив підніжки складача).
- Слід зазначити що окрім несправностей несної конструкції та кузова вагонів-хоперів, виявлені суттєві пошкодження пов'язані з гальмівною системою. А саме:
- розкомплектування, деформації та злами гальмівної важільної передачі;
 - розкомплектування, деформації та злами гальмівної магістралі та арматури;
 - деформація поздовжньої балки кріплення кронштейна стоянкового гальма.
- На рисунку 1 представлено пошкодження по окремих вузлах вагона-хопера у

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

відсотковому співвідношенні, до загальної кількості виявлених несправностей.

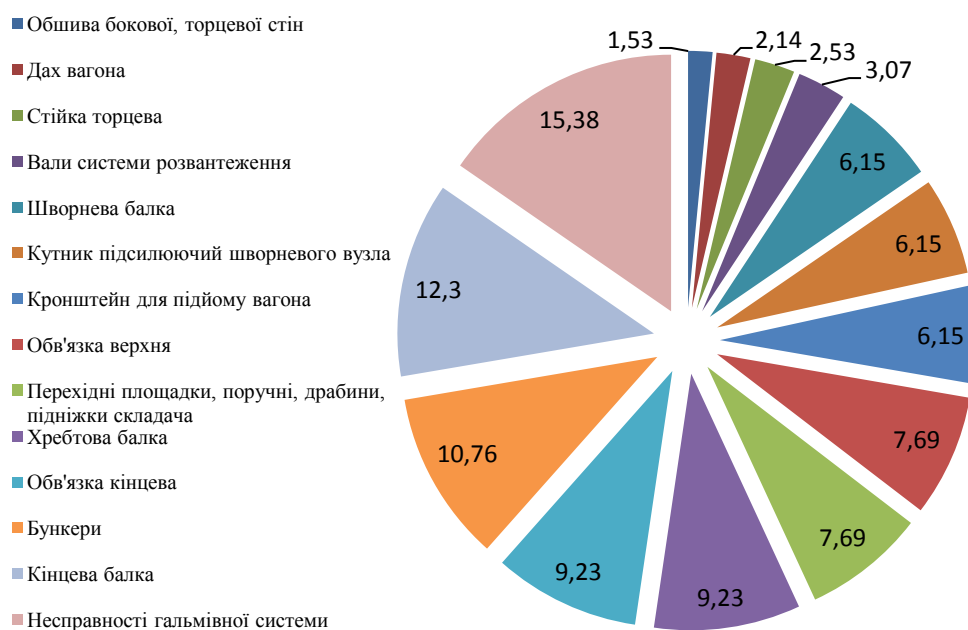


Рис. 1. Діаграма пошкоджень по окремим вузлам вагона-хопера у відсотковому співвідношенні до загальної кількості виявлених несправностей

На рисунку 2 представлено відношення пошкоджень окремих вузлів до загальної кількості цих вузлів у відсотковому співвідношенні.

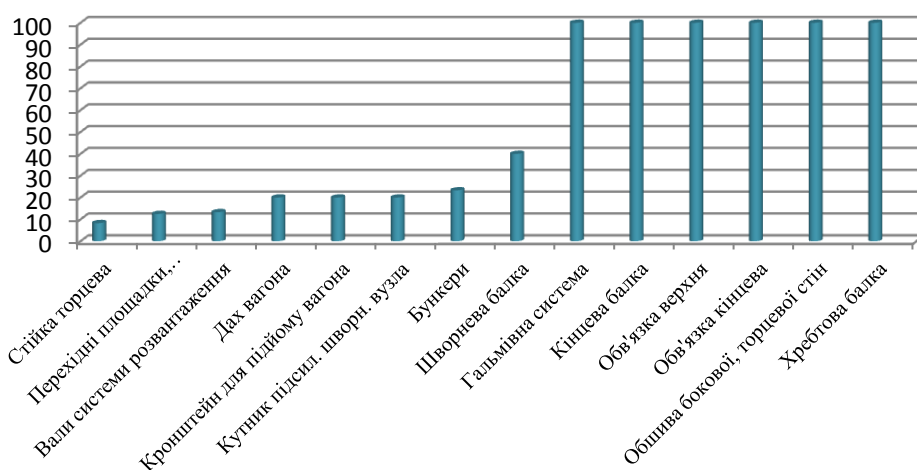


Рис. 2. Діаграма пошкоджуваності окремих вузлів до загальної кількості цих вузлів у відсотковому співвідношенні

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Деякі із зафіксованих механічних пошкоджень бункерних вагонів-хоперів після їх сходжень із залізничної колії наведено на рис. 3-10.



Рис. 3. Пошкодження кінцевої балки



Рис. 4. Пошкодження бункера



Рис. 5. Пошкодження верхньої полки хребтової балки



Рис. 6. Пошкодження обшивки бокової



Рис. 7. Пошкодження нижньої полки шворневої балки



Рис. 8. Пошкодження підсилювальної косинки шворневого вузла



Рис. 9. Пошкодження кронштейна для підйому кузова вагона



Рис. 10. Пошкодження обшивки рами

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За результатами проведених досліджень складено експертні висновки, щодо технічного обстеження вагонів-хоперів бункерного типу для перевезення зерна. З метою відновлення експлуатаційного ресурсу вагонів-хоперів, рекомендовано провести ремонт їх вузлів і деталей відповідно до вимог керівних документів. Разом з тим, встановлено, що виявлені пошкодження досліджених вагонів-хоперів можливо усунути в об'ємі капітального ремонту.

