

ЗМІСТ РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Сулим А.О., Ломонос А.І. Способи керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з асинхронним приводом та ємнісними системами накопичення енергії.....	7
Буряковський С.Г., Овер'янова Л.В., Нещерет В.О., Іванов К.І. Використання накопичувачів енергії у гібридних енергетичних установках дизель-поїздів.....	30
Фомін О.В., Іщенко В.М., Обуховський В.В., Туровець Д.А. Стендові випробування гальмівних повітророзподільників залізничного рухомого складу при впливі граничних значень температур.....	43
Равлюк В.Г., Ловська А.О., Скуріхін Д.І., Рибін А.В., Равлюк М.Г. Дослідження впливу конструктивних параметрів гальмової системи вантажного вагона на безпеку експлуатації залізничного рухомого складу.....	56
Семко Ж.О. Оцінка відповідності у сфері залізничного транспорту. Модулі оцінки відповідності. Особливості складання технічної документації.....	75
Гладких І.В., Брусило Д.О. Перспективні напрямки розвитку інноваційного рейкового транспорту у світі.....	89
Сулим А.О., Павленко Ю.С., Войтенко О.І. Дослідження механічних пошкоджень кузовів вагонів метрополітену з вичерпаним строком служби.....	100
Фомін О.В., Козинка О.С., Зеленський О.В., Олениця О.О., Черкашин О.П. Гібридні покриття для захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу: дослідження ефективності та перспективи застосування.....	111
Фомін О.В., Козинка О.С., Климаш А.О., Обуховський В.В., Луценко О.А. Класифікація полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів.....	127
Вимоги до оформлення статей.....	144

CONTENTS

«RAILBOUND ROLLING STOCK»

A.O. Sulym, A.I. Lomonos Methods of managing energy processes on metro rolling stock with asynchronous drive and capacitive energy storage systems.....	26
S.G. Buriakovskiy, L.V. Overianova, V.O. Neshcheret, K.I. Ivanov Use of energy storage devices in the hybrid powertrain of diesel multiple units.....	40
O.V. Fomin, V.V. Ishchenko, V.V. Obukhovskiy, D.A. Turovets Bench tests of brake air distributors of railway rolling stock under the influence of limit temperature values.....	54
V.G. Ravlyuk, A.O. Lovska, D.I. Skurikhin, A.V. Rybin, M.G. Ravliuk Study of the influence of structural parameters of the freight wagon brake system on the safety of railway rolling stock operation.....	71
Z.O. Semko Conformity assessment in the field of railway transport. Conformity assessment modules. Aspects of executing technical documentation.....	87
I.V. Hladkykh, D.O. Brusylo Promising prospects for the development of innovative rail transport in the world.....	98
A.O. Sulym, Yu.S. Pavlenko, O.I. Voitenko Study of mechanical damage to metro car bodies with expired service lifetime.....	109
O.V. Fomin, O.S. Kozynka, O.V. Zelenskiy, O.O. Olenytsia, O.P. Cherkashin Hybrid coatings for mitigating vibrational wear in railway structures: performance evaluation and implementation prospects.....	124
O.V. Fomin, O.S. Kozynka, A.O. Klymash, V.V. Obukhovskiy, O.A. Lutsenko Classification of polymer coatings for load-bearing components of freight cars.....	142
Requirements for drawing-up of articles.....	150

А.О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Телефон: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

А.І. Ломонос

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600, Україна

Телефон: (066) 796-70-94, E-mail: lomonosai@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5001-1280>

СПОСОБИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНУ З АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ ТА ЄМНІСНИМИ СИСТЕМАМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

У статті розглянуто подальший розвиток новоствореного та глибокомодернізованого рухомого складу метрополітену за рахунок впровадження на ньому ємнісних систем накопичення енергії. Встановлено, що за умов впровадження на рухомому складі метрополітену бортових ємнісних накопичувачів енергії мало-вивченим питанням залишається синтез способів керування потоками енергії між контактною мережею, силовим тяговим і гальмівним обладнанням, ємнісними накопичувачами енергії.

Метою є розроблення способів та алгоритмів керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ємнісними системами накопичення енергії за можливості врахування роботи системи енергозабезпечення метрополітену як в штатному, так і в аварійному режимах.

Описано структуру блок-схеми системи керування енергетичними процесами, здатної відслідковувати виникнення аварійних режимів в системі тягового енергозабезпечення метрополітену. Розроблено три різні способи та алгоритми керування енергетичними процесами під час руху поїзда метрополітену в режимі тяги за штатної роботи системи енергозабезпечення. Запропоновано нову концепцію керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену, яка передбачає можливість живлення тягового обладнання поїзда від ємнісних систем накопичення енергії у випадку відсутності живлення в контактній мережі внаслідок наявності двох зон регулювання. Побудовано ідеалізовані осцилограми енергетичних процесів в контактній мережі і силових колах для розроблених способів керування залежно від режимів ведення поїзда та роботи системи енергозабезпечення на прикладі заданих характеристик рухомого складу та ємнісних накопичувачів енергії.

© Сулим А.О., Ломонос А.І., 2025

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Розроблено алгоритм керування енергетичними процесами під час руху поїзда метрополітену з ємнісними системами накопичення енергії в режимі тяги, вибігу, рекуперативного гальмування за штатної та аварійної роботи системи енергозабезпечення метрополітену. Визначено необхідність зосередження подальших зусиль на дослідження ефективності кожного із розроблених способів керування та алгоритмів з метою встановлення найбільш перспективного.

Ключові слова: енергетичні процеси, ємнісні системи накопичення енергії, метрополітен, поїзд, рухомий склад, система енергозабезпечення, система керування.

Вступ та постановка проблеми. Впровадження «зеленого» екологічно чистого рухомого складу метрополітену з поліпшеними техніко-економічними характеристиками є однією з пріоритетних задач підприємств комунального транспорту на найближчі роки. При цьому першочерговим напрямком поліпшення техніко-економічних характеристик рухомого складу метрополітену є впровадження на ньому енергоефективних систем і обладнання, ресурсоенергозберігаючих технологій [1]. Це дозволить заощадити чималі кошти, оскільки останнім часом частка витрат на енергоносії у вітчизняних метрополітенах помітно збільшилась порівняно з іншими витратами внаслідок підвищення вартості тарифів у декілька разів. Особливо актуальним необхідність заощадження енергоресурсів у всіх без виключення галузях в Україні постало після повномасштабного вторгнення військ російської федерації за умов знищення об'єктів енергетичної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень. Протягом останнього часу у вітчизняному метрополітені інноваційний рухомий склад поступово вводився в експлуатацію на заміну зношеного, що був побудований у 60-70 роках та відпрацював свій ресурс. Це, передусім, новостворений та глибокомодернізований п'ятивагонний рухомий склад виробництва ПАТ «КВБЗ», який складається з вагонів моделей 81-7036, 81-7037 (рис. 1) та 81-7080, 81-7081, 81-7081-01 (рис. 2).



Рис. 1. Поїзд, що складається з вагонів моделей 81-7036, 81-7037



Рис. 2. Поїзд, що складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01

Основними перевагами цього рухомого складу у порівнянні з існуючим виробництва 60-90 років минулого століття є впровадження енергоресурсозберігаючих технологій та інноваційних систем. Серед таких впроваджень слід окремо виділити асинхронний електропривод, статичні силові перетворювачі для живлення електродвигунів, гальмівну систему з можливістю рекуперативного гальмування, мікропроцесорну систему керування поїздом. Впровадження в експлуатацію новостворе-

ного та глибокомодернізованого рухомого складу дозволило в значній мірі скоротити споживання електроенергії з контактної мережі у вітчизняних метрополіте-нах [2].

Одним з перспективних напрямків подальшого розвитку цього новоствореного та глибокомодернізованого рухомого складу є впровадження на ньому ємнісних систем накопичення енергії (ЄСНЕ). Впровадження цих систем дозволить заощади-ти на рівні 8-40 % обсягів електроенергії, що споживається цим рухомим скла-дом [3]. Переваги застосування ЄСНЕ порівняно з іншими типами накопичувачів енергії на електрорухомому складі детально розглянуто в роботах [4, 5].

Ця стаття є продовженням попередніх досліджень [6–13] в напрямку створення інноваційного рухомого складу метрополітену з ЄСНЕ. За результатами аналізу цих досліджень встановлено, що останнім часом роботи за цим напрямком активно публікуються та є актуальними. При цьому одним з перспективних та важливих за-вдань подальших досліджень за цим напрямком є розробка ефективної системи ке-рування потоками енергії, яка циркулює між контактною мережею, силовим облад-нанням рухомого складу та ЄСНЕ.

В попередніх дослідженнях [14–25] увага розробці системи керування енергети-чними процесами на тяговому рухомому складі з асинхронним приводом та ЄСНЕ приділялась. В роботах [14–17] наведено можливі концепції керування енергетич-ними процесами на електрорухомому складі. В дослідженні [18] запропоновано удосконалену силову структуру двосекційного магістрального тепловоза шляхом використання накопичувачів енергії в системі тяги. В роботі [19] запропоновано структуру електровоза для кар'єрного залізничного транспорту на базі багатодвигунного асинхронного електропривода з накопичувачами енергії. В праці [20] запропоновано систему керування потоками енергії на приміському електропо-їзді з тяговим асинхронним електроприводом та накопичувачем енергії. В охорон-них документах [21, 22] запропоновано технічні рішення систем керування енерге-тичними процесам для електрорухомого складу з асинхронним приводом та ЄСНЕ. При цьому питання розробки енергоефективних алгоритмів та способів керування енергетичними процесами між тяговим електроприводом та системою тягового по-стачання в цих працях не розглядалось.

Аналіз робіт [12–17, 23–25] дозволив встановити, що концептуально керувати енергетичними процесами на електрорухомому складі з ЄСНЕ можливо як при роз-дільній роботі системи тягового постачання – контактної мережі (основне джерело живлення) та накопичувача енергії (додаткового джерела живлення), так і їх суміс-ній роботі. При цьому основними стратегіями керування під час руху в режимі тяги за роздільної роботи є такі: пріоритет першочергового використання накопиченої енергії в режимі пуску [12–14, 23], використання ЄСНЕ за досягнення певної швид-кості руху або у певному діапазоні швидкостей руху [12–14, 23]. Основними стра-тегіями керування під час руху в режимі тяги за умов сумісної роботи контактної мережі і ЄСНЕ є наступні: обмеження струму споживання з контактної мережі [14-16, 21], у тому числі для певного діапазону швидкості руху [14, 16]; двохпарамет-ричне керування, за якого визначаються значення швидкості рухомого складу та струму, за яких має розпочинатися сумісна робота контактної мережі і ЄСНЕ [17, 24].

У режимі рекуперативного гальмування на початковому етапі є пріоритет заря-джання ЄСНЕ з одночасною можливістю генерації надлишкової енергії до контак-тної мережі або її гасінні на блоці резисторів за відсутності споживачів цієї енергії в контактній мережі [13, 16, 17, 21, 23, 24].

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

На рис. 3 графічно проілюстровано зазначені стратегії керування енергетичними процесами під час руху в режимах тяги та рекуперативного гальмування на прикладі характеристик поїзда метрополітену, що складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01 виробництва ПАТ «КВБЗ».

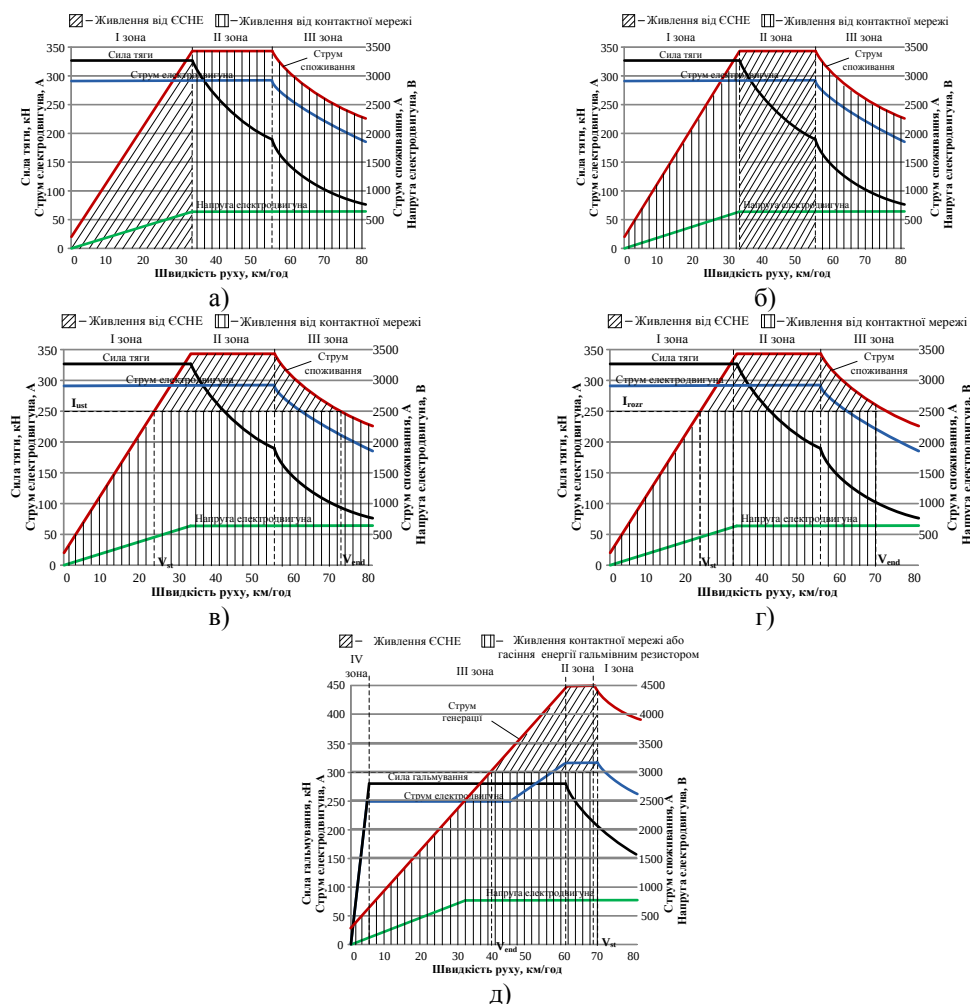


Рис. 3. Графіки поїзда метрополітену, що ілюструють стратегії керування енергетичними процесами:

- а – роздільна робота з пріоритетом використання накопиченої енергії під час пуску;
- б – роздільна робота з використання накопиченої енергії у певному діапазоні швидкості руху;
- в – сумісна робота з обмеженням струму споживання з контактної мережі;
- г – сумісна робота з обмеженням струму споживання з контактної мережі за умов двох параметричного керування за відомої кінцевої швидкості руху; д – сумісна робота в режимі рекуперативного гальмування

На рис. 3 наведено такі літерні позначення: I_{ust} , I_{rozr} – відповідно установлене та розраховане значення струму, за досягненням яких розпочинається споживання енергії з ЄСНЕ; V_{st} , V_{end} – відповідно початкова та кінцева швидкості руху, у діапазоні яких поїзд споживає енергію з ЄСНЕ.

Слід зазначити, що зазначені стратегії керування енергетичними процесами наведено саме за умов застосування ЄСНЕ незначної потужності та енергоємності, який не здатний самостійно забезпечити динамічні характеристики поїзда. Це пояснюється тим, що застосування потужних та енергоємних ЄСНЕ є недоцільним, як з економічної, так і технічної точки зору, оскільки використання таких ЄСНЕ матиме значний вплив на динамічні характеристики поїзда [26].

Основними перевагами застосування роздільного керування енергетичними процесами є простота реалізації системи керування, надійність, швидкодія. Недоліками такого керування є виникнення аварійних струмів в силових колах та необхідність їх стабілізації під час комутації джерел живлення. Також за умов застосування роздільного керування малоімовірним є зниження встановленої потужності об'єктів генерації, розподілення та передавання енергії; мінімізація витрат та пікового споживання в контактній мережі. І, навпаки, сумісне живлення поїзда від контактної мережі та ЄСНЕ передбачає побудову складнішої системи керування, однак такі системи дозволяють реалізувати пошук максимально ефективного режиму роботи ЄСНЕ шляхом вирішення задачі оптимізації, розраховувати зону роботи ЄСНЕ залежно від заданої сили тяги та кінцевої швидкості руху, завантаженості, поточної кількості накопиченої енергії тощо.

Слід зазначити, що загальним недоліком розглянутих стратегій є те, що кожна з них дозволяє керувати енергетичними процесами тільки за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення метрополітену. При цьому жодна із розглянутих стратегій не передбачає автоматизованого відстеження виникнення аварійного режиму та гарантовану можливість забезпечення ходу в режимі тяги поїзда метрополітену до найближчої станції за рахунок накопиченої енергії ЄСНЕ під час режиму рекуперативного гальмування.

Слід відмітити, що перші кроки в цьому напрямку вже зроблені. Так, в роботі [27] сформульовано основні концептуальні вимоги до розроблення відповідних систем керування. Визначено, що система керування має функціонально забезпечувати процес обміну енергією між ЄСНЕ, силовим обладнанням електроприводу, гальмівним обладнанням та контактною мережею як в штатних, так і аварійних режимах роботи системи енергозабезпечення метрополітену. В охоронному документі [22] запропоновано технічне рішення системи керування енергетичними процесами для електрорухомого складу з ЄСНЕ, яке передбачає можливість керування як за штатного, так і аварійного режиму роботи системи тягового енергозабезпечення. Це технічне рішення передбачає постійний контроль рівня напруги контактної мережі та використання двох зон регулювання відповідно за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення та аварійного. Проте, в наведених роботах [22, 27] питання розроблення алгоритмів та способів керування енергетичними процесами не розглядалось. Тому, в цій роботі пропонується зосередитись та детальніше розглянути саме це питання.

Мета статті – розроблення алгоритмів та способів керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ за умов штатної та аварійної роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

В процесі досягнення поставленої мети пропонується вирішити такі задачі:

– описання структурної блок-схеми системи керування енергетичними процесами, здатної відслідковувати виникнення аварійних режимів в системі тягового енергозабезпечення метрополітену;

- розроблення способів керування енергетичними процесами за штатних та аварійних режимів роботи системи енергозабезпечення рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та ЄСНЕ;
- розроблення алгоритмів роботи для кожного із запропонованих способів керування енергетичними процесами;
- описання функціонування запропонованих способів за допомогою ідеалізованих осцилограм.

Матеріал та результати досліджень. Раніше в роботах [22, 28] розроблено систему керування енергетичними процесами для рухомого складу метрополітену з асинхронним електроприводом та ЄСНЕ, здатної технічно реалізувати керування енергетичними процесами як за штатного, так і аварійного режимів роботи системи тягового енергозабезпечення. Блок-схему розробленої системи керування енергетичними процесами зображено на рис. 4.

Технічна реалізація можливості відстеження аварійного режиму роботи системи тягового енергозабезпечення та керування енергетичними процесами в цьому режимі стала можливою за рахунок введення до цієї системи керування у порівнянні з існуючими керованого комутатора, додаткових логічних пристроїв та виокремлення двох зон регулювання. В цій роботі саме цю систему керування (рис. 4) запропоновано використати під час розроблення алгоритмів роботи та способів керування енергетичними процесами.

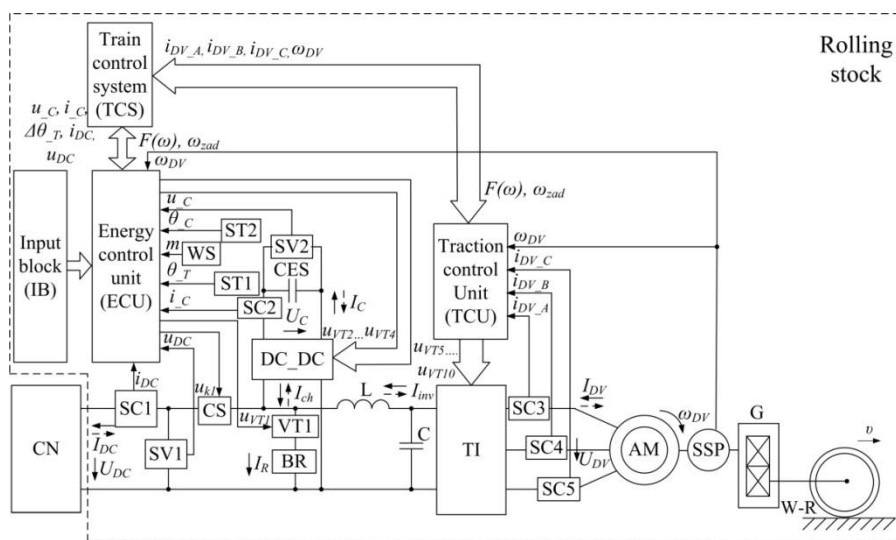


Рис. 4. Блок-схема системи керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ

На рис. 4 наведено такі літерні позначення: IB – блок введення даних; CN – контактна мережа; TCS – система керування поїздом; ECU – система керування процесами обміну енергією; SC1...SC5 – датчики контролю струму; SV1...SV2 – датчики контролю напруги; WS – датчик ваги; ST1, ST2 – датчики вимірювання температури; CS – керований комутатор; CES – ємнісна система накопичення енергії; DC_DC – силовий перетворювач; VT1 – силовий транзистор;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

BR – блок резисторів; L, C – індуктивність, ємність; TCU – блок контролю тяги (гальмування); ТІ – тяговий інвертор; АМ – асинхронний двигун; SSP – датчик контролю швидкості руху; I_{DC}, U_{DC} – струм та напруга CN; I_R – струм у колі BR; I_{ch} – струм на вході силового перетворювача DC_DC; I_C, U_C – струм та напруга у колі CES; I_{inv} – струм на вході ТІ; $I_{DV}, U_{DV}, \omega_{DV}$ – струм, напруга, швидкість АМ, відповідно; P_w – потужність на ободі коліс; v – швидкість рухомого складу; i_{DC}, u_{DC} – фактичні значення струму та напруги у колі постійного струму; $i_{DV_A}, i_{DV_B}, i_{DV_C}, \omega_{DV}$ – фактичні значення струму фаз А, В, С та швидкості двигуна, відповідно; i_C, u_C – фактичні значення струму та напруги у колі ЄСНЕ; θ_C – фактичне значення температури ЄСНЕ; θ_T – значення температури навколишнього середовища; m – маса рухомого складу; $F(\omega)$ – характеристика сили тяги (гальмування); ω_{zad} – задана кінцева швидкість складу; u_{kl} – керуючий вплив на CS; $u_{VT1} \dots u_{VT10}$ – керуючі впливи на силові ключі.

Через блок ІВ задають такі данні: $U_{C_{max}}$ – максимальне значення напруги на ЄСНЕ; $I_{C_{max}}$ – максимальне значення струму у колі ЄСНЕ; $\Delta\theta_{max}$ – максимальне значення температури нагріву ЄСНЕ; $U_{C_{min1}}, U_{C_{min2}}$ – мінімальне значення напруги на ЄСНЕ першого та другого рівня відповідно; $U_{C_{set}}, U_{R_{set}}$ – задані значення напруг для кіл ЄСНЕ та гальмівного резистора відповідно; U_{DC_C}, U_{DC_R} – граничні значення напруг в колі постійного струму для переходу в режим накопичення або електричного гальмування; $U_{DC_{min}}$ – мінімальне значення напруги контактної мережі; $U_{DC_{nom}}$ – номінальна напруга у колі постійного струму.

Силові схеми перетворювача DC_DC та тягового інвертора ТІ зображено на рис. 5, де VT2...VT10 – силові транзисторні ключі; L_c – індуктивність; VD1 – діод.

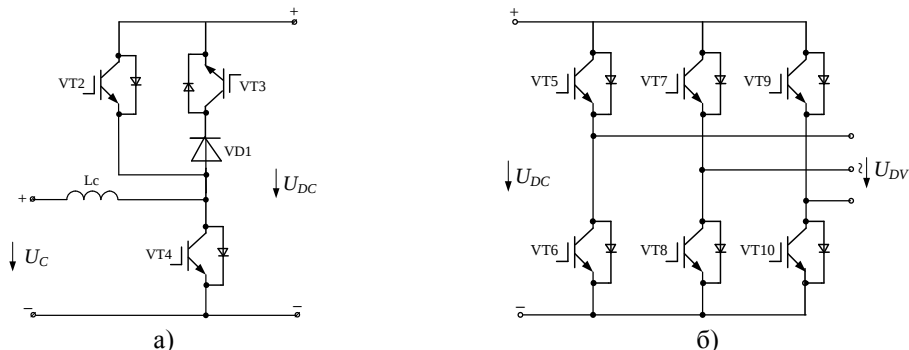


Рис. 5. Електричні схеми силових перетворювачів:

а – DC_DC; б – ТІ

З використанням системи керування (рис. 4) розроблено такі способи керування енергетичними процесами за умов штатної або аварійної роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

Штатна робота системи енергозабезпечення. Режим тяги.

Перший спосіб. Пріоритет першочергового використання накопиченої енергії від ЄСНЕ під час руху в режимі тяги та можливість відстеження аварійного режиму в системі тягового енергозабезпечення метрополітену за будь-якого режиму ведення рухомого складу. Цей спосіб керування виключає одночасне живлення електродви-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

гунів від ЄСНЕ та контактної мережі. При цьому пуск рухомого складу зазвичай відбувається за рахунок накопиченої енергії рекуперативного гальмування від ЄСНЕ (І зона регулювання), а подальший рух поїзда після виснаження ЄСНЕ (ІІ та ІІІ зони регулювання) – за рахунок енергії контактної мережі (рис. 1, а).

Цей спосіб керування опирається на переважне використання накопиченої енергії у І зоні, проте можливі випадки використання накопиченої енергії як у ІІ зоні, так і живлення від контактної мережі у І зоні, що буде залежати від обраної енергоємності ЄСНЕ, профілю колії дослідної ділянки, завантаженості пасажирями та іншими додатковими факторами впливу. Перехід на живлення енергією тягового обладнання рухомого складу від контактної мережі здійснюється за умови виснаження ЄСНЕ до мінімально встановленого рівня, який контролюється за допомогою датчиків.

За цього способу керування задають значення швидкості ω_{zad} , формують команду на розмикання CS, живлять електродвигун АМ від ЄСНЕ шляхом формування відповідних керуючих імпульсів на керовані ключі VT3, VT4. Керований ключ VT4 відповідає за формування широтно-імпульсної модуляції шляхом релейного регулювання, а VT3 – за блокування передачі енергії та непередбачуваного (випадкового) виснаження ЄСНЕ. Живлення електродвигуна від ЄСНЕ триває до досягнення певних граничних значень за рівнем напруги U_{c_min1} , що сигналізує про виснаження ЄСНЕ. За умови досягнення цих значень керований комутатор CS замикається, формуються відповідні імпульси на керовані ключі VT3, VT4 і живлення АМ здійснюється від CN. При цьому унеможливають живлення ЄСНЕ від контактної мережі шляхом формування відповідних сигналів на ключі VT3, VT 4. Система ECU здійснює керування енергетичними процесами для наведеного способу за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення та руху в режимі тяги згідно алгоритму, який наведено на рис. 6.

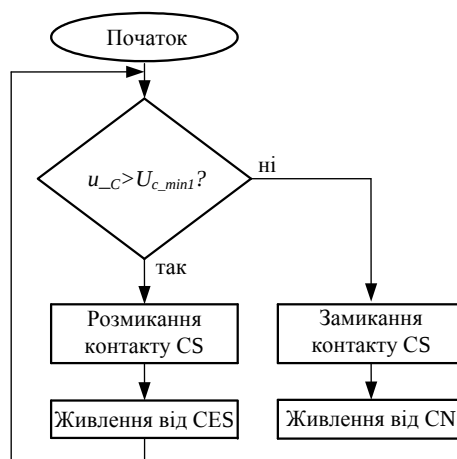


Рис. 6. Алгоритм роздільного способу керування енергетичними процесами з пріоритетом живлення від ЄСНЕ

Ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ЄСНЕ, а також на струмоприймачі поїзда, залежно від швидкості руху за такого способу керування наведено на рис. 7. Слід зазначити, що наведені осцилограми побудовані з урахуванням ха-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

рактик поїзда (рис. 3) та в них не враховано перехідні процеси під час зміни джерела живлення, тобто комутація здійснюється миттєво без амплітудного збільшення струму.

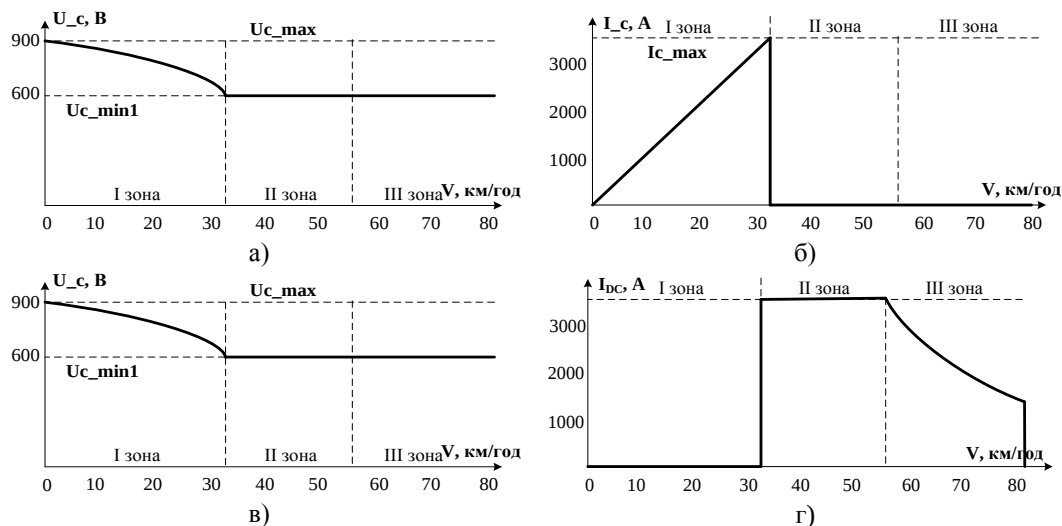


Рис. 7. Ідеалізовані осцилограми за першого способу керування енергетичними процесами:

напруги (а) та струму (б) в колі ЄСНЕ; напруги (в) та струму (г) в колі постійного струму

Переваги способу: проста реалізація способу керування; мінімізація споживання електроенергії з контактної мережі; максимальне використання накопиченої енергії рекуперативного гальмування рухомого складу; прогнозована стабільність протікання енергетичних процесів; досягнення значного техніко-економічного ефекту. Недоліки способу: зниження ресурсу ЄСНЕ; відсутнє обмеження амплітудного споживання струму з контактної мережі внаслідок чого неможливе зменшення встановленої потужності силового обладнання системи енергозабезпечення; необхідність стабілізації струму під час зміни джерела живлення; виключена можливість сумісної роботи двох джерел живлення; необхідність проведення окремих досліджень для вибору потужності та енергоємності ЄСНЕ.

Режим тяги. Другий спосіб. Сумісне живлення від контактної мережі та ЄСНЕ за умови досягнення встановленого значення струму споживання або швидкості руху в режимі тяги та можливість відстеження аварійного режиму в системі тягового енергозабезпечення метрополітену за будь-якого режиму ведення рухомого складу. За цього способу керування можливо живити електродвигун від ЄСНЕ, як у I зоні, так і у II та III зонах. Цей спосіб дозволяє обмежити струм споживання з контактної мережі та зменшити встановлену потужність силового тягового обладнання системи енергозабезпечення метрополітену. За цього способу керування струм з контактної мережі споживається стабільно та практично має незмінне значення (за виключення початкового пускового режиму у I зоні) протягом всього швидкісного режиму, а живлення від ЄСНЕ здійснюється за досягненням заданих значень швидкості руху або струму споживання для покриття її пікових амплітудних значень.

За цього способу керування задають значення швидкості ω_{zad} , живлять електродвигун АМ від контактної мережі шляхом формування відповідних керуючих імпульсів системою керування вищого рівня ТСS на ТCU, на початковому етапі руху керовані ключі VT3, VT4 відкриті. Живлення електродвигуна АМ від контактної мережі триває до досягнення певного встановленого значення струму I_{ust} або швидкості V_{st} . За умов досягнення встановленого значення розпочинається сумісне живлення електродвигуна від контактної мережі та ЄСНЕ. Керований ключ VT4 формує широтно-імпульсні модуляції шляхом релейного регулювання, а VT3 – за необхідності блокує передачу енергії у випадку виснаження ЄСНЕ. Сумісне живлення електродвигуна від контактної мережі та ЄСНЕ триває до досягнення певних значень струму I_{ust} або швидкості V_{end} , а також внаслідок виснаження ЄСНЕ. За умови досягнення цих значень або виснаження ЄСНЕ формуються відповідні імпульси на керовані ключі VT3, VT4 і подальше живлення електродвигуна здійснюється від контактної мережі. При цьому керовані ключі VT3, VT 4 знаходяться у відкритому положенні, що унеможливує подальше живлення ЄСНЕ від контактної мережі під час руху поїзда в режимі тяги. Система ECU здійснює керування енергетичними процесами для наведеного способу за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення та руху в режимі тяги згідно алгоритмів, які наведено на рис. 8, 9.

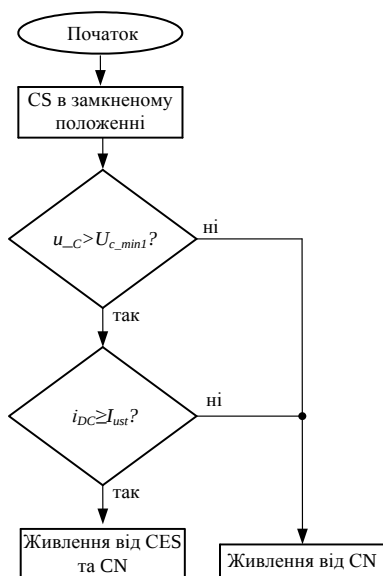


Рис. 8. Алгоритм способу керування енергетичними процесами з обмеженням струму споживання з CN

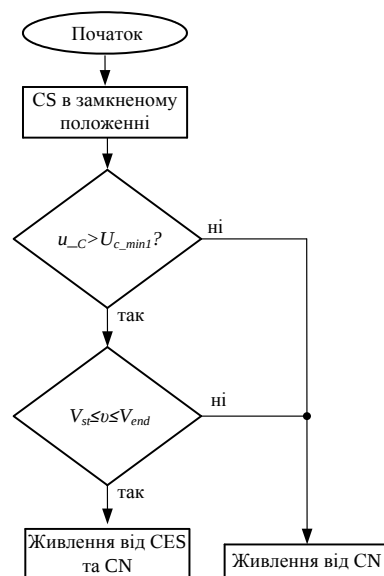


Рис. 9. Алгоритм способу керування енергетичними процесами за досягнення заданих значень швидкостей руху

Ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ЄСНЕ, а також в колі постійного струму, залежно від швидкості руху за такого способу керування наведено на рис. 10.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

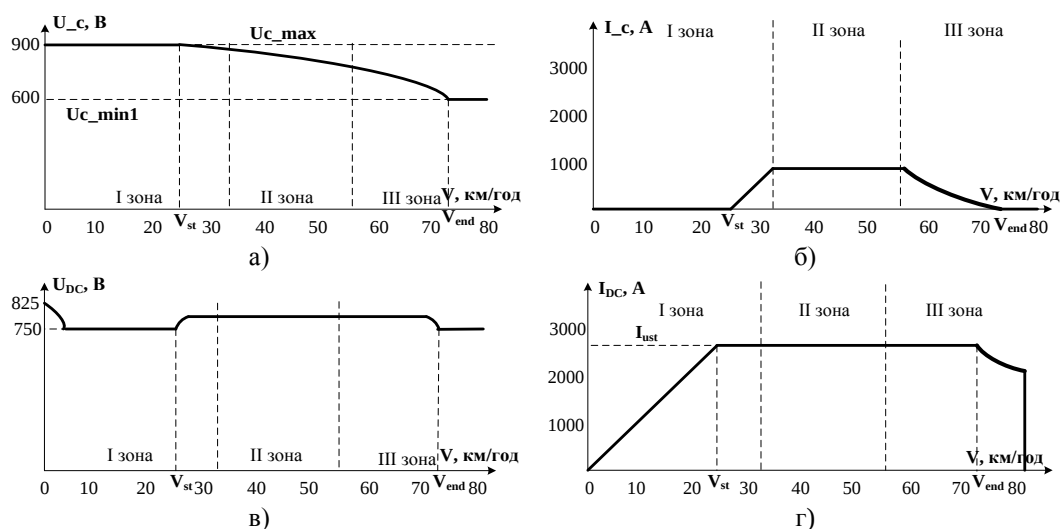


Рис. 10. Ідеалізовані осцилограми за другого способу керування енергетичними процесами:

напруги (а) та струму (б) в колі ЄСНЕ; напруги (в) та струму (г) в колі постійного струму

Переваги способу: проста реалізація способу керування; можливість зменшення встановленої потужності силового обладнання системи енергозабезпечення рухомого складу метрополітену; зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням енергії до контактної мережі; підвищення рівня та стабільності напруги в контактній мережі, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні. Недоліки способу: низька імовірність застосування живлення від ЄСНЕ внаслідок залежності використання накопиченої енергії рекуперативного гальмування від інтенсивності розгону; залежність ефективності керування енергетичних процесів від заданої сили тяги (інтенсивності розгону), профілю колії та обраних граничних значень швидкості або струму, а також обраної енергоємності ЄСНЕ, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень.