Висновки.

- ✓ Проведений аналіз несправностей та механічних пошкоджень, що виникли під час сходжень із під'їзних залізничних колій вагонів-хоперів для перевезення зерна.
- ✓ За результатами технічного обстеження визначено найбільш поширені механічні пошкодження конструкції вагонів-хоперів. Встановлено, що найчастіше в результаті аварійних сходжень вагонів-хоперів пошкоджуються такі вузли: хребтова балка, кінцева балка, обшива бокової і торцевої стін, обв'язка верхня, обв'язка кінцева, пошкодження гальмівної системи.
- ✓ Наведено характерні механічні пошкодження бункерних вагонів-хоперів після їх сходження із під'їзних залізничних колій.
- ✓ Визначено доцільність відновлення конструкції вагонів-хоперів з метою можливості подальшої експлуатації та надано рекомендації щодо пропонованого виду ремонту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шиш В.О., Ребриков С.Я., Пузир В.Г. Оцінка ризиків виникнення транспортних подій на залізничному транспорті. Залізничний транспорт України. 2022. № 3. С. 11–20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2022-144-3-11-20>
2. Дьомін Ю.В., Черняк Г.Ю. До визначення ймовірних причин сходжень з рейок вантажних вагонів. Залізничний транспорт України. 2020. № 3. С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2020-136-3-35-42>
3. Фомін О.В., Горбунов М.І., Мурашова Н.Г., Швець А.О., Сова С.С. Аналіз причин виникнення аварій на залізничних коліях та способи підвищення рівня безпеки. Локомотив-інформ. 2020. № 1. С. 7–12.
4. Новіков В.В. Підвищення строку експлуатації рейок в кривих ділянках колії зі скріпленнями роздільного типу. 05.22.06 – Залізнична колія 27 – Транспорт. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/dis_novikov.pdf
5. Аналіз стану безпеки руху в структурі АТ «Укрзалізниця» за 2020 рік. Київ: АТ «Укрзалізниця», 2025. 10 с.
6. Рибкін В.В., Циганенко В.В., Губар О.В., Халіпова Н.В. Аналіз матеріалів розслідування сходів рухомого складу в кривих ділянках колії радіусом менше 350 м. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізничн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2008. Вип. 24. С. 94–99. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8ffd6703-fa34-4ddc-b21c-410b5aa511f5/content>
7. Батіг А. В., Кузишин А. Я. Дослідження випадків сходів рухомого складу з рейок за допомогою математичного моделювання. Теорія та практика судової експертизи і криміналістики. 2019. № 20. С. 340–350. DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.2.2019.26>
8. ЦВ-0063. Правила виключення вантажних вагонів із інвентарного парку. Київ: АТ «Укрзалізниця», 2020. 38 с.
9. СТП 04-032. Вагони вантажні. Настанова з деповського ремонту. Київ: АТ «Укрзалізниця», 2020. 151 с.
10. СТП 04-016: Вагони вантажні залізничного транспорту колії 1520 (1524) мм. Настанова з капітального ремонту. Київ: АТ «Укрзалізниця», 2018. 179 с.
11. СТП 04-020. Вагони вантажні та контейнери. Правила ремонту при зварюванні та наплавленні. Київ: АТ «Укрзалізниця», 2018. 246 с.

V.V. Fedorov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»

33 I. Prykhodka Street, Kremenchuk, Poltava Region, 39621, Ukraine

Tel.: +380536661384, E-mail: f.vladimir.ua@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0963-7265>

V.O. Shushmarchenko

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»

33 I. Prykhodka Street, Kremenchuk, Poltava Region, 39621, Ukraine

Tel.: +380536661384, E-mail: vasylkremen77@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7580-8501>

O.O. Borodai

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»

33 I. Prykhodka Street, Kremenchuk, Poltava Region, 39621, Ukraine

Tel.: +380536661384, E-mail: saleksbor@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8677-5776>

**STUDY OF GRAIN HOPPERS DAMAGE AFTER DERAILMENT ON
RAILWAY ACCESS TRACKS**

Research on the problem of rolling stock derailment, improving train safety, and implementing specific measures to prevent accidents and minimise risks in rail transport has been analysed. The analysis of the studies shows that in 2025, most transport incidents related to rolling stock derailment were recorded on the access tracks of railway transport operators. It was found that insufficient attention had been paid to the issue of researching damage and malfunctions of hopper cars for grain transportation after they derailed. Therefore, it was proposed to investigate this issue in more detail in this paper.

It has been determined that mechanical damage and malfunctions after hopper cars derail from the railway track mainly occur in the load-bearing structure, bodies and suspension equipment of the braking system, and to a lesser extent in such components of railcars as automatic coupling devices and running gear. The damage found to the load-bearing structure, body, and suspension components of the brake system of hopper cars is described. The damage to individual components is presented as a percentage of the total number of malfunctions found. The actions taken in response to the recorded mechanical damage to individual components of hopper cars after derailment from the railway track are presented. It has been established that the following components are damaged as a result of hopper cars derailing from the railway track: the centre sill, buffer beam, bolster beam, kingpin assembly reinforcing bracket, the side and end wall cladding, the upper frame member, end frame member, rear poat, hoppers, wagon roof, wagon lifting bracket, transition

platforms, handrails, ladders for climbing onto the wagon roof, footboard, damage to the braking system.