Режим тяги. Третій спосіб. Сумісне живлення від контактної мережі та ЄСНЕ за умови досягнення розрахованого значення струму споживання та швидкості руху та можливість відстеження аварійного режиму в системі тягового енергозабезпечення метрополітену за будь-якого режиму ведення рухомого складу. Цей спосіб керування за обмеження споживання електроенергії з контактної мережі відрізняється від попереднього тим, що система керування розраховує струм обмеження на підставі даних заданої сили тяги, завантаженості поїзда та поточного значення кількості накопиченої енергії. Головною відмінністю є те, що сумісне живлення електродвигуна відбувається за досягнення розрахованого значення струму I_{rozr} , а не встановлених значень швидкостей V_{st}, V_{end} або струму I_{ust} . Таким чином, цей спосіб гарантує використання накопиченої енергії в ЄСНЕ за аналізом вхідних даних. Алгоритм керування енергетичними процесами за умов використання цього способу наведено на рис. 11.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

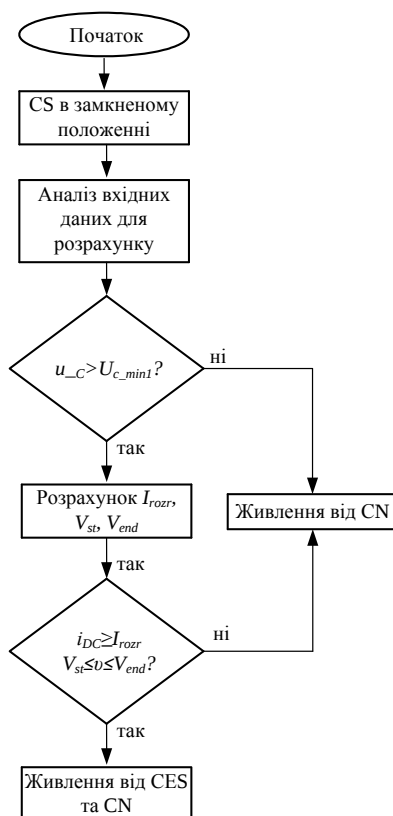


Рис. 11. Алгоритм способу керування енергетичними процесами за досягнення розрахованих значень струму та швидкостей руху

При цьому ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ЄСНЕ, а також в колі постійного струму, подібні до попередніх, що зображені на рис. 10.

Переваги способу: можливість зменшення встановленої потужності силового обладнання системи енергозабезпечення поїзда; мінімізація витрат на транспортування енергії до контактної мережі; підвищення пропускної здатності на перегоні, гарантоване використання накопиченої енергії. Недоліки способу: складність побудови системи керування для реалізації способу.

Таким чином, за штатної роботи системи енергозабезпечення метрополітену в тяговому режимі руху поїзда запропоновано три різні способи керування енергетичними процесами з зазначенням переваг і недоліків кожного та наведено спрощені алгоритми їх роботи залежно від фактичних значень вимірних показників в колах постійного струму та ЄСНЕ.

Режим вибігу. За штатної роботи системи енергозабезпечення та під час руху поїзда в режимі вибігу струмоприймач з'єднаний з контактною мережею CN і рухомий склад метрополітену отримує від неї електроенергію. У цьому випадку ECU подає сигнали на керовані ключі, за яких керований комутатор CS контактної мережі має знаходитись в положенні замкнення, керовані ключі силового перетворювача DC_DC мають бути розімкнені, керовані ключі силового перетворювача ТІ – розімкнені. Таким чином, електродвигун АМ від'єднаний від конденсаторного накопичувача CES та контактної мережі CN.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Рекуперативне гальмування. За штатної роботи системи енергозабезпечення метрополітену та під час руху поїзда в режимі рекуперативного гальмування електродвигун АМ працює в режимі генератора і за командами від ECU може живити коло з CES, споживачів контактної мережі CN або перетворювати електричну енергію у теплову за допомогою BR.

Під час постановки контролера машиніста в режим рекуперативного гальмування ключі силового перетворювача DC_DC працюють в замкнуто-розімкнутому стані (режим широтно-імпульсної модуляції), керований ключ VT1 розімкнений, керований ключ VT2 розпочинає працювати в режимі широтно-імпульсної модуляції.

На початковому етапі заряджання CES, коли швидкість руху поїзда значна, амплітудне значення струму заряду має максимальне значення та мінімальний час дії. По мірі заряду CES блок керування направляє керуючі імпульси на VT2, за якими амплітудне значення струму зменшується, однак тривалість дії імпульсів заряду збільшується (рис. 12).

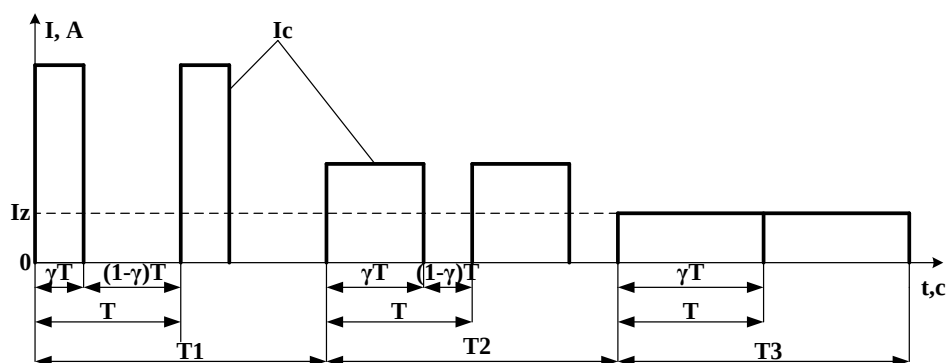


Рис. 12. Діаграма регулювання струму на ЄСНЕ:

I_c – амплітудне значення струму в колі ЄСНЕ; I_z – середнє значення зарядного струму в колі ЄСНЕ; γT – тривалість відкритого стану ключа VT2; $(1-\gamma)T$ – тривалість закритого стану ключа VT2; T – цикл роботи ключа VT2; T_1 , T_2 , T_3 – цикл роботи ключа VT2, за якого тривалість відкритого та закритого станів стану ключа VT2 не змінюється

Таким чином, здійснюють заряджання CES шляхом підтримання постійного струму заряду у колі ЄСНЕ ($I_z = \text{const}$).

За умови зарядження конденсаторного накопичувача CES до повної енергоємності та за закритого стану ключа VT2 блок керування ECU здійснює перевірку наявності інших споживачів електроенергії в CN шляхом порівняння заданої напруги, введеної через блок ІВ та виміряної напруги за допомогою датчика напруги SV1. Якщо значення напруги CN менше заданого, що відповідає значенню напруги холостого ходу тягової підстанції (контактної мережі), блок керування ECU подає сигнал на розмикання керованого ключа VT2 силового перетворювача DC_DC. При цьому керовані ключі силового перетворювача ТІ залишаються працювати в замкнуто-розімкнутому стані (режим широтно-імпульсної модуляції) за командами від системи керування вищого рівня TCS.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За відсутності споживачів електроенергії в контактній мережі та зарядження конденсаторного накопичувача CES до повної енергоємності блок керування ECU подає сигнал на замикання керованого ключа VT1 в колі гальмівного резистора, при цьому ключі силового перетворювача ТІ залишаються працювати в замкнуто-розімкнутому стані (режим широтно-імпульсної модуляції) за командами від системи керування вищого рівня TCS. Блок керування ECU контролює процес перетворення надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування в теплову енергію шляхом замикання-розмикання керованого ключа VT1. Надлишкова електроенергія, що генерується електродвигуном АМ, перетворюється у теплову енергію на BR. Функціонально блок керування ECU дозволяє частково генерувати електроенергію рекуперативного гальмування до CN, а іншу частину перетворювати у теплову енергію на BR.

Алгоритм керування енергетичними процесами за режиму рекуперативного гальмування у спрощеному вигляді наведено на рис. 13. Ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ЕСНЕ, а також в колі постійного струму, залежно від швидкості руху за режиму рекуперативного гальмування наведено на рис. 14.

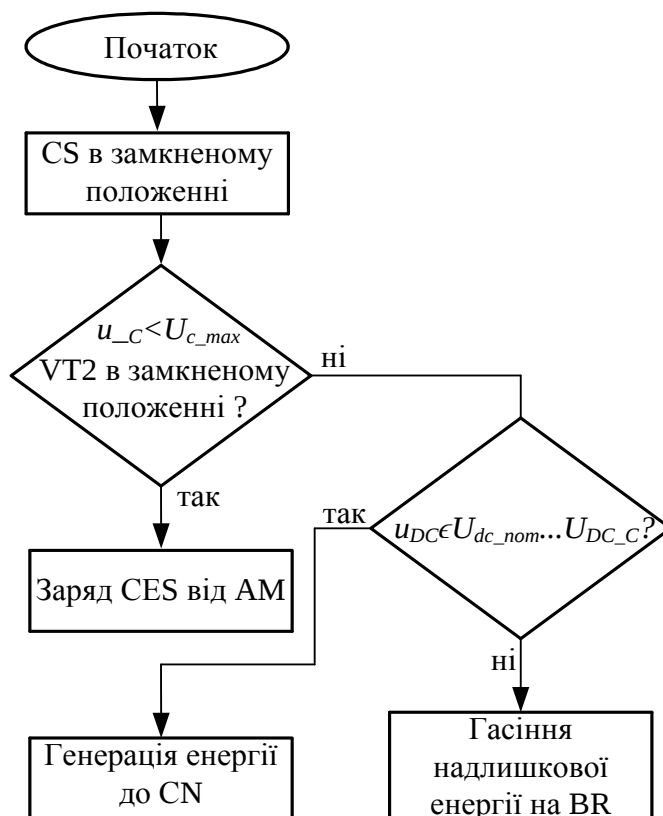
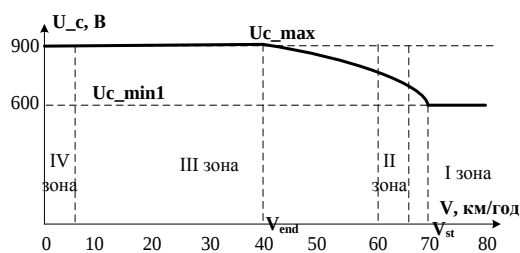
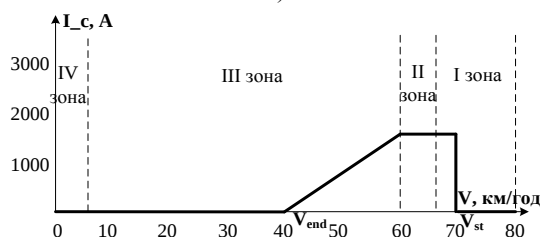


Рис. 13. Алгоритм способу керування енергетичними процесами під час режиму рекуперативного гальмування

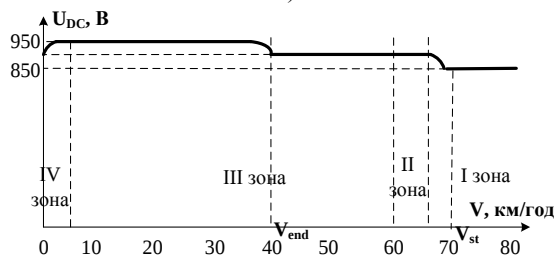
РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



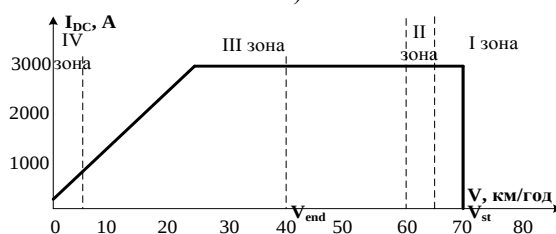
а)



б)



в)



г)

Рис. 14. Ідеалізовані осцилограми під час руху поїзда метрополітену в режимі рекуперативного гальмування:

напруги (а) та струму (б) в колі ЄСНЄ; напруги (в) та струму (г) в колі постійного струму

Аварійна робота системи енергозабезпечення.

Якщо відбулось зниження напруги в контактній мережі CN нижче заданого значення $U_{DC.min}$ або у разі аварійного відключення живлення датчики струму SC1 та напруги SV1 направляють відповідні сигнали на входи до ECU, який у свою чергу, формує команду на розмикання керованого комутатора CS. В результаті чого накопичена енергія в CES не має технічної можливості живити споживачів в контактній

мережі. Далі за командою машиніста щодо руху в режимі тяги ECU направляє сигнал на роботу керованих ключів в режимі широтно-імпульсної модуляції, після чого живлення електродвигуна АМ здійснюється від CES.

Силовий перетворювач DC_DC та силовий перетворювач ІМ забезпечують живлення електродвигуна АМ до досягнення мінімально допустимої величини напруги U_{c_min2} на конденсаторному накопичувачі CES (до величини «мертвого об'єму»). При цьому датчик напруги SV1 постійно контролює напругу контактної мережі CN. У разі підвищення напруги в CN до значення, що перевищує $U_{DC.min}$, ECU подає команду на замикання контакту CS і подальше живлення електродвигуна АМ здійснюється від контактної мережі CN з одночасним зарядженням конденсаторного накопичувача CES до мінімального значення робочої напруги U_{c_min1} .

Під час експлуатації поїзда ECU здійснює постійний моніторинг температури накопичувача CES та навколишнього середовища за допомогою датчиків температури ST1 та ST2. У разі, якщо різниця температур накопичувача θ_c та навколишнього середовища θ_T перевищує максимальне значення $\Delta\theta_{max}$, завдане в блоці ІВ, блок керування ECU подає команду на розмикання керованих ключів силового перетворювача DC_DC, внаслідок чого коло з CES відключається від системи енергозабезпечення незалежно від режиму руху поїзда.

На рис. 15 зображено характеристики поїзда метрополітену для заданих умов виникнення аварійної роботи системи енергозабезпечення. Задані умови виникнення прийнято такі: аварійна ситуація відбулась на перегоні довжиною 960 м під час руху поїзда в режимі тяги за швидкості руху 60 км/год, ЄСНЕ розряджена до мінімального значення робочого значення U_{c_min1} , живлення поїзда від ЄСНЕ відбувалось за швидкості руху 50 км/год до повної зупинки на станції.

Ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ЄСНЕ, а також в колі постійного струму, залежно від пройденого шляху для зазначених умов виникнення аварійного режиму живлення поїзда метрополітену, наведено на рис. 16. Слід зазначити, що ідеалізовані осцилограми за штатного режиму живлення поїзда під час руху в режимі тяги побудовано для першого способу з пріоритетом живлення від ЄСНЕ.

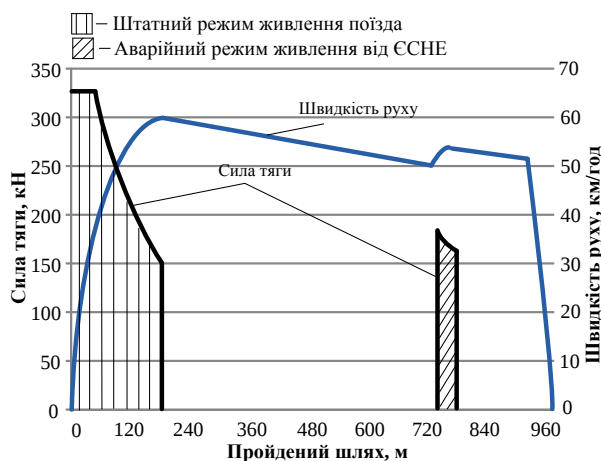


Рис. 15. Характеристики поїзда метрополітену за умов виникнення аварійної ситуації в системі енергозабезпечення

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

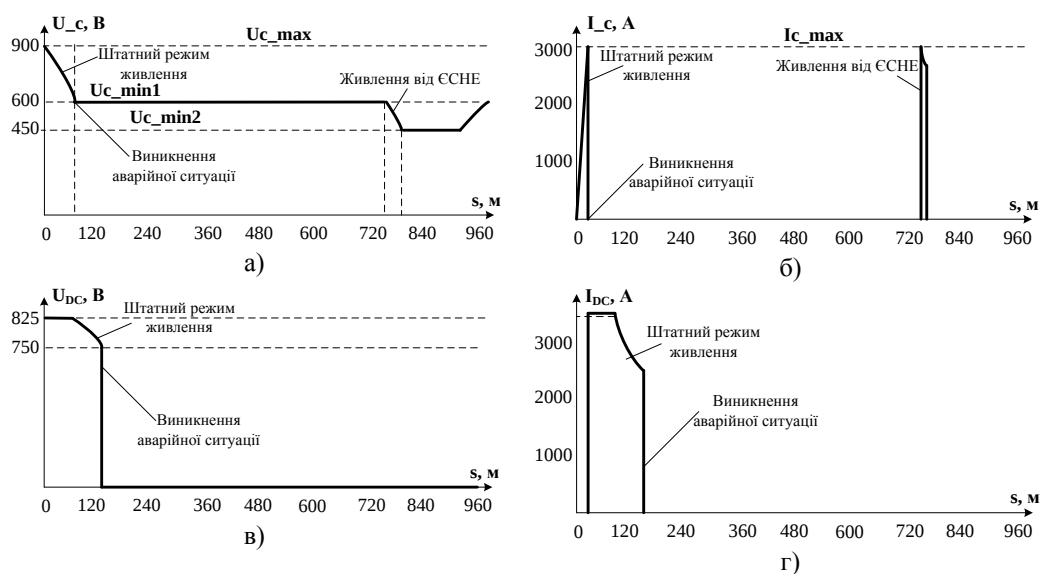


Рис. 16. Ідеалізовані осцилограми під час руху поїзда на перегоні за виникнення аварійної ситуації в системі енергозабезпечення:
 напруги (а) та струму (б) в колі ЄСНЕ; напруги (в) та струму (г) в колі постійного струму

Отже, для кожного із запропонованих способів передбачено двохзонне регулювання за рівнем напруги в ЄСНЕ (рис. 17). Діапазон зміни напруг за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення $[U_{c_min1}...U_{c_max}]$; за аварійного режиму роботи – $[U_{c_min2}...U_{c_max}]$.

Загальний алгоритм керування енергетичними процесами у спрощеному вигляді для розроблених способів під час руху поїзда метрополітену з ЄСНЕ в режимах тяги, вибігу, рекуперативного гальмування за штатної або аварійної роботи системи енергозабезпечення наведено на рис. 18.



Рис. 17. Характеристики ЄСНЕ за двохзонного регулювання за рівнем напруги

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

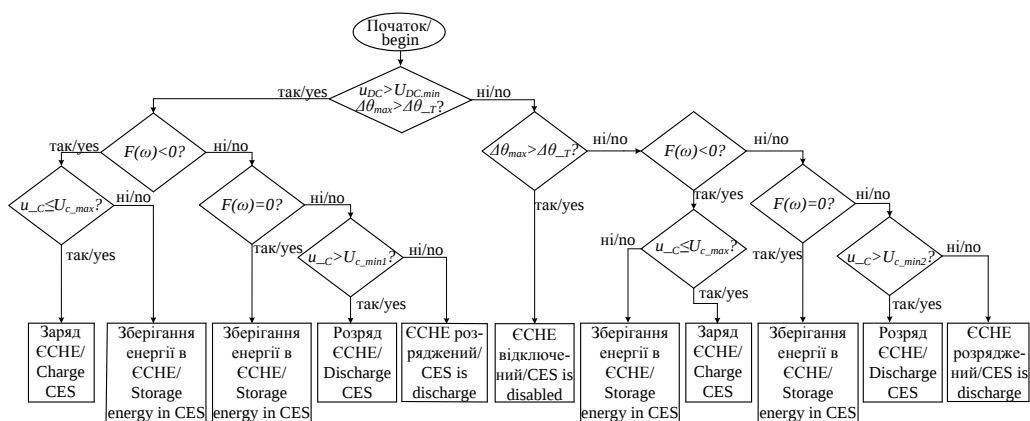


Рис. 18. Алгоритм керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ

Таким чином, розроблено способи та запропоновано нову концепцію керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ, які передбачають можливість живлення поїзда метрополітену, як за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення, так і аварійного.

Висновки.

1. Описано блок-схему системи керування енергетичними процесами на рухомому складі з асинхронним приводом та ЄСНЕ, яка дозволяє реалізувати різні способи керування цими процесами за штатної роботи системи енергозабезпечення, а також здатна відслідковувати виникнення аварійних режимів та керувати процесами обміну енергією між контактною мережею, ЄСНЕ та силовим обладнанням поїзда в цих режимах.

2. Розроблено три різні способи та алгоритми керування енергетичними процесами під час руху поїзда метрополітену в режимі тяги за штатної роботи системи енергозабезпечення та сформульовано переваги і недоліки кожного із запропонованих способів, що у подальшому за результатами проведення окремих досліджень дозволить визначити найбільш перспективний.

3. Вперше запропоновано нову концепцію керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ, яка передбачає можливість використання накопиченої енергії в ЄСНЕ як за штатної роботи системи енергозабезпечення, так і аварійної, внаслідок виокремлення двох зон регулювання, що в цілому дозволить підвищити безпеку руху та ефективність пасажирських перевезень в метрополітені.

4. Дістали подальшого розвитку дослідження з впровадження на рухомому складі метрополітену конденсаторних накопичувачів в частині розроблення способів та алгоритмів керування енергетичними процесами між контактною мережею, силовим електричним обладнанням рухомого складу та ЄСНЕ.

5. Розроблено алгоритм керування енергетичними процесами під час руху поїзда метрополітену з ЄСНЕ в режимі тяги, вибігу, рекуперативного гальмування за штатної та аварійної роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

6. Побудовано ідеалізовані осцилограми на прикладі характеристик поїзда метрополітену, що складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01, що дозволило визначити закономірності енергетичних процесів в колах постійного стру-

му та ЄСНЕ залежно від застосованого способу керування та режиму ведення поїзда.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці імітаційної моделі для дослідження енергетичних процесів на рухомому складі з асинхронним приводом та ЄСНЕ як за штатних, так і аварійних режимів роботи системи енергозабезпечення метрополітену, з метою оцінки ефективності кожного із розроблених способів та їх алгоритмів керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Богомазова В.М., Кваша Т.К. Аналіз перспективних світових наукових та технологічних напрямів досліджень за ціллю сталого розвитку № 9 щодо транспортної сфери з використанням інструментів платформ «Web of Scince» та «Derwent Innovation»: науково-аналітична записка. К.: УкрІНТЕІ, 2020. 33 с.
2. Сулим А.О., Мужичук С.О., Хозя П.О., Павленко Ю.С., Єжов Ю.В. Сучасний стан та перспективи розвитку парку рухомого складу метрополітену. Залізничний транспорт України. 2019. № 3. С. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-14-20>
3. Khodaparastan M., Mohamed Ahmad A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20, Issue 8. P. 2831–2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/ TITS.2018.2886809>
4. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену. Восточно-Европейський журнал передових технологій. 2014. Вип. 8 (72) /том 6/. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>
5. A. L. Allegre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, and S. El-Fassi. Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway. IEEE Trans. Ind. Electron. 2010. Vol. 57. No. 12, P. 4001–4012.
6. Mensah-Darkwa K., Zequine C., Kahol P. K., Gupta R. K. Supercapacitor energy storage device using biowastes: a sustainable approach to Green energy. Sustainability. 2019. Vol. 11 (2). Iss. 414. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020414>
7. Ciccirelli F., Iannuzzi D., Tricoli P. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2012. № 24. P. 36–49.
8. Chaviha N., Campillo J., Bohlin M., Dahlquist E. Review of application of energy storage devices in railway transportation. Energy Procedia. 2017. № 105. P. 4561–4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>
9. Iannuzzi D., Tricoli P. Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors. IEEE Trans. Power Electron. 2012. № 27 (3-4). P. 2129–2140.
10. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Stamatina V. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Iss. 3 (102). P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
11. Mezitis M., Panchenko V., Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A., Sansyzbajeva Z. Selection of mathematical model of on-board capacity energy storage as element of hybrid traction unit of motor car rolling stock. Journal of Measurements in Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 2. P. 71–86. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2021.21818>
12. Афанасов А.М., Арпуль С.В., Демчук Р.Н. Пусковые режимы автономного электропоезда с бортовым накопителем энергии. Электромагнитна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2016. № 11. С. 18–23.
13. Sulym A., Lomonos A., Bialobrzheskyi O., Safronov O., Khozia P. Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. № 3. P. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>
14. Sulym A., Khozia P. Analysis of management strategies for energy exchange processes in electric rolling stock with on board capacitive energy storages. Conference proceedings 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology. 13-17 September, № 9569992. 2021. Kharkiv, Ukraine. P. 109-114. DOI: <http://doi.org/10.1109/KhPIWeek.53812.2021.9569992>
15. Рябов Е.С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети. Вісник Національного тех-

нічного університету «Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 6 (1115). С. 132–137.

16. Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. IET Electr. Syst. Transp. 2014. Vol. 4. Iss. 1. P. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2013.0031>

17. Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. Computational problems of electrical engineering. Vol. 4. No 1. P. 44–52.

18. Riabov I., Goolak S., Neduzha L. Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. Vehicles. 2024. No. 6 (2). P. 611–631. DOI: <http://doi.org/10.3390/vehicles6020028>

19. Рябов Є.С., Кондратьєва Л.Ю., Овер'янова А.В., Єріцян Б.Х., Гулак С.О. Обґрунтування структури тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту. Наука та прогрес транспорту. 2022. № 2 (98). С. 26–44. DOI: <http://doi.org/10.15802/stp2022/267984>

20. Северин В.П., Оверьянова Л.В., Омеляненко О.В. Управление потоком мощности в тяговом приводе электропоезда при питании от контактной сети и инерционных накопителей энергии. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 58 (1167). С. 29–32.

21. Деклараційний патент на корисну модель 115031 U, Україна, H02P 21/10, B60L 7/10. Пристрій керування тяговим електротехнічним комплексом електровоза з мінімізацією втрат у контактній мережі / Бялобржеський О.В., Слободенюк Ю.О., Смірнова Т.О.; № у 2016 11535; заявка 14.11.2016; опубл. 27.03.2017. Бюл. 6. 7 с.

22. Деклараційний патент на корисну модель 155392U, Україна, B60L9/10, H02J15/00. Пристрій для керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з конденсаторним накопичувачем / Сулим А.О., Хозя П.О. (Україна); власник(и): ДП «УкрНДІВ». № у 2023 04635; заявка 02.10.2023; опубл. 21.02.2024. Бюл. 8. 11 с.

23. Волков В.А. Оптимизация энергопотребления троллейбуса с тяговым частотно-регулируемым асинхронным двигателем и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2019. № 1 (45). С. 8–24. DOI: <http://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.8-24>

24. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with on board energy storage. International journal of renewable energy research. Vol. 9. No. 2. P. 848–858.

25. Деклараційний патент на корисну модель 103507 U, Україна, H02P 21/00, B60L 7/10. Спосіб керування тяговим електротехнічним накопичувально-компенсуючим пристроєм в схемі перетворювача частоти з ланкою постійного струму / Бялобржеський О.В., Миколаєнко Ю.О., Слободенюк Д.В., Боркунов В.С.; № у 2015 03858; заявка 23.04.2015; опубл. 25.12.2015. Бюл. 24. 8 с.

26. Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О. Застосування бортових ємнісних накопичувачів незначної потужності та енергоємності на рухомому складі метрополітену. Вісник Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля. 2020. № 4(260). С. 87–92. DOI: <http://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92>

27. Сулим А.О., Мельник О.О. Формування концептуальних вимог до системи керування енергообмінними процесами на поїзді метрополітену з ємнісними накопичувачами енергії. Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ». Рейковий рухомий склад. Кременчук: ДП «УкрНДІВ». 2022. Вип. 24. С. 7–20. DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-24-7-20>

28. Sulym A.O., Khozia P.O., Fomin O.V., Bahrov O.M. Management of Energy Exchange Process on Metro Rolling Stock with On-Board Capacitive Energy Storage. Problemele energeticii regionale. 2025. № 1 (65). P. 49–62. DOI: <http://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.1-65.04>

A.O. Sulym

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

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

Tel.: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

A.I. Lomonos

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University,

20 Universytetska St., Kremenchuk, 39600, Ukraine

Tel.: (066) 796-70-94, E-mail: lomonosai@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5001-1280>

METHODS OF MANAGING ENERGY PROCESSES ON METRO ROLLING STOCK WITH ASYNCHRONOUS DRIVE AND CAPACITIVE ENERGY STORAGE SYSTEMS

The article deals with the further development of the newly constructed and deeply modernised metro railway vehicles by introducing capacitive energy storage systems. It has been demonstrated that in the context of the introduction of on-board capacitive energy storage on metro rolling stock, the synthesis of methods for managing energy flows between the contact network, power traction and braking equipment, and capacitive energy storage remains an insufficiently studied issue.

The paper is aimed at developing methods and algorithms for managing energy processes on metro railway vehicles with capacitive energy storage systems, with the possibility of taking into account the operation of the metro power supply system in both normal and emergency modes.

The flowchart configuration of the energy process control system capable of monitoring the occurrence of emergency modes in the metro traction power supply system is described. Three different methods and algorithms for managing energy processes during the movement of a metro train in the traction mode under the normal operation of the power supply system have been developed. A new concept of managing energy processes in the metro rolling stock is proposed, which provides for the possibility of powering the train traction equipment from capacitive energy storage systems in the event of a power failure in the contact network due to the use of two control zones. Idealised oscillograms of energy processes in the contact network and power circuits are constructed for the developed control methods depending on the modes of train operation and the operation of the energy supply system on the example of the specified characteristics of rolling stock and capacitive energy storage systems.

An algorithm for managing energy processes during the movement of a metro train with capacitive energy storage systems in the mode of traction, run-up, regenerative braking during normal and emergency operation of the metro power supply system is proposed. The need to focus further efforts on studying the efficiency of each of the developed control methods and algorithms in order to establish the most promising one is outlined.

Keywords: energy processes, capacitive energy storage systems, metro, train, railway vehicles, energy supply system, control system.

REFERENCES

1. Bohomazova, V.M., & Kvasha, T.K. (2020). *Analiz perspektyvnykh svitovykh naukovykh ta tekhnologichnykh napriamiv doslidzhen za tsilliu staloho rozvytku № 9 shchodo transportnoi sfery z vykorystanniam instrumentiv platform [Analysis of promising world scientific and technological research areas for sustainable development goal No. 9 in the transport sector using the tools of the Web of Science and Derwent Innovation platforms: a scientific and analytical note]*. Kyiv: UkrINTEI [in Ukrainian]
2. Sulym, A.O., Muzhychuk, S.O., Khozia, P.O., Pavlenko, Y.S., & Yezhov, Y.V. (2019). *Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku parku rukhomoho skladu metropolitenu [Current state and prospects for the*

development of the metro rolling stock fleet]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 3, 14-20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-14-20> [in Ukrainian]

3. Khodaparastan, M., Mohamed Ahmad A., & Brandauer, W. (2019). Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 8. Vol. 20, P. 2831–2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>

4. Sablin, O.I. (2014). Doslidzhennia efektyvnosti protsesu rekuperatsii elektroenerhii v umovakh metropolitenu [Investigation of the efficiency of the process of electrical energy recovery in the conditions of the metro]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovikh tekhnologii - East European Journal of Advanced Technologies*, 8 (72), 9-13 (Vol. 6). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483> [in Ukrainian]

5. Allegre, A.L., Bouscayrol, A., Delarue, P., Barrade, P., Chattot, E., & El-Fassi, S. (2010). Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 12, 4001–4012 Vol. 57.

6. Mensah-Darkwa, K., Zequine, C., Kahol, P.K., & Gupta, R.K. (2019). Supercapacitor energy storage device using biowastes: a sustainable approach to Green energy. *Sustainability*, 414, 1–22 Vol. 11 (2). DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020414>

7. Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., & Tricoli, P. (2012). Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 36–49.

8. Chaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M., & Dahlquist, E. (2017). Review of application of energy storage devices in railway transportation. *Energy Procedia*, 105, 4561–4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>

9. Iannuzzi D., & Tricoli P. (2012). Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors. *IEEE Trans. Power Electron*, 27 (3-4), 2129–2140.

10. Sulym, A., Fomin, O., Khozia, P., Palant, O., & Stamatina, V. (2019). Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (102), 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>

11. Mezitis, M., Panchenko, V., Yatsko, S., Vashchenko, Ya., Sidorenko, A., & Sansyzbajeva, Z. (2021). Selection of mathematical model of on-board capacity energy storage as element of hybrid traction unit of motor car rolling stock. *Journal of Measurements in Engineering*, 2, Vol. 9, 71–86. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2021.21818>

12. Afanasov, A.M., Arpul, S.V., & Demchuk, R.N. (2016). Puskovye rezhimy avtonomnogo elektropoezda s bortovym nakopitelem energii [Starting modes of an autonomous electric train with an onboard energy storage]. *Elektromahnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznychnomu transporti - Electromagnetic compatibility and safety in railway transport*, 11, 18–23

13. Sulym, A., Lomonos, A., Bialobrzheskyi, O., Safronov, O. & Khozia, P. (2020). Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 59–66. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>

14. Sulym, A., & Khozia P. (2021). Analysis of management strategies for energy exchange processes in electric rolling stock with on board capacitive energy storages. *Conference proceedings 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology. 13-17 September, No. 9569992*. 109-114. Kharkiv, Ukraine. DOI: <http://doi.org/10.1109/KhPIWeek.53812.2021.9569992>

15. Ryabov, Ye.S. (2015). Opredelenie parametrov nakopitelya energii dlya elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnim tyagovym privodom v rezhime ogranicheniya toka tyagovoi seti [Determination of energy storage device parameters for electric rolling stock with asynchronous traction drive in the mode of traction network current limitation]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» - Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*, 6 (1115), 132–137 Kharkiv: NTU «KhPI»

16. Ratniyomchai, T., Hillmanssen, S., & Tricoli, P. (2014). Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *IET Electr. Syst. Transp.*, 1, 9–20 Vol. 4. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2013.0031>

17. Yatsko, S., Vashchenko, Ya., & Sidorenko, A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational problems of electrical engineering*, 1, 44–52. Vol. 4.

18. Riabov, I., Goolak, S., & Neduzha, L. (2024). Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*, 6 (2), 611–631. DOI: <http://doi.org/10.3390/vehicles6020028>

19. Riabov, Ye.S., Kondratieva, L.Iu., Overianova, A.V., Yeritsian, B.Kh., & Hulak, S.O. (2022). Obhruntuvannia struktury tiahovoho elektropryvoda elektrovoza dlia zaliznychnoho kariernoho transportu [Substantiation of the structure of the traction electric drive of an electric locomotive for quarry rail haulage].

Nauka ta prohres transport - Science and progress of transport, 2 (98), 26–44
DOI: <http://doi.org/10.15802/stp2022/267984> [in Ukrainian]

20. Severin, V.P., Overyanova, L.V., & Omelyanenko, O.V. (2015). Upravlenie potokom moshchnosti v tyagovom privode elektropoezda pri pitanii ot kontaktnoi seti i inertsiionnikh nakopitelei energii [Control of power flow in the traction drive of an electric train when powered by the contact network and inertial energy storage]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» - Bulletin of the National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute*. Kharkiv: NTU KHPI, 58 (1167), 29–32

21. Bialobrzheskyi, O.V., Slobodeniuk, Yu.O., & Smirnova, T.O. (2016). Deklaratsiinyi patent na korysnu model 115031 U Ukraina, H02P 21/10, B60L 7/10. Prystroi keruvannia tiahovym elektrotekhnichnym kompleksom elektrovoza z minimizatsiieiu vtrat u kontaktnii merezhi [Declaration patent for utility model 115031 U. Ukraine, H02P 21/10, B60L 7/10. Device for controlling the traction electrical complex of an electric locomotive with minimisation of losses in the contact network][in Ukrainian]

22. Sulym, A.O., & Khozia, P.O. (2023). Deklaratsiinyi patent na korysnu model 155392 U, Ukraina, B60L 9/10, H02J 15/00. Prystroi dlia keruvannia enerhetychnymy protsesamy na elektrorukhomomu skladi z kondensatornym nakopychuvachem [Declaration patent for utility model 155392 U, Ukraine, B60L 9/10, H02J 15/00. Device for controlling energy processes on electric rolling stock with a capacitor storage] [in Ukrainian]

23. Volkov, V.A. (2019). Optimizatsiya energopotrebleniya trolleibusa s tyagovym chastotno-reguliruemim asin-khronnim dvigatelem i superkondensatornim nakopitelem generiruemoi energii [Optimisation of power consumption of trolleybus with traction frequency-controlled asynchronous motor and supercapacitor accumulator of generated energy]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy - Electromechanical and energy-saving systems*, 1 (45), 8–24. DOI: <http://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.8-24> [in Ukrainian]

24. Yatsko, S., Sidorenko, A., Vashchenko, Ya., Lyubarskyi, B., & Yeritsyan, B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with on board energy storage. *International journal of renewable energy research*, 2, 848–858, Vol. 9.

25. Bialobrzheskyi, O.V., Mykolaienko, Yu.O., Slobodeniuk, D.V., & Borkunov, V.S. (2015). Deklaratsiinyi patent na korysnu model 103507 U, Ukraina, H02P 21/00, B60L 7/10. Sposib keruvannia tiahovym elektrotekhnichnym nakopychuvalno-kompensuiuchym prystroiem v skhemi peretvoriuvacha chastoty z lankoiu postiinoho strumu [Declaration patent for utility model 103507 U, Ukraine, H02P 21/00, B60L 7/10. Method for controlling a traction electrical storage and compensation device in a frequency converter circuit with a DC link]. № u 2015 03858 [in Ukrainian]

26. Sulym, A.O., Khozia, P.O., & Melnyk, O.O. (2020). Zastosuvannia bortovykh yemnisnykh nakopychuvachiv neznachnoi potuzhnosti ta enerhoiemnosti na rukhomomu skladi metropolitenu [Use of on-board capacitive storage devices of low power and energy intensity in metro rolling stock]. *Visnyk Shkhdnoukr. natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia - Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 4(260), 87–92. DOI: <http://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92> [in Ukrainian]

27. Sulym, A.O., & Melnyk, O.O. (2022). Formuvannia kontseptualnykh vymoh do systemy keruvannia enerhoobminnymy protsesamy na poizdi metropolitenu z yemnisnymy nakopychuvachamy enerhii [Formation of conceptual requirements for the control system of energy exchange processes on a metro train with capacitive energy storage]. *Zbirnyk naukovykh prats SE «UkrNDIV» «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific papers of SE «UkrNDIV» Railbound rolling stock*, 24, 7 –20. Kremenchuk: SE «UkrNDIV». DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-24-7-20> [in Ukrainian]

28. Sulym, A.O., Khozia, P.O., Fomin, O.V., Bahrov, O.M. (2025). Management of Energy Exchange Process on Metro Rolling Stock with On-Board Capacitive Energy Storage. *Problemele energeticii regionale*, 1 (65), 49–62. DOI: <http://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.1-65.04>.