The feasibility of reconstructing hopper cars for further operation has been determined. Recommendations concerning damage elimination during a major overhaul have been made.

Key words: accident, hopper, hopper car, body, load-bearing structure, derailment, cladding.

REFERENCES

1. Shysh, V.O., Rebrykov S.Ia., & Puzyr, V.H. (2022). Otsinka ryzykiv vynyknennia transportnykh podii na zaliznychnomu transporti [Assessment of risks of transport incidents in railway transport]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy - Railway Transport of Ukraine*, 3, 11–20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2022-144-3-11-20> [in Ukrainian]
2. Domin, Yu.V., & Cherniak, H.Iu. (2020). Do vyznachennia ymovirnykh prychyn skhodzen z reioik vantazhnykh vahoniv [On determining the probable causes of freight car derailments]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy - Railway Transport of Ukraine*, 3, 35–42. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2020-136-3-35-42> [in Ukrainian]
3. Fomin, O.V., Horbunov, M.I., Murashova, N.H., Shvets, A.O., & Sova, S.S. (2020). Analiz prychyn vynyknennia avarii na zaliznychnykh koliiakh ta sposoby pidvyshchennia rivnia bezpeky [Analysis of the causes of accidents on railway tracks and ways to improve safety]. *Lokomotyv-inform - Locomotive-Inform*, 1, 7–12 [in Ukrainian]
4. Novikov, V.V. (n.d). Pidvyshchennia stroku ekspluatatsii reioik v kryvykh diliankakh kolii zi skriplenniamy rozdilnoho typu [Increasing the service life of rails in curved sections of track with separate fastenings] 05.22.06 – Zaliznychna koliia [Railway track] 27 – Transport. *Candidate' thesis*. Retrieved from: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/dis_novikov.pdf [in Ukrainian]
5. *Analiz stanu bezpeky rukhu v strukturi AT «Ukrzaliznytsia» za 2020 rik [Analysis of traffic safety in the structure of JSC Ukrzaliznytsia for the year 2020]*. (2025). Kyiv: AT «Ukrzaliznytsia» [in Ukrainian]
6. Rybkin, V.V., Tsyhanenko, V.V., Hubar, O.V., & Khalipova, N.V. (2008). Analiz materialiv rozsliduvannia skhodiv rukhomoho skladu v kryvykh diliankakh kolii radiusom menshe 350 m [Analysis of materials from the investigation of rolling stock derailments on curved sections of track with a radius of less than 350 m]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana - Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian*, 24, 94–99. Dnipro. Retrieved from: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8ffd6703-fa34-4ddc-b21c-410b5aa511f5/content> [in Ukrainian]
7. Batih, A. V., & Kuzyshyn, A. Ya. (2019). Doslidzhennia vypadkiv skhodu rukhomoho skladu z reioik za dopomohoiu matematychnoho modeliuвання [Investigation of cases of rolling stock derailment using mathematical modelling]. *Teoriia ta praktyka sudovoi ekspertyzy i kryminalistyky - Theory and practice of forensic examination and criminalistics*, 20, 340–350. DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.2.2019.26> [in Ukrainian]
8. Pravyla vykliuchennia vantazhnykh vahoniv iz inventarnoho parku [Rules for the exclusion of freight cars from the inventory fleet]. *TsV-0063* [in Ukrainian]
9. Vahony vantazhni. Nastanova z depovskoho remontu [Freight wagons. Depot repair guidelines] (2020). *STP 04-032:2020*
10. Vahony vantazhni zaliznychnoho transportu kolii 1520 (1524) mm. Nastanova z kapitalnoho remontu [Freight wagons for railway transport with a track gauge of 1520 (1524) mm. Overhaul guidelines]. (2018). *STP 04-016:2018* [in Ukrainian]
11. Vahony vantazhni ta konteinery. Pravyla remontu pry zvariuvanni ta naplavlenni [Freight wagons and containers. Rules for repair by welding and surfacing]. (2018). *STP 04-020:2018* [in Ukrainian].

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

1. Редакція ДП «УкрНДІВ» на постійній основі здійснює прийом наукових та науково-технічних статей в збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад», який виходить два рази на рік (червень, грудень поточного року), з такими термінами подання статей до редакційної колегії:

- до 15 травня (термін видання – червень);
 - до 15 листопада (термін видання – грудень).
- Мова видання: українська, англійська, німецька.

2. Критерії відбору статей редакційною колегією

До друку у Збірнику приймаються лише наукові статті, які відповідають тематичному спрямуванню журналу та мають такі необхідні елементи:

- постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;
- аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор,
- виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання);
- виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.

З метою дотримання зазначених вище вимог слід **жирним шрифтом виділити такі елементи статті: вступ, постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і публікацій, мета статті, методи дослідження, висновки.**

- дотримано науковий стиль викладення матеріалу статті
- оформлено посилання на кожне запозичення у тексті та відображено джерела у бібліографічному списку.
- обсяг статті не менше ніж 5 сторінок, та не більше ніж 25 сторінок.