С.Г. Буряковський

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Телефон: (057)7076133, E-mail: serhii.buriakovskiy@khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2469-7431>

Л.В. Овер'янова

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Телефон: (057)7076530, E-mail: liliia.overianova@khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

В.О. Нещерет

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Телефон: (057) 7076530, E-mail: volodymyr.neshcheret@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4080-6868>

К.І. Іванов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Телефон: (057)7076530, E-mail: Kostiantyn.Ivanov@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3000-8191>

ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ У ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДІВ

Метою статті є аналіз способів використання накопичувачів енергії у гібридних енергетичних установках дизель-поїздів. Розглянуто та проведено аналіз гібридних енергетичних установок дизель-поїздів та рейкових автобусів, обладнаних відповідними тяговими системами. Визначено, що на наявному рухомому складі накопичувачі енергії переважно використовуються для акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні. Енергія, яка акумульована при гальмуванні, витрачається на живлення тягової системи та допоміжних споживачів у режимах, де робота дизельного двигуна характеризується високою витратою пального. Такий спосіб використання накопичувача енергії забезпечує зменшення споживання пального орієнтовно на 10%. Іншим варіантом є використання накопичувача у plug-in режимі, що передбачає його заряджання від дизель-генератора або стаціонарного джерела електроенергії. В останньому випадку забезпечується найбільший вплив на зменшення споживання пального та шкідливих викидів, а також на вартість паливно-енергетичних ресурсів. Результати теоретичних досліджень для вітчизняного дизель-поїзда ДЕЛ-02, обладнаного гіпотетичними plug-in гібридними енергетичними установками, показують зниження споживання пального на 22%...28% у порівнянні з серійним дизель-поїздом

© Буряковський С.Г., Овер'янова Л.В., Нещерет В.О., Іванов К.І., 2025

при заряджанні від дизель-генератора. При заряджанні від стаціонарного джерела енергії зменшення споживання пального оцінюється у 50%, а загальне зменшення вартості паливно-енергетичних ресурсів – на 36,5...40,4%. Це обґрунтовує пріоритетність використання plug-in накопичувачів. При застосуванні plug-in накопичувача можлива оптимізація параметрів гібридної енергетичної установки для конкретних умов експлуатації, а також можливість спільної роботи накопичувача і дизель-генератора. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні пріоритетного напрямку для вивчення і дослідження накопичувачів енергії для їх застосування у гібридних енергетичних установках для вітчизняних дизель-поїздів, а саме використанні plug-in накопичувачів та стратегій енергетичного менеджменту для plug-in гібридних енергетичних установок. Практична значимість полягає у аналізі наявних стратегій енергетичного менеджменту у гібридних енергетичних установках. Це забезпечить їх впровадження у вітчизняні розробки, що покращить ефективність гібридних тягових систем.

***Ключові слова:** дизель-поїзд, накопичувач енергії, тягова система, plug-in гібридна енергетична установка, паливно-енергетичні ресурси, енергетичний менеджмент.*

Вступ та постановка проблеми. Українська залізниця відіграє важливу роль у забезпеченні пасажирських перевезень. Водночас відзначається, що якість транспортного обслуговування має бути покращена. Це – комплексна задача, яка потребує змін у багатьох напрямках. Важливим є оновлення рухомого складу, метою якого є покращення комфорту пасажирських перевезень, а також підвищення енергоефективності транспорту та його декарбонізації [1].

Приміські пасажирські перевезення забезпечують мобільність населення, що проживає у приміських районах. Такі перевезення є пріоритетними для пасажирів у випадку, якщо скорочується тривалість поїздки, а рівень комфорту є достатнім [2]. Іншим аспектом, який визначає привабливість залізничного транспорту, є вартість перевезень. Зважаючи, що значна частка експлуатаційних витрат – це витрати на паливно-енергетичні ресурси (ПЕР), використання технологій, які сприяють зменшенню споживання ПЕР, є актуальним. До такої технології належать гібридні енергетичні установки, які передбачають використання бортового накопичувача енергії для живлення тягової системи та допоміжних споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні гібридними енергетичними установками обладнано декілька видів дизель-електричного моторвагонного рухомого складу. Бортові накопичувачі енергії в них застосовуються для акумулювання енергії при гальмуванні та живленні цією енергією тягової системи та допоміжних систем при подальшому русі. Завдяки цьому зменшується споживання пального та скорочення шкідливих викидів. У [3, 4] наведено результати експлуатації рейкового автобуса KiHa E200, застосування накопичувача на якому забезпечило економію 10% палива. Випробування поїзда Régiolis із гібридною тяговою системою підтвердили зниження споживання енергії до 20% [5, 6]. При цьому досягнуто 90% рекуперації, доступної для акумулювання енергії. При випробуваннях дизель-поїзда Lixtech досягнуто 10% зниження споживання пального [7]. Випробування гібридного поїзду HC85 показали підвищення ефективності на 35% у порівнянні з серійним поїздом KiHa 85 [8]. Такий високий результат було забезпечено застосуванням енергоефективного електрообладнання, зокрема, тягових електричних машин з постійними магнітами та бортового накопичувача енергії.

Теоретичні роботи щодо застосування гібридних енергетичних установок на дизель-поїздах досліджують різні аспекти їх використання. У [9] досліджено гібридизацію силової енергетичної установки 3х-вагонного дизель-поїзду. Розрахунки показали, що можна досягти зниження споживання палива на 24,1% у приміському русі та 18,9% на регіональному маршруті. У [10] проведено оптимізацію керування дизель-поїздом з гібридною силовою енергетичною установкою та визначено, що при оптимальному керуванні досягається скорочення споживання палива й викидів більш ніж на 34%. У [11] показано, що застосування акумулювання енергії до накопичувача дозволили підвищити енергетичну ефективність дизель-поїзда на 18%. У [12] проведено порівняння гібридної та plug-in тягових систем для дизель-поїздів.

Дослідження вітчизняних науковців присвячені використанню накопичувачів у тяговій системі дизель-поїзду ДЕЛ-02. У [13] авторами запропоновано застосування іоністорів у тяговій системі цього дизель-поїзду, внаслідок чого очікувана економія пального становитиме 25%. У [14] досліджено різні варіанти використання накопичувача енергії, зокрема, показано, як plug-in режим із заряджанням від стороннього джерела електроенергії дозволяє зменшити витрати на ПЕР на 36,5%...40,4 % у порівнянні із серійним дизель-поїздом.

Таким чином, наведені вище результати, в першу чергу, експлуатаційних випробувань, підтверджують доцільність гібридизації енергетичних установок дизель-поїздів для зменшення витрат пального та скорочення шкідливих викидів.

Зниження споживання ПЕР при застосуванні на рухомому складі бортового накопичувача енергії забезпечується раціональним вибором параметрів гібридної енергетичної установки та стратегіями керування енергетичними потоками в ній [10, 15-16].

Мета статті. Визначення способів використання накопичувачів енергії у гібридних енергетичних установках дизель-поїздів.

Матеріали та результати досліджень. Аналіз джерел показує, що можна виділити два способи застосування накопичувачів:

- 1) для акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні і її використанні для живлення тягової системи та допоміжних споживачів;
- 2) plug-in режим, який передбачає заряджання накопичувача від дизель-генератора (і при електродинамічному гальмуванні).

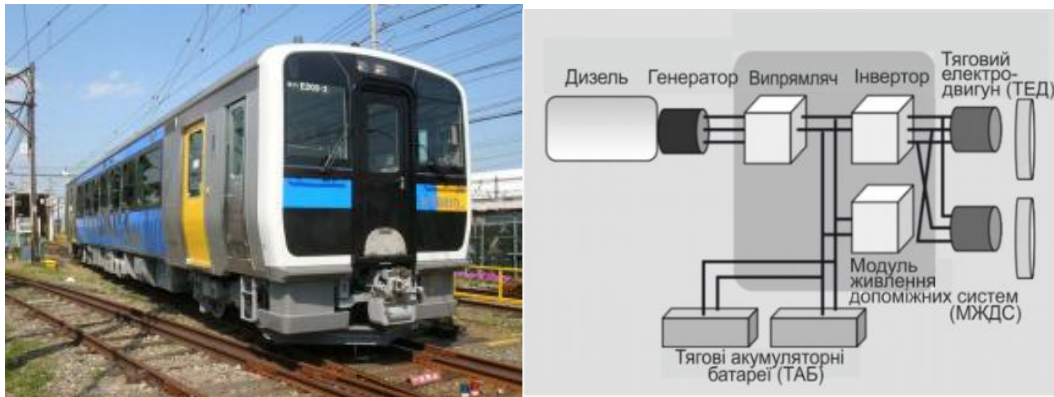
При першому способі використання ємність накопичувача енергії є незначною, у другому способі накопичувач енергії повинен мати ємність, яка забезпечить живлення споживачів протягом певного часу.

Для обох випадків характерним є те, що живлення від накопичувача здійснюється у режимах, де використання дизельного двигуна є неефективним. При цьому у таких режимах двигун, як правило, зупиняється.

Використання накопичувача для акумулювання розповсюджене на рухомому складі японських залізниць, де використання накопичувачів енергії почалося з 2000 років.

Розглянемо цей спосіб використання на прикладі дизельного самохідного вагону (рейкового автобуса) KiHa E200 (рис. 1). На рис. 2 показано схему енергетичних потоків у гібридній тяговій системі KiHa E200 [3, 17]. У табл.1 наведено технічні параметри гібридної системи KiHa E200.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



а)

б)

Рис. 1. Рейковий автобус КіНа Е200 [3, 17]:

а – загальний вигляд; б – схема гібридної тягової системи

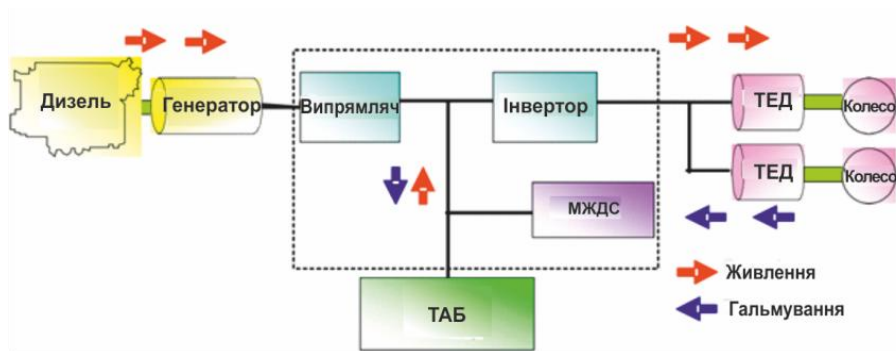


Рис. 2. Схема енергетичних потоків у гібридній тяговій системі КіНа Е200

Таблиця 1. – Технічні параметри гібридної системи КіНа Е200

Напруга основного ланцюга (Напруга основної батареї)	DC680В
Швидкість максимальна	100 км/год
Прискорення	$0,639\text{м/с}^2$ (2,3км/год/с)
Потужність двигуна	331 кВт/2100 об/хв
Тяговий двигун	3-фазний асинхронний двигун потужністю 95 кВт
Тяговий генератор	Асинхронний, 270 кВт
Допоміжне джерело живлення	3 фази АС 440 В 50 кВА
Основний акумулятор	Літій-іонний акумулятор 15,2 кВт·год

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Ця гібридна система складається з дизельного двигуна, електричного генератора, тягового перетворювача, до складу якого входять випрямляч, інвертор та модуль живлення допоміжних систем, тягової акумуляторної батареї та асинхронних двигунів. Ця система є «послідовною гібридною системою», яка перетворює механічну потужність дизельного двигуна в електричну енергію генератора. Потім система поєднує електричну енергію генератора та акумуляторної батареї та керує двигунами за допомогою інвертора. Акумуляторна батарея підключена до проміжної ланки постійної напруги, а її заряд та розряд контролюється відповідно до вхідного та вихідного балансу між перетворювачем та інвертором. При живленні тягові двигуни приводяться в дію інвертором, використовуючи електроенергію від двигуна та від акумуляторної батареї. Під час електродинамічного гальмування електроенергія акумулюється в акумуляторній батареї та використовується для наступного живлення або для допоміжного живлення (сервісне джерело живлення). Крім того, дизельний двигун автоматично контролюється перетворювачем, враховуючи режим роботи рейкового автобуса та стан зарядки акумуляторної батареї. На зупинці акумуляторна батарея живить допоміжні системи та працює як джерело живлення службового обладнання, і двигун не потребує роботи.

В гібридній системі найважливішим є керування дизельним двигуном, тяговим перетворювачем, тяговим двигуном, а також зарядом і розрядом акумуляторної батареї. Тому в KiNa E200 використовується схема керування «Energy management control». Ця система контролює електричну потужність двигуна, щоб підтримувати постійний рівень енергії, яка змінюється залежно від швидкості руху. Контроль управління енергією класифікує режим керування відповідно до швидкості поїзда та ступеня заряду акумуляторної батареї (SOC) та контролює витрату енергії за режимом роботи (показано на рис. 3). Завдяки контролю енергоспоживання забезпечується необхідна продуктивність тяги шляхом контролю потужності акумуляторної батареї та потужності двигуна відповідно до умов роботи.

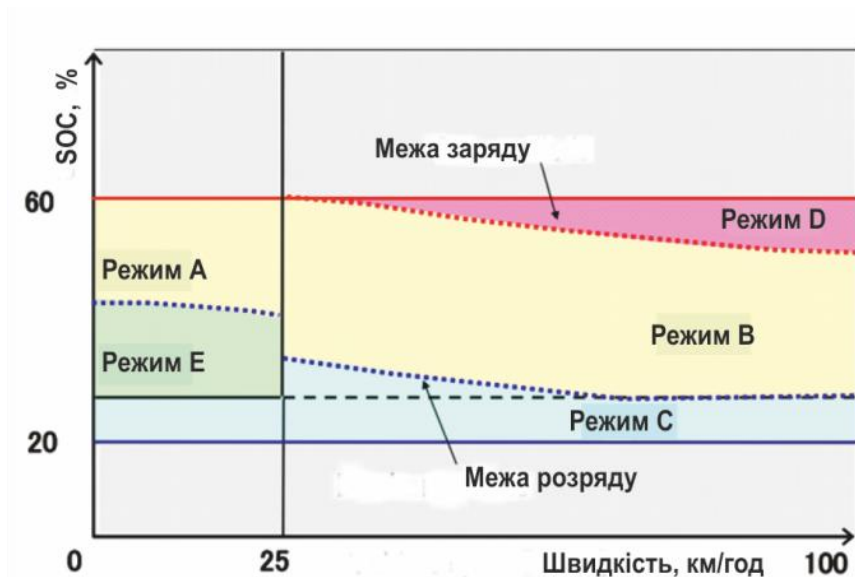


Рис. 3. Режим управління енергоменеджментом [4]

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Режим керування енергоспоживанням змінюється залежно від стану живлення та гальмування, швидкості руху та SOC акумуляторної батареї, як показано на рис. 4.

У режимі «Стационарний» (рис. 4, а) дизельний двигун не працює з метою захисту від шуму на станції та покращення витрати палива. Живлення допоміжного обладнання здійснюється від акумуляторної батареї (режим А на рис. 3). У випадку, якщо під час стоянки SOC зменшується, запускається дизельний двигун і відбувається заряджання акумуляторної батареї (рис. 4, б) (режим «Стационарний (заряджання)», режим Е на рис. 3).

У режимі «Живлення (швидкість нижче 25 км/год)» (рис. 4, в), при якому рух поїзда здійснюється зі швидкістю менше 25 км/год, живлення здійснюється тільки від акумулятора (режим А на рис. 3).

У режимі «Живлення (швидкість понад 25 км/год)» (рис. 4, г), який здійснюється при швидкості руху понад 25 км/год, живлення здійснюється від акумуляторної батареї та дизельного двигуна (режим В на рис. 3).

У режимі «Гальмування» (рис. 4, д) генерація електроенергії двигуном припиняється, а рекуперативна електроенергія зберігається в акумуляторній батареї (всі режими).

У режимі «Підтримка постійної швидкості» (рис. 4, е) генерація електроенергії двигуном припиняється, а рекуперативна енергія зберігається в акумуляторній батареї (режими В, С на рис. 3). Коли SOC досягає верхньої межі заряду, рекуперативна електроенергія поглинається гальмуванням двигуна, щоб запобігти перезаряду (режим D на рис. 3).

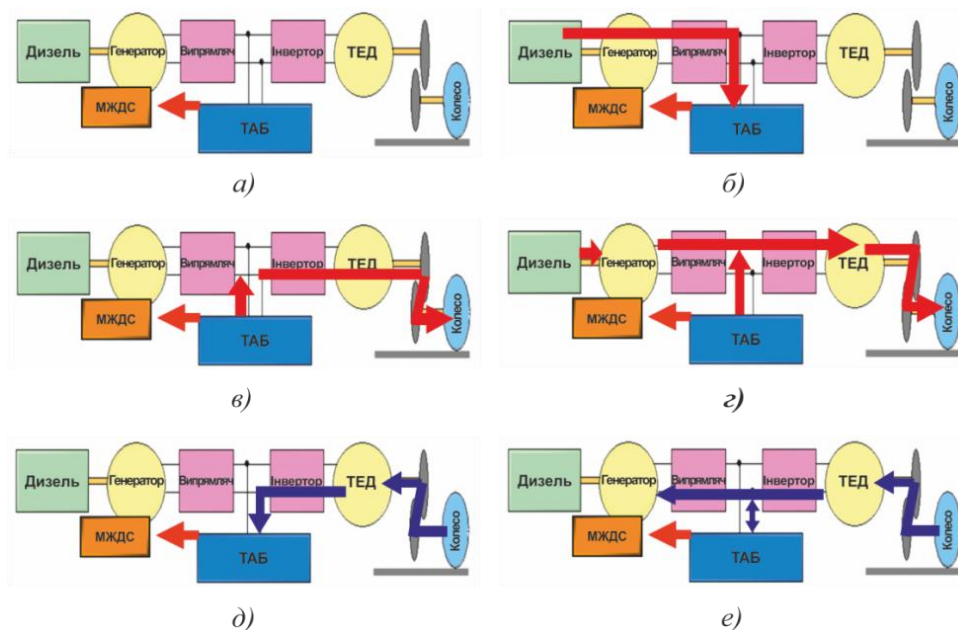


Рис. 4. Енергетичні потоки у гібридній тяговій системі [3]:

- а – режим «Стационарний»; б – режим «Стационарний (заряджання)»;
- в – режим «Живлення (швидкість нижче 25 км/год)»;
- г – режим «Живлення (швидкість понад 25 км/год)»;
- д – режим «Гальмування»; е – режим «Підтримка постійної швидкості»

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Під час подачі живлення та гальмування SOC контролюється, щоб він залишався в режимах А і В, як показано на рис. 5.

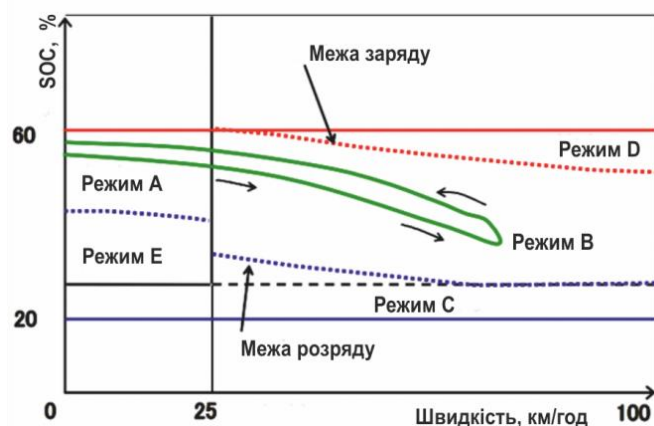


Рис. 5. Управління SOC (живлення – гальмування) [3]

Для розширення акумулювання енергії оптимізовано діапазон SOC, в межах якого працює накопичувач. Зменшення нижньої границі з 40% до 30% дозволило скоротити споживання пального на 5%.

Наведена вище стратегія керування застосовується і на іншому рухомому складі японських виробників [8, 18, 19].

У роботі [14] використано побідний до описаного алгоритм для оцінки зменшення споживання пального при русі дизель-поїзда ДЕЛ-02. При використанні накопичувача для акумулювання енергії при гальмуванні зменшення споживання пального склало 24%.

Розглянута стратегія енергетичного менеджменту спрямована, в першу чергу, на акумулювання енергії електродинамічного гальмування та живлення цією енергією тягової системи та допоміжних споживачів у режимах, де паливна ефективність дизельного двигуна є низькою. Це робота на холостому ході на зупинках, вибігу, гальмуванні та частково у режимі підтримання швидкості. Однак у даному способі використання накопичувача його сумісна робота з дизель-генератором не передбачена.

Іншим варіантом застосування накопичувачів є його використання для достатньо тривалого живлення тягової системи. Прикладом такого способу застосування накопичувачів енергії є забезпечення руху неелектрифікованими ділянками контактної-акумуляторних поїздів Flirt Akku виробництва Stadler [20], Mireo Plus B від Siemens Mobility [21] та інших. Доцільність використання акумуляторних поїздів визначається багатьма чинниками, проте можна відзначити, що їх впровадження вимагатиме інвестицій в інфраструктуру. Більш доступним вбачається використання накопичувача енергії у plug-in гібридній енергетичній установці. Заряджання може здійснюватися як від дизель-генератора, так і від стороннього джерела. Такий підхід застосовано при модернізації дизель-поїзда Class 168, де частина дизельних двигунів замінена накопичувачами енергії [19]. Стратегія керування гібридною енергетичною установкою передбачає живлення тягової системи від накопичувача при русі на станціях та в інших зонах, де заборонено використання дизельного двигуна. За-

ряджання накопичувача здійснюється при роботі дизельного двигуна та при електродинамічному гальмуванні. Схоже рішення пропонується компанією Hitachi Rail. Для гібридних дизель-поїздів, в яких один чи кілька дизель-генераторів замінюють накопичувачами енергії, скорочення споживання пального оцінюється у 20%...30%, а для tri-mode поїзда (із живленням від контактної мережі) – на 50% [22].

На сьогоднішній день, використання plug-in гібридних енергетичних установок не набуло широкого практичного використання. Проте чимало дослідників приділяють увагу застосуванню цієї технології. Plug-in гібридна енергетична установка досліджується у проєкті EcoTrain, який передбачає гібридизацію дизель-поїздів серії VT-642, які експлуатуються на німецьких залізницях [23]. Один з варіантів передбачає використання повністю електричної тягової системи (рис. 6), яка застосовується замість гідравлічної передачі потужності. Передбачено застосування накопичувача енергії ємністю 150 кВт·год.

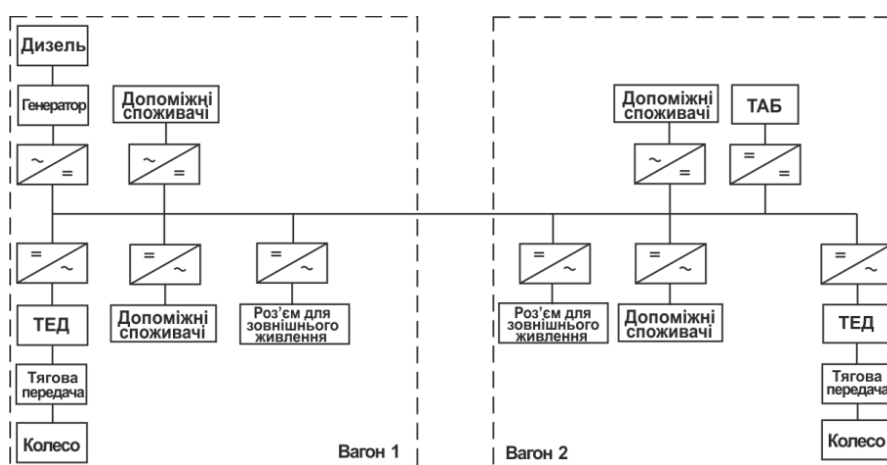


Рис. 6. Гібридна тягова система модернізованого дизель-поїзда VT-642 [23]

У проєкті EcoTrain передбачено використання дизель-генератора на одному вагоні та накопичувача енергії на другому вагоні. При цьому вони під'єднані до спільного проміжного контуру, від якого живиться тяговий електропривод та допоміжні системи. Результати моделювання показують зменшення споживання пального та викидів, однак потребують удосконалення стратегії використання накопичувача енергії.

Робота [12] присвячена використанню гібридної та plug-in гібридної енергетичної установки на дизель-поїзді нідерландської залізниці. Авторами запропоновано використання теорії автоматів для опису стратегій керування та розглянуто кілька варіантів використання накопичувача енергії. Результати моделювання показали скорочення викидів та витрат на 55% для певних варіантів накопичувача енергії.

У [14] виконано моделювання руху дизель-поїзда ДЕЛ-02, на якому накопичувачі енергії використовувалися у plug-in режимі. У першому варіанті накопичувач був доданий до кожної дизель-генераторної установки (рис. 7, а). У другому випадку один дизель-генератор було замінено на накопичувач енергії, а тягові системи моторних вагонів об'єднано (рис. 7, б).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Моделювання руху приміського поїзду проведено для ділянки Люботин-Боромля. У розрахункових варіантах прийнято, що накопичувач має параметри, які забезпечують енергетичний обмін в усіх режимах роботи.

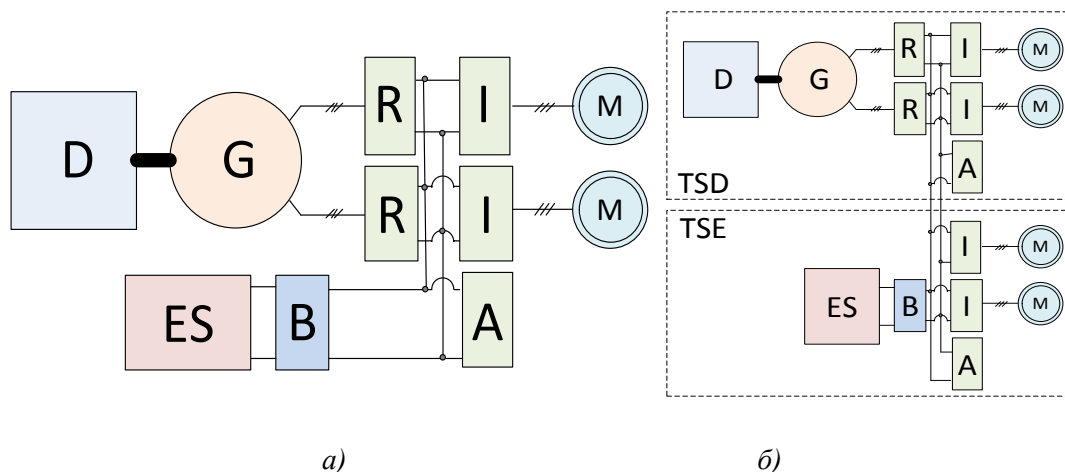


Рис. 7. Структурні схеми тягової системи модернізованого дизель-поїзду ДЕЛ-02, обладнаного plug-in гібридними енергетичними установками [14]:

а – дизель-генераторна установка з накопичувачем; б – об'єднана тягова система з накопичувачем; TSD – тягова система головного вагону з дизель-генератором; TSE – тягова система головного вагону з накопичувачем енергії; ES – накопичувач енергії; B – погоджувальний перетворювач; D – дизель; G – синхронний генератор; R – некеровані випрямлячі; I – тягові інвертори; М – тягові асинхронні електродвигуни; А – перетворювач живлення допоміжних систем

У другому варіанті (схема по рис. 7, б) дизель-генератор і накопичувач енергії навантажуються ідентично. При електродинамічному гальмуванні енергія від усіх тягових електродвигунів акумулюється в накопичувачі. Накопичувач енергії заряджався перед рухом від дизель-генератора. Для цього випадку економія пального склала 22% у порівнянні із серійним дизель-поїздом.

Таким чином, зменшення споживання пального дизель-поїздом ДЕЛ-02, який обладнано бортовим накопичувачем енергії, склало від 22% до 28% в залежності від стратегії застосування бортового накопичувача енергії.

Однак у випадку заряджання plug-in накопичувача енергії від стаціонарного джерела електроенергії, зменшення споживання пального становить близько 50%. На таку ж величину оцінюється скорочення шкідливих викидів. Сумарні витрати на ПЕР (дизельне пальне та електроенергію) у випадку заряджання plug-in накопичувача енергії від стаціонарного джерела електроенергії зменшуються на 36,5...40,4% у порівнянні з витратами на дизельне пальне для серійного дизель-поїзду.

Важливою особливістю використання plug-in накопичувача є можливість його спільної роботи з дизель-генератором. Це дає широкі можливості оптимізації гібридної енергетичної установки та адаптації її параметрів під конкретні умови руху. Проте для забезпечення заряджання plug-in накопичувача необхідна відповідна інфраструктура.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Отже, на сьогодні використання plug-in гібридних енергетичних установок перебуває на початковому етапі. Однак їх впровадження на реальному рухомому складі свідчить про зрілість технології та можливість її масштабування.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу слідує, що більш розповсюдженим є використання накопичувача для акумулювання енергії. Однак більший вплив на зменшення споживання пального, його вартість та зниження шкідливих викидів досягається при використанні plug-in накопичувачів. Зокрема, найвищі показники досягаються при заряджанні від стаціонарного джерела електроенергії.

Висновки. Використання накопичувачів енергії у тягових системах рухомого складу сприяє зменшенню витрат пального та скороченню шкідливих викидів.

Виділяється два способи використання бортових накопичувачів, які визначають вплив накопичувача енергії на зменшення споживання паливно-енергетичних ресурсів та шкідливі викиди. Перший спосіб передбачає використання накопичувача для акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні. При такому способі досягається 10% економії пального.

При другому способі передбачено заряджання plug-in накопичувача від стороннього джерела енергії – дизель-генератора чи стаціонарного джерела електроенергії. При заряджанні від дизель-генератора досягається зменшення споживання пального на 22%...28%. У випадку заряджання від стаціонарного джерела енергії зменшення споживання пального складає близько 50%, а витрати на паливно-енергетичні ресурси зменшуються на 36,5...40,4%. Це визначає пріоритетність цього способу використання накопичувача енергії.

Подяки. Стаття підготовлена при виконанні науково-дослідної роботи «Енергетичний менеджмент у plug-in гібридних тягових системах рейкового рухомого складу, обладнаного багатодвигунним тяговим електроприводом», що фінансується МОН України (№ д/р0125U001619).

ЛІТЕРАТУРА

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550 «Про Національну транспортну стратегію України на період до 2030 року» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF> – Дата звернення: 01.05.2025.
2. Бобиль В. В., Добрик Л. О. Вплив пасажирського залізничного транспорту на соціально-економічний потенціал регіону. Ефективна економіка. 2024. № 4. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.4.14>.
3. Shiraki N., Satou H., Arai S. A hybrid system for diesel railcar series Ki-Ha E200. The 2010 International Power Electronics Conference – ECCE ASIA. Sapporo, Japan, 2010. P. 2853–2858. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542319>.
4. Tokuyama K. et al. Practical application of a hybrid drive system for reducing environmental load Hitachi Review. 2008. Vol. 57. P. 23–27. URL: https://www.hitachi.com/rev/pdf/2008/r2008_01_003.pdf – Дата звернення: 01.05.2025.
5. Conclusive tests for the first French hybrid Régiolis trains set in Toulouse URL: <https://www.railtech.com/rolling-stock/2023/06/16/conclusive-tests-for-the-first-french-hybrid-regional-train-in-toulouse/?gdpr=accept> – Дата звернення: 01.05.2025.
6. First hybrid train for five French regions unveiled/ – Дата звернення: 01.05.2025. URL: <https://www.railwaypro.com/wp/first-hybrid-train-for-five-french-regions-unveiled/>
7. Kache M. Diesel-Hybrid-Treibwagen ETR. 2014. № 12. P. 50–53.
8. Infrastructure Systems [Електронний ресурс]. Toshiba Review, 2021. Режим доступу: <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/ww/technology/corporate/review/2021/toshiba-review-science-and-technology-highlights-2021/2104.pdf> – Дата звернення: 01.05.2025.

9. Schmid S., Ebrahimi K., Pezouvanis A., Commerell W. Model-based comparison of hybrid propulsion systems for railway diesel multiple units. *International Journal of Rail Transportation*. 2018. Vol. 6, № 1. P. 16–37. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1390790>.
10. Kapetanović M., Núñez A., van Oort N., Goverde R. M. P. Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains. *Applied Energy*. 2021. Vol. 294. Article ID: 117018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117018>.
11. Magelli M., Boccardo G., Bosso N. et al. Feasibility study of a diesel-powered hybrid DMU. *Railway Engineering Science*. 2021. № 29. P. 271–284. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00241-2>.
12. Kapetanović M., Vajihi M., Goverde R. M. P. Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains. *Energies*. 2021. Vol. 14. Article ID: 5920. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185920>.
13. Сергієнко М. І., Панасенко М. В., Пелепейченко В. І., Гордієнко Д. О. Оцінка ефективності застосування накопичувачів електроенергії в енергетичній установці дизель-поїзда ДЕЛ-02. *Залізничний транспорт України*. 2011. № 4. С. 29–35.
14. Riabov I., Overianova L., Iakunin D., Neshcheret V., Ivanov K. Equipping suburban diesel-electric multiple unit with a hybrid power unit. *e-Prime. Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 11. Article ID: 100949. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100949>.
15. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. № 5. P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>.
16. Shuang C., Minghui H., Yanlei L., Linghao K. Novel hybrid power system and energy management strategy for locomotives. *Applied Energy*. 2023. Vol. 348. Article ID: 121557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121557>.
17. Tokuyama K., Shimada M., Terasawa K., Kaneko T. Practical application of a hybrid drive system for reducing environmental load. *Hitachi Review*. 2008. Vol. 57, № 1. P. 23–27. URL: https://www.hitachi-hyoron.com/rev/pdf/2008/r2008_01_003.pdf – Дата звернення: 01.05.2025.
18. Fedele E., Iannuzzi D., Del Pizzo A. Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2021. Vol. 11, № 4. P. 279–309. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12026>.
19. Hybrid ‘168’ a first step in Chiltern decarbonisation URL: <https://www.modernrailways.com/article/hybrid-168-first-step-chiltern-decarbonisation> – Дата звернення: 01.05.2025.
20. Lightweight and flexible: FLIRT URL: <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt> – Дата звернення: 01.05.2025.
21. Mireo Plus B – Hybrid train for regional and commuter transport URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html> – Дата звернення: 01.05.2025.
22. Battery Commuter Trains URL: https://www.hitachirail.com/media/24pbolbr/website_product_cards_battery_commuter_trains.pdf – Дата звернення: 01.05.2025.
23. Fichtl H., Beims M., Werner C., Sören C. EcoTrain: The Erzgebirgsbahn's New Hybrid Railway Vehicle. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 575–584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.296>.

S.G. Buriakovskiy

National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine
Tel.: (057)7076133, E-mail: serhii.buriakovskiy@khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2469-7431>

L.V. Overianova

National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine
Tel.: (057) 7076530, E-mail: liliia.overianova@khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

V.O. Neshcheret

National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine

Tel.: (057)7076530, E-mail: volodymyr.neshcheret@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4080-6868>

K.I. Ivanov

National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine
Tel.: (057)7076530, E-mail: Kostiantyn.Ivanov@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3000-8191>

USE OF ENERGY STORAGE DEVICES IN THE HYBRID POWERTRAIN OF DIESEL MULTIPLE UNITS

The article aims to analyze the methods of using energy storage in the hybrid power train of diesel multiple units. The hybrid power train of diesel multiple units and rail buses has been considered and analyzed. It has been determined that on the existing rolling stock, energy storage is mainly used to accumulate energy during electrodynamic braking. The energy accumulated during braking is spent on powering the traction system and auxiliary systems in modes where the operation of the diesel engine is characterized by high fuel consumption. This method of using the energy storage ensures a reduction in fuel consumption by approximately 10%. Another option is to use the storage in plug-in mode, which involves charging it from a diesel generator or a stationary source of electricity. In the latter case, the greatest impact on reducing fuel consumption and harmful emissions, as well as on the cost of fuel and energy resources, is provided. The results of theoretical studies for the domestic diesel train DEL-02, equipped with a hypothetical plug-in hybrid power unit, show a reduction in fuel consumption by 22%...28% compared to a serial diesel train when charging from a diesel generator. When charging from a stationary energy source, the reduction in fuel consumption is estimated at 50%, and the overall reduction in the cost of fuel and energy resources is 36.5...40.4%. This justifies the priority of using plug-in storage devices. When using a plug-in storage device, it is possible to optimize the parameters of the hybrid power unit for specific operating conditions, as well as the possibility of mutual operation of the storage device and diesel generator. The scientific novelty lies in substantiating the priority direction for studying and researching energy storage devices for their application in hybrid power units for domestic diesel multiple units, namely, the use of plug-in storage devices and energy management strategies for plug-in hybrid power units. The practical significance lies in the analysis of existing energy management strategies in hybrid power units. This will ensure their implementation in domestic products, which will improve the efficiency of hybrid traction systems.

Keywords: diesel multiple units, energy storage, traction system, plug-in hybrid power unit, fuel and energy resources, energy management.

REFERENCES

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 27 grudnya 2024 r. № 1550 «Pro Natsional'nu transportnu stratehiyu Ukrainy na period do 2030 roku» [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On the National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030», № 1550]. (2024, December 27). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n17> [in Ukrainian].