Усі статті проходять процедуру експертної оцінки статей (перевірку на плагіат, здійснення редколегією внутрішнього та зовнішнього (за необхідністю) незалежного рецензування статей, що готуються до опублікування.

3. До редколегії Збірника має бути подано:

1. електронний варіант статті у форматі DOC,
2. рецензію на статтю (за необхідністю);
3. експертний висновок про можливість опублікування матеріалів (за необхідністю);
4. витяг з протоколу засідання кафедри чи лабораторії або наукового підрозділу, що рекомендує статтю до друку (за необхідністю);
5. довідку про авторів (порядковий номер (верхній індекс – арабська цифра та додатково зірочка для автора-кореспондента), місце роботи, науковий ступінь, вчене звання, повна поштова адреса (вулиця, корпус, будинок, назва населеного пункту, країна, індекс), номери телефонів, електронна пошта та ORCID: двома мовами – українською та англійською. Збір та обробка персональних даних здійснюються відповідно до вимог Закону України «Про захист персональних даних».
6. структуровану анотацію українською та англійською мовами (мета, методика, результати, наукова новизна, практична значимість) одним абзацем, обсягом від

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

250 до 300 слів з вирівнюванням по ширині. Анотація має обов'язково містити ключові слова (5 – 10 слів).

7. ліцензійний договір на використання твору (за умови прийняття статті до друку).

8. статтю, оформлену згідно вимог і завізовану власноручно підписом автора, за умови прийняття статті до друку. Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.

4. Вимоги до рукопису:

Матеріал треба викладати стисло, послідовно, стилістично грамотно. Не допускаються повтори, а також зайві подробиці під час переказу раніше опублікованих відомостей – замість цього подаються посилання на літературні джерела.

Текстові матеріали готуються та друкуються на аркушах білого одностороннього паперу з використанням комп'ютерних текстових редакторів MS Word for Windows, для набору формул використовують вбудовані редактори рівнянь, табличні матеріали можуть готуватись з використанням електронних таблиць (MS Excel). При цьому має застосовуватись шрифт Times New Roman.

Цитати, таблиці, статистичні дані, цифрові показники, що підвищують рівень аналітичних матеріалів, подаються з посиланням на джерела. Відповідальність за наведені показники несе автор. Терміни та позначення повинні відповідати чинним стандартам. Одиниці вимірювання слід подавати лише за міжнародною системою одиниць SI чи в одиницях, допущених до застосування в Україні згідно з вимогами чинних державних стандартів.

Остання сторінка статті має бути заповнена текстовою інформацією не менше, ніж на 50 відсотків.

Для авторів – не громадян України переклад назви статті, відомостей про автора, анотації та ключових слів на українську мову не є обов'язковим.

5. Вимоги до технічного оформлення статей

5.1. Параметри сторінки Збірника встановлені такі:

- розмір сторінки – 210x297 (A4)
- орієнтація книжна
- поля верхні та бокові – 35 мм;
- поле нижнє – 45 мм;
- відступ від верхнього колонтитула – 12 мм;
- відступ від нижнього колонтитула – 20 мм.

Верхній і нижній колонтитули, а також номери сторінок не вводити.

5.2. Матеріали набирають такими шрифтами:

- **УДК** – 11 пунктів, курсив, вирівнювання тексту по лівому краю;
- **автори** – 12 пунктів, напівжирний курсив вирівнювання тексту по лівому краю;
- **НАЗВА СТАТТІ** – усі прописні літери, 12 пунктів, напівжирний вирівнювання тексту по центру;
- **анотація** – 11 пунктів, напівжирний курсив вирівнювання тексту по ширині;
- **Ключові слова** (5–12 окремих слів та/або у складі декількох словосполучень) – з вирівнюванням по ширині
- **основний текст** – 11 пунктів, звичайний вирівнювання тексту по ширині;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- *слова Рисунок, Таблиця, Діаграма, Схема та їхні номери* – 11 пунктів, курсив;

Рис. 1. Зовнішній вигляд

Таблиця 1. – Окремі характеристики

- **назви рисунків, таблиць, діаграм, схем** – 11 пунктів, напівжирний, вирівнювання тексту по центру;
- **© Дьоміна А. К., 2018** – 12 пунктів, напівжирний курсив вирівнювання тексту по лівому краю;
- **заголовки в підрозділі** – 11 пунктів, напівжирний, вирівнювання тексту по лівому краю.
- **ЛІТЕРАТУРА** – 11 пунктів, напівжирний, вирівнювання тексту по центру;
- **блок англійською мовою та латиницею** – формат відповідає вимогам до оформлення статті: повний список (спів)авторів; відомості про (спів)авторів; назва статті; анотація; ключові слова. Розташовується по ширині сторінки після ЛІТЕРАТУРИ.
- **Джерела в списку** – 9 пунктів звичайним шрифтом, вирівнювання тексту по ширині;

5.3. Інтервали між елементами матеріалу такі:

- УДК – автори – 2;
- автори – назва статті – 3;
- назва статті – анотація – 2;
- анотація – основний текст – 1;
- основний текст – назва таблиці (верхній край рисунка, схеми, діаграми) – 2;
- назва таблиці – її верхній край (нижній край рисунка, діаграми, схеми – їхні назви) – 1;
- нижній край таблиці (назва рисунка, діаграми, схеми) – основний текст – 2;
- основний текст – знак авторського права – 1;
- основний текст – ЛІТЕРАТУРА – 1;
- ЛІТЕРАТУРА – список літератури – 1.
- Текст, формули, таблиці, рисунки, діаграми, схеми розміщуються на сторінці в одній колонці. Відступ першого рядка абзацу – 5 мм, інтервал між рядками – одинарний.
- Кожна наступна адреса та дані для листування починаються з нового рядка. (TNR 9, начертання звичайне, інтервал перед блоком – 0 пт, після – 12 пт).
- Не рекомендовано:
 - здійснювати ущільнення або розрідження інтервалів між літерами;
 - відбивати абзаци табуляціями або багаторазовими пробілами;
 - між ініціалами та прізвищем ставиться нерозривний пробіл (Ctrl+Shift+пробіл).

5.4. Вимоги до таблиць, діаграм, ілюстративного матеріалу:

Усі рисунки, таблиці, діаграми повинні мати назви та номери (у випадку, коли в одному матеріалі міститься два і більше названих елементів):

Якщо після тематичного заголовка підпису наводиться розшифрування, то між ними ставиться двокрапка і розміщену далі розшифровку набирають шрифтом 9 пт, наприклад:

Рис. 15. Дискове гальмо:

1 – гальмівний диск; 2 – кліщовий механізм

Слід використовувати лише графічні елементи, виконані у графічних редакторах із високою якістю деталей.

Також ілюстрації надаються у вигляді окремих файлів формату JPEG, TIFF (для растрових) або PSD (для растрових, виконаних у Photoshop), CDR (для векторних, виконаних в CorelDRAW). Фотографії повинні бути чіткими і контрастними. Якщо на фотографіях потрібно вказати номери (позиції), то це виконується у програмі Photoshop.

Написи на ілюстрації можливі двох видів: 1) написи на самій ілюстрації проти відповідних деталей; 2) позначення цифрами або літерами з виносом тексту написів у відповідний текст або під рисунком підпис. У статтях, призначених для кваліфікованого читача, немає потреби зберігати написи на ілюстраціях, тобто другий варіант є прийнятнішим.

Написи набираються шрифтом Times New Roman, кегль 10 пт, накреслення світле, курсивне.

Назви та номери таблиць розміщується над таблицями, а рисунків, діаграм, схем – під ними. Відривати назви від зазначених елементів забороняється. Посилання в тексті на таблиці даються у скороченому вигляді: «табл. 1», – звичайним шрифтом.

У статті тільки в разі нагальної потреби і в обмеженій кількості допускаються таблиці, розгорнуті по вертикалі (альбомна орієнтація).

Таблиці набираються в Microsoft Word.

Однакові за характером таблиці повинні бути оформлені одноманітно по всьому виданню (шрифти, лінійки, заголовки і граfi, розбивка між рядками і т.д.).

Таблиця має бути надрукована якомога ближче до першого посилання на неї в тексті.

Якщо таблиця не вміщається на одній сторінці, всі її колонки нумерують, а над перенесеною частиною таблиці справа надписують: «Продовження табл. 1» або «Закінчення табл. 1»

- **Забороняється** розміщувати окремі об'єкти (ілюстрації, підписуночі підписи, формули) у середині **таблиці!**

5.5. Вимоги до формул:

При використанні формул необхідно дотримуватися певних техніко-орфографічних правил.

Графічні файли з формулами, графіками, рисунками, схемами та фотографіями повинні бути розташовані в тексті в рамці MS Word. Номер формули проставляється справа в кінці рядка, в круглих дужках, не виходячи на поле. Формули розташовуються на сторінці по центру. Між ними та текстом витримують інтервал в один рядок.

Вводяться вони в графічному редакторі «Equation Editor» для «Windows». Латинські літери та позначення величин (символи) набирають курсивом, українські літери – тільки прямим шрифтом.

Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів треба подавати безпосередньо під формулою в тій послідовності, в якій вони дані у формулі. Значення кожного символа і числового коефіцієнта треба подавати з нового рядка. Перший рядок пояснення починають зі слова «де» без двокрапки.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

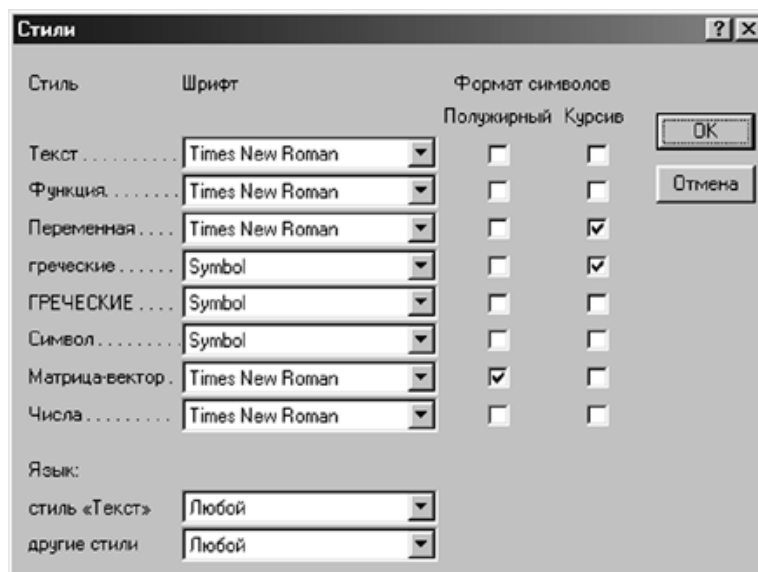
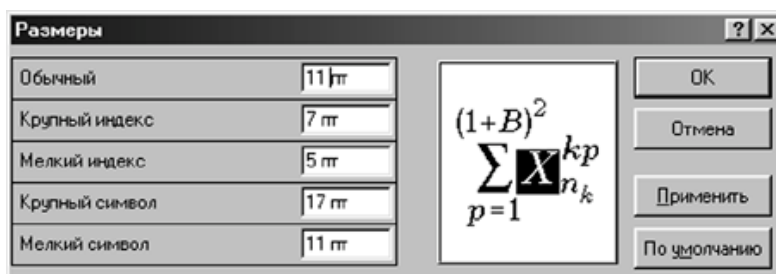
Рівняння і формули треба виділяти з тексту вільними рядками. Вище і нижче кожної формули потрібно залишити не менше одного вільного рядка. Якщо рівняння не вміщується в один рядок, його слід перенести після знака рівності (=) або після знаків плюс (+), мінус (–), множення (·) і ділення (:).

Загальне правило пунктуації в тексті з формулами таке: формула входить до речення як його рівноправний елемент. Тому в кінці формул і в тексті перед ними розділові знаки ставлять відповідно до правил пунктуації.

Двокрапку перед формулою ставлять лише у випадках, передбачених правилами пунктуації: а) у тексті перед формулою є узагальнююче слово; б) цього вимагає побудова тексту, що передує формулі.

Розділовими знаками між формулами, котрі йдуть одна за одною і не відокремлені текстом, можуть бути кома або крапка з комою безпосередньо за формулою до її номера.

Параметри редактора формул:



Для перевірки правильності написання формул просимо надавати публікацію також в **PDF** форматі, тому що різні версії програмного забезпечення текстових редакторів можуть бути несумісні і змінювати зміст статті.

5.6. ЛІТЕРАТУРА (бібліографічний опис джерел, використаних при підготовці статті, мовою оригіналу) та оформлений згідно зі стандартом ДСТУ 8302:2015.

- обсяг – 7-20 джерел (за виключенням оглядових статей);

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- більша частина джерел має відображати сучасний стан наукових досліджень та бути не старша 10 років;

- doi, за наявності, має бути наведено у кінці посилання

- Всі бібліографічні описи джерел подаються мовою оригіналу. При посиланні на використану літературу потрібно зазначити назву використаного видання та (у квадратних дужках звичайним шрифтом) його номер у списку, наприклад: «...і визначаються тарифною схемою Прейскуранта 0–01 [2]».

- самоцитування не має перевищувати 20 % від загальної кількості посилань

- у переліку бажано зазначити сучасну англomовну літературу з ретроспективою не більше 5 років.

- після англomовної анотації подається **REFERENCES** – транслітерований список літератури (латинськими літерами), оформлений згідно стандарту APA (American Psychological Association).

Транслітерований список літератури, відповідно до вимог наукометричних баз SCOPUS та Web of Science, є повним аналогом списку літератури і виконується шляхом транслітерації мови оригіналу латиницею. При цьому порядок і кількість джерел у списку літератури мають залишатися незмінними. Посилання на англomовні джерела не транслітеруються.

Під час складання транслітерованого списку літератури рекомендовано користуватися положеннями Постанови КМ України від 27 січня 2010 року № 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» затверджує офіційну транслітерацію українського алфавіту латиницею та встановлює діючі правила транслітерації прізвищ та імен громадян України латиницею в закордонних паспортах. Он-лайн транслітератор (<http://translit.kh.ua/?passport>).

REQUIREMENTS FOR DRAWING-UP OF ARTICLES

1. The Editorial Board of SE «UkrNDIV» on an ongoing basis accepts scientific and scientific and technical articles to be published in the Collection of scientific works «Railbound Rolling Stock», which is published twice a year (June, December of the current year), with the following deadlines for submitting articles to the Editorial Board:

- until May 15 (the publication deadline is June);
 - until November 15 (the publication deadline is December).
- Publication languages are Ukrainian, English, German.

2. Criteria for the selection of articles by the Editorial Board

Only scientific articles that correspond to the topic areas of the journal and have the following necessary elements are accepted for publication:

- statement of the problem in a general form and its connection with important scientific or practical tasks;
- analysis of the latest research and publications in which the solution to this problem was initiated and on which the author relies,
- selection of previously unresolved parts of the general problem, to which the specified article is devoted; formulation of the objects of the article (statement of the task);
- presentation of the main material of the research with a full justification of the obtained scientific results;
- conclusions from this study and prospects for further exploration in this direction.

In order to comply with the above requirements, the following elements of the article should be highlighted in bold: Introduction, Problem statement, Analysis of recent research and publications, Purpose of the article, Research methods, Conclusions.

- the scientific style of presenting the material of the article is observed
- each borrowing in the text is referenced and the sources are set in the bibliographic list.
- the length of the article is not less than 5 pages, and not more than 25 pages.