2. Bobyl, V. V., & Dobryk, L. O. (2024). Vplyv pasazhyr'skoho zaliznychnoho transportu na sotsial'no-ekonomichnyy potentsial rehionu. [The impact of passenger rail transport on the socio-economic potential of the region]. *Efektivna ekonomika - Efficient economy*, 4. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.4.14> [in Ukrainian].
3. Shiraki, N., Satou, H., & Arai, S. (2010). A hybrid system for diesel railcar series Ki-Ha E200. The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA. Sapporo, Japan, 2853–2858. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542319>
4. Tokuyama, K. et al. (2008). Practical application of a hybrid drive system for reducing environmental load. *Hitachi Review*, 23–27. https://www.hitachi.com/rev/pdf/2008/r2008_01_003.pdf
5. Conclusive tests for the first French hybrid Régiolis train set in Toulouse. <https://www.railtech.com/rolling-stock/2023/06/16/conclusive-tests-for-the-first-french-hybrid-regional-train-in-toulouse/?gdpr=accept> (16-06-2023)
6. First hybrid train for five French regions unveiled. <https://www.railwaypro.com/wp/first-hybrid-train-for-five-french-regions-unveiled/> (February 17, 2022)
7. Kache, M. (2014). Diesel-Hybrid-Treibwagen. *ETR*, 12, 50–53.
8. Infrastructure Systems. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/ww/technology/corporate/review/2021/toshiba-review-science-and-technology-highlights-2021/2104.pdf> (2021)
9. Schmid, S., Ebrahimi, K., Pezouvanis, A., & Commerell, W. (2018). Model-based comparison of hybrid propulsion systems for railway diesel multiple-units. *International Journal of Rail Transportation*, 6:1, 16–37. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1390790>
10. Kapetanović, M., Núñez, A., Oort, N., Goverde, Rob M. P. (2021). Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains. *Applied Energy*, 294, 117018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117018>
11. Magelli, M., Boccardo, G., Bosso, N. et al. (2021). Feasibility study of a diesel-powered hybrid DMU. *Rail. Eng. Science*, 29, 271–284. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00241-2>
12. Kapetanović, M., Vajihi, M., Goverde, & Rob M. P. (2021). Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Multiple Unit Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains. *Energies*, 14, 5920. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185920>
13. Serhiienko, M. I., Panasenko, M. V., Pelepeichenko, V. I., & Hordiienko, D. O. (2011). Otsinka efektyvnosti zastosuvannya nakopychuvachiv elektroenergii v enerhetychnii ustanovtsi dyzel-poizda DEL-02. (Assessment of the effectiveness of the use of electricity storage devices in the power plant of the DEL-02 diesel train). *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 4, 29–35 [in Ukrainian].
14. Riabov, I., Overianova, L., Iakunin, D., Neshcheret, V., & Ivanov, K. (2025). Equipping suburban diesel-electric multiple unit with a hybrid power unit. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11, 100949. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100949>
15. Sulym, A., Fomin, O., Khozia, P., & Mastepan, A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk NHU*, 5, 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
16. Chen, S., Hu, M., Lei, Y., & Kong, L. (2023). Novel hybrid power system and energy management strategy for locomotives. *Applied Energy*, 348, 121557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121557>
17. Tokuyama, K., Shimada, M., Terasawa, K., Kaneko, T. (2008). Practical Application of a Hybrid Drive System for Reducing Environmental Load. *Hitachi Review*, 57, 1, 23–27. URL: https://www.hitachihyoron.com/rev/pdf/2008/r2008_01_003.pdf
18. Fedele, E., Iannuzzi, D., & Del Pizzo, A. (2021). Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET Electrical Systems in Transportation*, 11(4), 279–309. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12026>
19. Modern Railways. (n.d.). Hybrid 168: First step in Chiltern decarbonisation. <https://www.modernrailways.com/article/hybrid-168-first-step-chiltern-decarbonisation>
20. Stadler Rail. (n.d.). FLIRT mainline solutions. <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt>
21. Siemens Mobility. (n.d.). Mireo Plus B. <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html>
22. Hitachi Rail. (n.d.). Battery commuter trains. https://www.hitachirail.com/media/24pblbr/website_product_cards_battery_commuter_trains.pdf
23. Fichtl, H., Beims, M., Werner, C., & Sören, C. (2016). EcoTrain: The Erzgebirgsbahn's new hybrid railway vehicle. *Transportation Research Procedia*, 14, 575–584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.296>

О.В. Фомін

Кафедра «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту, вул. Івана Огієнка, 19, м. Київ, Україна, 02000

Телефон: 067-81-397-88, E-mail: fomin_ov@gsuite.uit.edu.ua

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

В.М. Іщенко

Кафедра «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту, вул. Івана Огієнка, 19, м. Київ, Україна, 02000

Телефон: 067-836-59-07, E-mail: ischenko_vm@gsuite.uit.edu.ua

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

В.В. Обуховський

Кафедра «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту, вул. Івана Огієнка, 19, м. Київ, Україна, 02000

Телефон: 096-91-93-333, E-mail: obyhovskyy_vv@gsuite.uit.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0922-7861>

Д.А. Туровець

Кафедра «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту, вул. Івана Огієнка, 19, м. Київ, Україна, 02000

Телефон: 093-988-38-90, E-mail: turovecd1520mm@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2405-4065>

СТЕНДОВІ ВИПРОБУВАННЯ ГАЛЬМІВНИХ ПОВІТРОРІЗПОДІЛЬНИКІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ПРИ ВПЛИВІ ГРАНИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ТЕМПЕРАТУР

На сьогодні в Україні гостро стоїть питання виробництва власних повітро-розподільників для пасажирського і вантажного рухомого складу та деяких типів локомотивів. При постановці на виробництво гальмівних повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу одним з ключових етапів є випробування при впливі критично низьких та критично високих температур ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Сьогодні в Україні існує лише один стенд для кліматичних випробувань лише однієї моделі вантажних повітророзподільників, при цьому кліматичного стенду для випробувань гальмівних повітророзподільників пасажирського рухомого складу не існує. Запропоновано рішення даної проблеми у вигляді окремого використання кліматичної камери та стендів для випробувань гальмівних повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу.

© Фомін О.В., Іщенко В.М., Обуховський В.В., Туровець Д.А., 2025

В роботі описані теоретичні та практичні методи випробування при впливі критично низьких та критично високих температур повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу з можливістю використання стандартних стендів для випробувань гальмівних повітророзподільників окремо від кліматичної камери з контролюванням температури приміщення в якому встановлені дані стенди та температури дослідних гальмівних повітророзподільників, що пройшли витримку в кліматичній камері при впливі критично низьких та критично високих температур.

Ключові слова: випробування, вплив граничних температур, гальмівні повітророзподільники, технічний стан, безпека руху.

Вступ та постановка проблеми. Проведення випробування при впливі критично низьких та критично високих температур ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) нових гальмівних повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу є важливим етапом для їхнього впровадження в український рухомий склад. Однак існують певні проблеми, що ускладнюють цей процес. Насамперед, відсутність в Україні ряду універсальних спеціалізованих стендів для випробувань гальмівних повітророзподільників залізничного рухомого складу, що мають в своїй конструкції кліматичну камеру для випробувань при впливі критично низьких та критично високих температур.

Також слід враховувати необхідність розробки уніфікованої методики проведення випробування при впливі критично низьких та критично високих температур ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) гальмівних повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу, яка б враховувала можливість проведення такого виду випробування окремо від кліматичної камери з застосування типових універсальних стендів та забезпечувала об'єктивність отриманих даних. Окрім того, важливим аспектом є забезпечення безпеки вантажних перевезень та персоналу під час проведення випробувань.

Нарешті, однією з проблем є необхідність залучення кваліфікованих фахівців та наявної матеріально-технічної бази для проведення якісних та всебічних випробувань. Вирішення цих проблем є ключовим для успішного впровадження нових гальмівних повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу, що відповідатимуть сучасним вимогам безпеки та енергоефективності в українському рухомому складі. Згідно з чинним стандартом ДСТУ ГОСТ 33724.1 [1], випробування гальмівних повітророзподільників при впливі критично низьких та критично високих температур повинні проходити на спеціалізованому стенді у складі якого є кліматична камера. Такий стенд є вузькоспеціалізованим та розрахованим лише під одну модель гальмівного повітророзподільника. Дана робота присвячена опису теоретичних та практичних методів випробування гальмівних повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу при впливі критично низьких та критично високих температур на спеціалізованому стенді окремо від кліматичної камери.

Аналіз останніх досліджень. На теперішній час питанню випробувань автогальмівного обладнання присвячено ряд праць. Стандарт [1] описує основні вимоги щодо безпеки та методи контролювання нових повітророзподільників, у тому числі гальмівних повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу. В роботі [2] запропоновано методологію перерахунку гальмівної ефективності вагона на гальмівну ефективність поїзда, що базується на результатах гальмівних ходових випробувань одиночного вагона. При перерахунку використовуються факти-

чні характеристики гальмівної системи: час наповнення гальмівного циліндра, виміряні значення гальмівних шляхів у діапазоні швидкостей 40 - 120 км/год та відповідні гальмівні коефіцієнти, швидкість поширення гальмівної хвилі. Праця [3] присвячена дослідженню впливу часу гальмування, що не встановилося, на гальмівну ефективність пасажирського вагона з колодковими гальмами при екстреному пневматичному гальмуванні. В публікації [4] приведено методику розрахунку гальмівної ефективності вагона з колодковими гальмами, що базується на вирішенні диференціального рівняння руху при гальмуванні у часовій області. В публікації [5] представлено результати дослідження перехідних режимів гальмування вагонів з колодковими гальмами. Наведено математичні залежності для питомої гальмівної сили, що враховують перехідний період при гальмуванні. В [6] представлено методологію розрахунку гальмівної ефективності з використанням комп'ютерного моделювання. Стаття [7] аналізує асиметричне зношування гальмівних колодок вантажних вагонів, незважаючи на повний контакт між поверхнею колодки та колесом. Автори досліджують можливі причини такого нерівномірного зносу, розглядаючи фактори, пов'язані з конструкцією гальмівної системи, матеріалами колодок та умовами експлуатації. У роботі представлені результати експериментальних досліджень та моделювання, спрямовані на виявлення ключових факторів, що впливають на асиметричне зношування. Розуміння цих причин є важливим для розробки більш довговічних та ефективних гальмівних систем для вантажних вагонів. Дослідження сприяє підвищенню безпеки та зниженню витрат на обслуговування залізничного транспорту.

Стаття [8] присвячена прогнозуванню залишкового ресурсу зношування композитних гальмівних колодок модернізованої гальмівної системи вантажних вагонів. Автори розробляють методику оцінки терміну служби гальмівних колодок на основі аналізу їхнього зношування під час експлуатації. У роботі представлені моделі прогнозування, що враховують різні фактори, такі як навантаження, швидкість та умови гальмування. Точне прогнозування залишкового ресурсу дозволяє оптимізувати графіки технічного обслуговування та підвищити безпеку експлуатації вагонів. Дослідження є важливим для впровадження систем предиктивного обслуговування на залізничному транспорті. Робота [9] розглядає питання модернізації залізничних вагонів з метою підвищення задоволеності клієнтів та рівня безпеки. Автори аналізують різні аспекти модернізації, включаючи оновлення технічного обладнання, покращення комфорту пасажирів та впровадження сучасних систем безпеки. У роботі представлені приклади успішних модернізацій та їхній вплив на якість обслуговування та безпеку перевезень. Дослідження підкреслює важливість постійного оновлення рухомого складу для задоволення зростаючих вимог клієнтів та забезпечення високого рівня безпеки на залізниці. Стаття є актуальною для розвитку пасажирських та вантажних залізничних перевезень. Тематика роботи [10] пов'язана з екологічними науками, інженерією та сталим розвитком. Вона представляє результати досліджень авторів у цій галузі. Вона містить нові підходи, аналіз даних та практичні рекомендації. Публікація [11] досліджує фізичні, механічні, трибологічні, термічні характеристики та довговічність комерційного гальмівного матеріалу для залізничного транспорту. Автори проводять комплексне дослідження властивостей матеріалу, що використовується в гальмівних системах поїздів. У роботі представлені результати лабораторних випробувань та аналіз експлуатаційних характеристик. Отримані дані є важливими для вибору оптимальних гальмівних матеріалів, що забезпечують безпеку та довговічність залізничного транспорту. Дослідження сприяє покращенню

гальмівних систем поїздів. Наукова праця [12] присвячена оцінці вібрації дискових гальм під час експлуатації залізничного транспорту на основі гальмівного стенду. Автори досліджують вібраційні характеристики гальмівної системи в умовах, що імітують реальну експлуатацію. У роботі представлені результати експериментальних вимірювань вібрації та їхній аналіз. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації конструкції гальмівної системи з метою зменшення вібрації та шуму. Дослідження є важливим для підвищення комфорту та безпеки залізничних перевезень. Робота [13] розглядає розробку структури інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для локомотивів та оцінку якості її функціонування. Автори пропонують концепцію системи, яка може допомагати машиністам приймати обґрунтовані рішення в різних експлуатаційних ситуаціях. У роботі описано основні компоненти системи та алгоритми її роботи. Результати оцінки якості функціонування можуть свідчити про потенційні переваги впровадження таких систем для підвищення ефективності та безпеки залізничних перевезень. Дослідження є внеском у розвиток інтелектуальних транспортних систем. У статті [14] розглядаються особливості випробувань на міцність авторегуляторів гальмівного обладнання вагонів. Автори аналізують методи та процедури, що застосовуються для оцінки надійності та довговічності цих важливих елементів гальмівної системи. У роботі представлені результати експериментальних досліджень або аналіз існуючих стандартів випробувань. Отримані дані можуть бути корисними для вдосконалення методик випробувань та підвищення безпеки перевезень. Стаття є важливим внеском у забезпечення надійної роботи гальмівного обладнання на залізничному транспорті.

Метою роботи є практичне доведення можливості проведення випробування при впливі критично низьких та критично високих температур ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу з можливістю використання стандартних стендів для випробувань гальмівних повітророзподільників окремо від кліматичної камери з контролюванням температури приміщення в якому встановлені дані стенди та температури дослідних гальмівних повітророзподільників, що пройшли витримку в кліматичній камері при впливі критично низьких та критично високих температур.

Матеріали та результати досліджень. Об'єктами дослідження є пасажирські (моделі 242-1У, 305У) та вантажний (модель 483МУ) гальмівні повітророзподільники, виробництва ТОВ «Укрнафтозапчастина», що зображені на рис. 1.

Для проведення випробування гальмівних повітророзподільників пасажирського та вантажного рухомого складу при впливі критично низьких та критично високих температур ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) використовується наступне устаткування:

- Морозильник наднизької температури DW-70W 1000;
- Електропіч опору шахтна СШО-9.1,9/11
- Стенд для випробування повітророзподільників ПР0242 та електроповітророзподільників ЕПР-305, ЕПР-305-1;
- Стенд для перевірки функціонування повітророзподільників ВР-483 ИС-421.1

Вимірювальне обладнання складається з автоматичного аналого-цифрового перетворювача на базі контролера NI 9205 та датчиків тиску Honeywell MLH250PSB01A. Обробка та візуалізація первинних даних здійснюється на комп'ютері з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для статистичної обробки отриманих результатів. Блок-схема обробки отриманих первинних даних показана на рис. 2.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

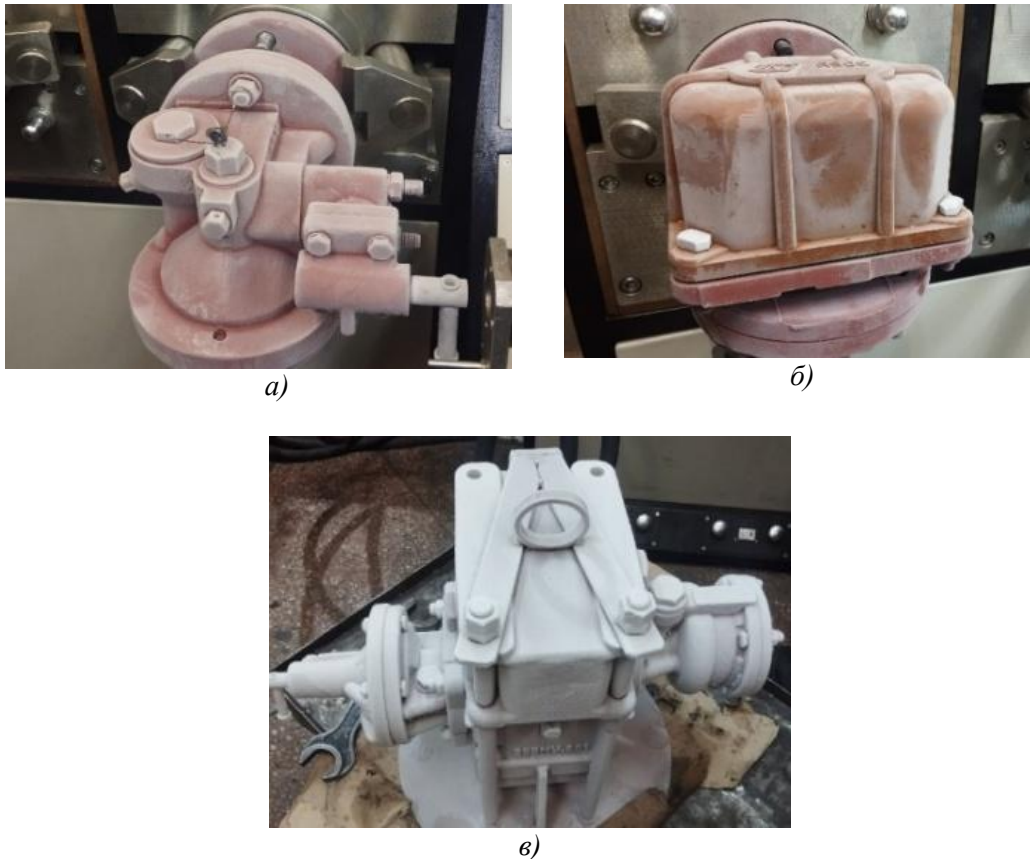


Рис. 1. Гальмівні повітророзподільники 242-1У (а), 305У (б) та 483МУ(в)

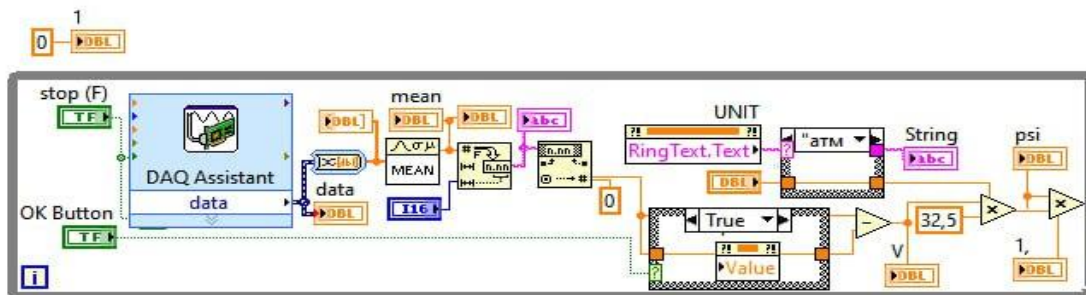


Рис. 2. Блок-схема первинної обробки даних

Перед встановленням дослідних гальмівних повітророзподільників кожен з них витримується в окремій кліматичній камері протягом не менше двох годин при заданих значеннях температури (-50 °C та +50 °C) з пониженням температури під час витримки на 5 °C нижче заданого граничного. Час з моменту виїмання дослідних повітророзподільників з кліматичної камери до моменту встановлення їх на випробувальні стенди складало від 3 до 5 хв. Результати випробування при впливі критично низьких та критично високих температур (-50 °C та +50 °C) пасажирських та вантажних гальмівних повітророзподільників наведено в таблицях 1-3.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 1 - Результати випробувань пасажирського повітророзподільника моделі 242-1У при впливі критично низьких та критично високих температур (-50 °С та +50 °С)