3. The following items should be submitted to the Editorial Board:

1. electronic version of the article in DOC format,
2. a review of the article (if necessary);
3. expert opinion on the possibility of publishing materials (if necessary);
4. extract from the minutes of the meeting of the department or laboratory or scientific unit recommending the article for publication (if necessary);
5. certificate about the authors (serial number (upper index – Arabic numeral and additionally an asterisk for the corresponding author), place of work, scientific degree, academic title, full postal address (street, building, name of the settlement, country, index), phone numbers, e-mail and ORCID: in two languages - Ukrainian and English. The collection and processing of personal data is carried out in accordance with the requirements of the Law of Ukraine «On the Protection of Personal Data».
6. a structured abstract in Ukrainian and English (purpose, methodology, results, scientific novelty, practical significance) in one paragraph, from 250 to 300 words with width alignment. The abstract must necessarily contain keywords (5-10 words).
7. license agreement for the use of the work (subject to acceptance of the article for publication).

8. an article prepared according to the requirements and endorsed by the author's handwritten signature, provided that the article is accepted for publication. The author is responsible for the materials presented in the article.

4 Requirements for the manuscript:

- The material should be presented concisely, consistently, stylistically competently. Repetitions and redundant details are not allowed when retelling previously published information. References to literary sources are provided instead.

- Text materials are prepared and printed on sheets of white single-grade paper using MS Word for Windows computer text editors, built-in equation editors are used to set formulas, tabular materials can be prepared using electronic spreadsheets (MS Excel). Times New Roman font should be used.

- Citations, tables, statistical data, digital indicators, which increase the level of analytical materials, are provided with references to sources. The author is responsible for the given indicators. Terms and designations must comply with applicable standards. Units of measurement should be provided only according to the international SI system of units or in units approved for use in Ukraine in accordance with the requirements of current state standards.

- The last page of the article should be filled with text information at least 50 percent.

- For authors who are not citizens of Ukraine, the translation of the title of the article, information about the author, abstract and keywords into Ukrainian is not mandatory.

5. Requirements for formatting of articles

5.1. The parameters of the page are set as follows:

- page size is 210x297 (A4)
 - book orientation
 - top and side margins – 35 mm;
 - lower margin – 45 mm;
 - indentation from the upper footer – 12 mm;
 - indentation from the footer – 20 mm.
- Headers and footers, as well as page numbers, should not be entered.

5.2. Materials are typed in the following fonts:

- **UDC** – 11 points, italics, text alignment on the left edge;
- **authors** – 12 points, semi-bold italic text alignment on the left edge;
- **TITLE OF THE ARTICLE** – all capital letters, 12 points, bold text alignment in the center;
- **abstract** – 11 points, bold italic text alignment;
- **Keywords** (5–12 individual words and/or as part of several word combinations) – with width alignment
- **body text** – 11 points, normal alignment of the text in width;
- **words Figure, Table, Diagram, Scheme and their numbers** - 11 points, italics;

Fig. 1. Appearance

Table 1. – Specific characteristics

- **names of figures, tables, diagrams, schemes** - 11 points, bold, text alignment in the center;

- © *Dyomina A. K., 2018* – 12 points, semi-bold italic text alignment on the left edge;
- **headings in the subsection** – 11 points, bold, aligning the text on the left edge.
- **REFERENCES** – 11 points, bold, text aligned in the center;
- **a block in English and Latin** – the format meets the requirements for the design of the article: a complete list of (co)authors; information about (co)authors; title of the article; Abstract; Keywords. It is located across the page after REFERENCES.
- REFERENCES – 9 points in normal font, aligning the text by width;

5.3. Spaces in text are as follows:

- UDC – authors – 2;
- authors – title of the article – 3;
- title of the article – abstract – 2;
- abstract – main text – 1;
- main text – name of the table (top edge of figure, scheme, diagram) – 2;
- the name of the table – its upper edge (the lower edge of the figure, diagram, scheme – their names) – 1;
- the lower edge of the table (name of figure, diagram, scheme) – main text – 2;
- main text – copyright sign – 1;
- main text – REFERENCES – 1;
- REFERENCES - list of references - 1.
- Text, formulas, tables, figures, diagrams, schemes are placed on the page in one column. The indentation of the first line of the paragraph is 5 mm, the spacing between lines is single.
- Each subsequent address and correspondence data starts on a new line. (TNR 9, normal drawing, interval before the block - 0 pt, after - 12 pt).
- Not recommended:
 - to compact or thin the intervals between letters;
 - set off paragraphs with tabs or multiple spaces;
 - a non-breaking space is placed between the initials and the last name (Ctrl+Shift+space).

5.4. Requirements for tables, diagrams, illustrative material:

All figures, tables, diagrams must have names and numbers (in the case when the same material contains two or more named elements):

If a transcript is given after the thematic title of the signature, then a colon shall be placed between them and the transcript placed next is typed in 9 pt font, for example:

Fig. 15. Disc brake:

1 – brake disc; 2 – pincer mechanism

Only graphic elements made in graphic editors with high quality details should be used.

Illustrations are also provided as separate JPEG, TIFF (for bitmaps) or PSD (for bitmaps made in Photoshop), CDR (for vector files made in CorelDRAW) formats. Photos should be clear and contrast. If you need to specify numbers (positions) on photos, then this is done in Photoshop.

There are two types of inscriptions on the illustration: 1) inscriptions on the illustration itself against the corresponding details; 2) marking with numbers or letters

with the text of the inscriptions inserted into the appropriate text or a signature under the drawing. In articles intended for a qualified reader, there is no need to save captions on illustrations, that is, the second option is more acceptable.

Inscriptions are typed in Times New Roman font, 10 pt point, light, italic.

Names and numbers of tables are placed above the tables, and figures, diagrams, schemes - below them. It is forbidden to separate the names from the specified elements. References in the text to tables are given in abbreviated form: «table. 1», in normal font.

In the article, only in case of urgent need and in a limited number, tables deployed vertically (landscape orientation) are allowed.

Tables are typed in Microsoft Word.

Tables of the same nature must be designed uniformly throughout the publication (fonts, rulers, headings and columns, breakdown between lines, etc.).

The table should be printed as close as possible to the first reference to it in the text.

If the table does not fit on one page, all its columns should be numbered, and above the transferred part of the table on the right «Continuation of the Table 1» or «End of Table. 1» should be written:

- It is forbidden to place separate objects (illustrations, captions, formulas) in the middle of the table!

5. 5. Requirements for formulas:

- Certain technical and spelling rules must be followed when using formulas.

- Graphical files with formulas, graphs, figures, diagrams and photographs must be located in the text in the MS Word frame. The number of the formula is placed on the right at the end of the line, in round brackets, without entering the field. Formulas are located in the center of the page. Between them and the text there is an interval of one line.

- They are entered in the graphic editor «Equation Editor» for «Windows». Latin letters and designations of values (symbols) are typed in italics, Ukrainian letters - only in straight font.

- Explanations of the values of symbols and numerical coefficients should be given directly below the formula in the sequence in which they are given in the formula. The value of each symbol and numerical coefficient must be entered on a new line. The first line of the explanation begins with the word «de» without a colon. • Equations and formulas should be separated from the text by free lines. Above and below each formula, you must leave at least one free line. If the equation does not fit on one line, it should be moved after the equal sign (=) or after the plus (+), minus (-), multiplication (•), and division (:) signs.

- The general rule of punctuation in a text with formulas is as follows: the formula enters the sentence as its equal element. Therefore, punctuation marks are placed at the end of formulas and in the text before them in accordance with the rules of punctuation.

- A colon is placed before the formula only in the cases stipulated by the rules of punctuation: a) there is a generalizing word in the text before the formula; b) this is required by the construction of the text preceding the formula.

- Delimiters between formulas that follow one another and are not separated by text can be a comma or a semicolon directly after the formula to its number.

- Parameters of the formula editor:

Размеры	
Обычный	11 пт
Крупный индекс	7 пт
Мелкий индекс	5 пт
Крупный символ	17 пт
Мелкий символ	11 пт

$$(1+B)^2 \sum_{p=1}^n X_{n_k}^{kp}$$

OK
 Отмена
 Применить
 По умолчанию

Стиль	Шрифт	Формат символов	
		Полужирный	Курсив
Текст	Times New Roman	☐	☐
Функция	Times New Roman	☐	☐
Переменная	Times New Roman	☐	☒
греческие	Symbol	☐	☒
ГРЕЧЕСКИЕ	Symbol	☐	☐
Символ	Symbol	☐	☐
Матрица-вектор	Times New Roman	☒	☐
Числа	Times New Roman	☐	☐

Язык:
 стиль «Текст» Любой
 другие стили Любой

OK
 Отмена

To check the correctness of writing the formulas, please provide the publication also in PDF format, because different versions of text editor software may be incompatible and change the content of the article.

5.6. REFERENCES (bibliographic description of the sources used in the preparation of the article, in the original language) and issued in accordance with the DSTU 8302:2015 standard.

- volume – 7-20 sources (excluding review articles);
- most of the sources should reflect the current state of scientific research and be no older than 10 years;
- doi, if available, should be given at the end of the reference

All bibliographic descriptions of sources are provided in the original language. When referring to the used literature, the name of the used edition and (in square brackets in

normal font) its number in the list should be indicated, for example: «...and are determined by the tariff scheme of the Price List 0-01 [2]».

- self-citation should not exceed 20% of the total number of references
- in the list, it is desirable to indicate modern English-language literature with a retrospective of no more than 5 years.
- after the English-language annotation, References is submitted - a transliterated list of references (in Latin letters), designed according to the ARA (American Psychological Association) standard.

The transliterated bibliography, in accordance with the requirements of the SCOPUS and Web of Science scientometric databases, is a complete analogue of the bibliography and is performed by transliterating the original language in Latin. At the same time, the order and number of sources in the bibliography should remain unchanged. Links to English-language sources are not transliterated. When compiling the transliterated list of literature, it is recommended to use the provisions of Resolution No. 55 of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated January 27, 2010 «On regulating the transliteration of the Ukrainian alphabet into Latin» which approves the official transliteration of the Ukrainian alphabet into Latin and establishes the current rules for transliterating surnames and names of citizens of Ukraine into Latin in foreign passports. Online transliterator (<http://translit.kh.ua/?passport>).