№ п/п	Контрольовані характеристики, параметри	Одиниця вимірювання	Значення параметра	
			Нормативне значення	Фактичне значення
Показники роботи повітророзподільника 242-1У при впливі граничного значення робочої температури - 50°C				
1	Зарядка ЗР до зарядного тиску	МПа (кгс/см ²)	Не регламентується	0,49 (5,0)
2	Тиск стисненого повітря в гальмівному резервуарі після ступеня гальмування	МПа (кгс/см ²)	не менше ніж 0,08 (0,8)	0,1 (1,1)
3	Зміна усталеного тиску стисненого повітря в гальмівному резервуарі протягом 60 с після ступені гальмування	МПа (кгс/см ²)	0,01 (0,1)	Зміна усталеного тиску не відбулась
4	Тиск стисненого повітря в гальмівному резервуарі після підвищення тиску стисненого повітря в магістральному резервуарі до зарядного тиску	МПа (кгс/см ²)	не більше ніж 0,005 (0,05)	0 (0)
5	Відсутність спрацювання повітророзподільника на екстрене гальмування під час зниження тиску в магістральному резервуарі темпом службового гальмування	-	Відсутність спрацювання на екстрене гальмування	повітророзподільник на екстрене гальмування не спрацював,
6	Тиск стисненого повітря в гальмівному резервуарі після підвищення тиску в магістральному резервуарі до 0,41 МПа (4,2 кгс/см ²)	МПа (кгс/см ²)	не більше ніж 0,005 (0,05)	0 (0)
7	Спрацювання повітророзподільника на екстрене гальмування у разі зниження тиску в магістральному резервуарі темпом екстреного гальмування	-	Спрацювання на екстрене гальмування	Повітророзподільник на екстрене гальмування спрацював
Показники роботи повітророзподільника 242-1У при впливі граничного значення робочої температури + 50°C				
8	Зарядка ЗР до зарядного тиску	МПа (кгс/см ²)	Не регламентується	0,49 (5,0)
9	Тиск стисненого повітря в гальмівному резервуарі після ступеня гальмування	МПа (кгс/см ²)	не менше ніж 0,08 (0,8)	0,1 (1,09)
10	Зміна усталеного тиску стисненого повітря в гальмівному резервуарі протягом 60 с після ступені гальмування	МПа (кгс/см ²)	0,01 (0,1)	Зміна усталеного тиску не відбулась
11	Тиск стисненого повітря в гальмівному резервуарі після підвищення тиску стисненого повітря в магістральному резервуарі до зарядного тиску	МПа (кгс/см ²)	не більше ніж 0,005 (0,05)	0(0)
12	Відсутність спрацювання повітророзподільника на екстрене гальмування під час зниження тиску в магістральному резервуарі темпом службового гальмування	-	Відсутність спрацювання на екстрене гальмування	Повітророзподільник на екстрене гальмування не спрацював,
13	Тиск стисненого повітря в гальмівному резервуарі після підвищення тиску в магістральному резервуарі до 0,41 МПа (4,2 кгс/см ²)	МПа (кгс/см ²)	не більше ніж 0,005 (0,05)	0 (0)
14	Спрацювання повітророзподільника на екстрене гальмування у разі зниження тиску в магістральному резервуарі темпом екстреного гальмування	-	Спрацювання на екстрене гальмування	Повітророзподільник спрацював на екстрене гальмування,

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 2 – Результати випробувань пасажирського повітророзподільника моделі 305У при впливі критично низьких та критично високих температур (-50 °С та +50 °С)

№ п/п	Контрольовані характеристики, параметри	Одиниця вимірювання	Значення параметра	
			Нормативне значення	Фактичне значення
1	2	3	4	5
Показники роботи повітророзподільника 305У при впливі граничного значення робочої температури - 50°C				
1	Щільність з'єднань і манжети хвостовика живильного клапана	МПа (кгс/см ²)	не більше ніж 0,02 (0,2)	0,01 (0,11)
2	Щільність відпусного і гальмового клапанів (пропуск повітря не допускається), що визначається відсутністю бульбашок, с, не менше ніж	с	60	Після обмилування протягом 60 с. створення мильних бульбашок не виявлено
3	Напруга на котушках електромагнітних вентилів: – у момент притягання якорів, ніж – у момент відпадиння	В	не більша ніж 30 не менша ніж 6	29,88 8,86
4	Чутливість електроповітророзподільників на гальмування – зниження тиску в ГЦ (гальмовому резервуарі) повинно: – на першому ступені відповідати – при наступних ступенях збільшуватися	МПа (кгс/см ²)	не більше 0,05 (0,5) не більше ніж на 0,03 (0,3)	0,03 (0,31) 0,015 (0,16)
5	Чутливість електроповітророзподільників на живлення ГЦ (гальмового резервуара) і щільність клапанів гальмового і відпусного вентилів: – зміна тиску в робочій камері протягом 1 хв при ступені гальмування з тиском в ГЦ (гальмовому резервуарі) 0,25 ^{+0,05} МПа (2,5 ^{+0,5} кгс/см ²) - підтримання тиску електроповітророзподільником в ГЦ (гальмовому резервуарі) при витоку повітря з ГЦ (гальмового резервуара) через отвір діаметром 1 мм з коливаннями протягом 1 хв	МПа (кгс/см ²)	не більше ± 0,02 (± 0,2) не більше ± 0,02 (± 0,2)	0,004 (0,04) 0,003 (0,04)
6	Чутливість електроповітророзподільників на відпуск – зниження тиску в ГЦ (гальмовому резервуарі) при тиску в ГЦ (гальмовому резервуарі) 0,25 ^{+0,05} МПа (2,5 ^{+0,5} кгс/см ²) повинно: – на першому ступені відповідати – при наступних ступенях знижуватися	МПа (кгс/см ²)	не більше 0,05 (0,5) не більше ніж на 0,03 (0,3)	0,03 (0,33) 0,023 (0,24)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5
7	При зарядному тиску в магістральному резервуарі: – час наповнення ГЦ до тиску 0,3 МПа (3,0 кгс/см ²) – час відпуску при зниженні тиску з 0,3 до 0,05 МПа (з 3,0 до 0,5 кгс/см ²) у гальмовому резервуарі	с	3 ± 0,5 4,5 ± 1	3,0 3,9
8	Спрацьовування клапанів електромагнітних вентилів При подачі на обмотки напруги 30 В тиск у робочій камері і ГЦ (гальмовому резервуарі) повинен підвищитися: – клапан гальмового вентиля повинен – клапан відпускнуго вентиля повинен – тиск повинен Після зменшення напруги до 10 В тиск у робочій камері і ГЦ повинен знизитися до нуля): – клапан гальмового вентиля повинен – клапан відпускнуго вентиля повинен – тиск повинен	-	Відкритися Закритися Підвищитися Закритися Відкритися Знизитись до 0	Відкрився Закрився Підвищився Закрився Відкрився Знизився до 0
Показники роботи повіторозподільника 305У при впливі граничного значення робочої температури + 50°C				
9	Щільність з'єднань і манжети хвостовика живильного клапана	МПа (кгс/см ²)	не більше ніж 0,02 (0,2)	0,0039 (0,04)
10	Щільність відпускнуго і гальмового клапанів (пропуск повітря не допускається), що визначається відсутністю бульбашок, с, не менше ніж	с	не менше ніж 60	Після обмилування протягом 60 с. створення мильних бульбашок не виявлено
11	Напруга на котушках електромагнітних вентилів: – у момент притягання якорів, не більша ніж – у момент відпадиння	В	не більша ніж 30 не менша ніж 10	29,88 12,53
12	Чутливість електроповіторозподільників на гальмування – зниження тиску в ГЦ (гальмовому резервуарі) повинно: – на першому ступені відповідати – при наступних ступенях збільшуватися	МПа (кгс/см ²)	не більше 0,05 (0,5) не більше ніж на 0,03 (0,3)	0,017 (0,18) 0,011 (0,12)
13	Чутливість електроповіторозподільників на живлення ГЦ (гальмового резервуара) і щільність клапанів гальмового і відпускнуго вентилів: – зміна тиску в робочій камері протягом 1 хв при ступені гальмування з тиском в ГЦ (гальмовому резервуарі) 0,25 ^{+0,05} МПа (2,5 ^{+0,5} кгс/см ²) – підтримання тиску електроповіторозподільником в ГЦ (гальмовому резервуарі) при витоку повітря з ГЦ (гальмового резервуара) через отвір діаметром 1 мм з коливаннями протягом 1 хв	МПа (кгс/см ²)	не більше ± 0,02 (± 0,2) не більше ± 0,02 (± 0,2)	0,003 (0,03) 0,0098 (0,01)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Закінчення таблиці 2

1	2	3	4	5
14	Чутливість електроповітророзподільників на відпуск – зниження тиску в ГЦ (гальмовому резервуарі) при тиску в ГЦ (гальмовому резервуарі) $0,25^{+0,05}$ МПа ($2,5^{+0,5}$ кгс/см ²) повинно: – на першому ступені відповідати – при наступних ступенях знижуватися	МПа (кгс/см ²)	не більше 0,05 (0,5) не більше ніж на 0,03 (0,3)	0,03 (0,34) 0,022 (0,23)
15	При зарядному тиску в магістральному резервуарі: – час наповнення ГЦ до тиску 0,3 МПа (3,0 кгс/см ²) – час відпуску при зниженні тиску з 0,3 до 0,05 МПа (з 3,0 до 0,5 кгс/см ²) у гальмовому резервуарі	с	$3 \pm 0,5$ $4,5 \pm 1$	3,5 4,0
16	Спрацьовування клапанів електромагнітних вентилів При подачі на обмотки напруги 30 В тиск у робочій камері і ГЦ (гальмовому резервуарі) повинен підвищитися: – клапан гальмового вентиля повинен – клапан відпускнуго вентиля повинен – тиск повинен Після зменшення напруги до 10 В тиск у робочій камері і ГЦ повинен знизитися до нуля): – клапан гальмового вентиля повинен – клапан відпускнуго вентиля повинен – тиск повинен	-	Відкритися Закритися Підвищитися Закритися Відкритися Знизитись до 0	Відкрився Закрився Підвищився Закрився Відкрився Знизився до 0

Таблиця 3 – Результати випробувань пасажирського повітророзподільника моделі 483МУ при впливі критично низьких та критично високих температур (-50 °С та +50 °С)

№ п/п	Контрольовані характеристики, параметри	Одиниця вимірювання	Значення параметра	
			Нормативне значення	Фактичне значення
1	2	3	4	5
Показники роботи повітророзподільника 483МУ при впливі граничного значення робочої температури - 50°С Режим «Гірський» і «Навантажений».				
1	Тиск у гальмовому циліндрі (резервуарі) після ступені гальмування	МПа (кгс/см ²)	Не менше ніж 0,04 (0,4)	0,08 (0,85)
2	Відсутність повного спуску (випуску) повітря з гальмового циліндра (резервуара) після ступені гальмування протягом часу	с	Не менше ніж 300	Протягом 300 с спуску (випуску) повітря з гальмового циліндра (резервуара) не відбулось

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5
3	Зміна тиску в гальмовому циліндрі (резервуарі) при витоку з нього	МПа (кгс/см ²)	Не більше ніж 0,05 (0,5)	0,01 (0,14)
4	Тиск стисненого повітря в гальмовому циліндрі (резервуарі) при відпуску після ступенів гальмування підвищеним тиском у магістральному резервуарі до 0,46 МПа (4,7кгс/см ²)	МПа (кгс/см ²)	Не більше ніж 0,005 (0,05)	Відбувся повний випуск повітря з гальмового циліндра (резервуара)
5	Тиск стисненого повітря в гальмовому циліндрі (резервуарі) при відпуску після ступенів гальмування підвищеним тиском у магістральному резервуарі повільним темпом	МПа (кгс/см ²)	Не більше ніж 0,005 (0,05)	Відбувся повний випуск повітря з гальмового циліндра (резервуара)
6	Тиск у гальмовому циліндрі (резервуарі) після екстреного гальмування на режимі «Порожній»	МПа (кгс/см ²)	0,13 – 0,19 (1,3 – 1,9)	0,56 (1,59)
7	Тиск у гальмовому циліндрі (резервуарі) після екстреного гальмування на режимі «Середній»	МПа (кгс/см ²)	0,29 – 0,34 (3,0 – 3,5)	0,33 (3,39)
8	Тиск у гальмовому циліндрі (резервуарі) після екстреного гальмування на режимі «Навантажений»	МПа (кгс/см ²)	0,38 – 0,44 (3,9 – 4,5)	0,43 (4,4)
9	Зниження тиску в запасному резервуарі протягом 60 с після екстреного гальмування	МПа (кгс/см ²)	Не більше ніж 0,01 (0,1)	Зниження тиску в запасному резервуарі не відбулось
Показники роботи повітророзподільника 483МУ при впливі граничного значення робочої температури + 50°С Режим «Гірський» і «Навантажений».				
10	Тиск у гальмовому циліндрі (резервуарі) після ступені гальмування	МПа (кгс/см ²)	Не менше ніж 0,04 (0,4)	0,07 (0,76)
11	Відсутність повного спуску (випуску) повітря з гальмового циліндра (резервуара) після ступені гальмування протягом часу	с	Не менше ніж 300	Протягом 300 с спуску (випуску) повітря з гальмового циліндра (резервуара) не відбулось
12	Зміна тиску в гальмовому циліндрі (резервуарі) при витоку з нього	МПа (кгс/см ²)	Не більше ніж 0,05 (0,5)	0,01 (0,14)
13	Тиск стисненого повітря в гальмовому циліндрі (резервуарі) при відпуску після ступенів гальмування підвищеним тиском у магістральному резервуарі до 0,46 МПа (4,7кгс/см ²)	МПа (кгс/см ²)	Не більше ніж 0,005 (0,05)	Відбувся повний випуск повітря з гальмового циліндра (резервуара)
14	Тиск стисненого повітря в гальмовому циліндрі (резервуарі) при відпуску після ступенів гальмування підвищеним тиском у магістральному резервуарі повільним темпом	МПа (кгс/см ²)	Не більше ніж 0,005 (0,05)	Відбувся повний випуск повітря з гальмового циліндра (резервуара)
15	Тиск у гальмовому циліндрі (резервуарі) після екстреного гальмування на режимі «Порожній»	МПа (кгс/см ²)	0,13 – 0,19 (1,3 – 1,9)	0,16 (1,63)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Закінчення таблиці 3

1	2	3	4	5
16	Тиск у гальмовому циліндрі (резервуарі) після екстреного гальмування на режимі «Середній»	МПа (кгс/см ²)	0,29 – 0,34 (3,0 – 3,5)	0,33 (3,37)
17	Тиск у гальмовому циліндрі (резервуарі) після екстреного гальмування на режимі «Навантажений»	МПа (кгс/см ²)	0,38 – 0,44 (3,9 – 4,5)	0,43 (4,34)
18	Зниження тиску в запасному резервуарі протягом 60 с після екстреного гальмування	МПа (кгс/см ²)	Не більше ніж 0,01 (0,1)	Зниження тиску в запасному резервуарі не відбулося

Висновки. Узагальнюючи результати випробування при впливі критично низьких та критично високих температур (-50 °С та +50 °С) пасажирських та вантажних гальмівних повітророзподільників було визначено наступне:

- Дослідні пасажирські та вантажні гальмівні повітророзподільники моделей 242-1У, 305У та 483МУ відповідають вимогам стандарту [1] та вимогам безпеки на АТ «Укрзалізниця»;
- реалізовано можливість проведення випробування при впливі критично низьких та критично високих температур гальмівних повітророзподільників для пасажирського та вантажного рухомого складу з використанням окремої кліматичної камери та стендів для випробувань гальмівних повітророзподільників;
- розроблено блок-схему для обробки та візуалізації первинних результатів, отриманих з датчиків тиску.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ ГОСТ 33724.1:2017. Устаткування гальмівне пневматичне для рухомого залізничного складу. Вимоги безпеки та методи випробувань. Частина 1. Повітророзподільники, крани машиніста, блоки гальмівні, гумові вироби ущільнювальні (ГОСТ 33724.1-2016, IDT). 52 С.
2. Vodiannikov, Y., Svistun, S.M., Makeeva, E.G. Methodology of braking efficiency recalculation of a car on braking efficiency of a train. Railway transport of Ukraine. 2014. Iss. 2. P. 27–37.
3. Vodiannikov, Y., Safronov, A.M., Svistun, S.M., Makeeva, E.G. Effect of the brake cylinder filling time with compressed air on the braking efficiency of a passenger car. Railway transport of Ukraine. 2014. № 5. P. 3–8.
4. Vodyannikov, Y.Y., Sheleiko, T.V., Makeeva, E.G. Inertial force at braking of a passenger car. Railway transport of Ukraine. 2014. № 4. P. 3–8.
5. Водяников Ю.Я., Павлов С.А., Можейко А.Е., Донченко Д.А. Облік перехідних процесів гальмування пасажирських вагонів із колодковими гальмами. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2013. № 9. С. 63–70.
6. Safronov, A.M., Vodyannikov, Y.Y.A., Makeeva, E.G. Brake efficiency of freight wagon: the methodology of calculation and experimental studies using mathematical models and computer simulations: a monograph. Kremenchuk: DP «UkrNIIV». 2018. 173 p.
7. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V., Dižo J., Blatnický M. Analysis of asymmetric wear of brake pads on freight wagons despite full contact between pad surface and wheel. *Symmetry*. 2024. Vol. 16 (3). P. 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym16030346>
8. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V., Dižo J. Prediction of residual wear resources of composite brake pads of a modernized brake system of freight wagons. *Vehicles*. 2024. Vol. 6 (4). P. 1975–1994. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6040097>
9. Nedeliaková E., Valla M., Masár M. Modernization of railway wagons for customer satisfaction and safety. *Vehicles*. 2024. Vol. 6 (1). P. 374–383. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6010015>
10. Inagamov S., Djabbarov Sh., Abdullaev B., Ruzmetov Y., Inoyatov K., Hurmatov Y. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 401. P. 05036. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340105036>

11. Budati S., Leman Z., Sulaiman M., Hanim M.A., Ghazali M. An investigation into the physical, mechanical, tribology, thermal and durability performance of commercial brake material for rail transportation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J*. 2023. Vol. 237 (8). P. 1620–1631. DOI: <https://doi.org/10.1177/13506501231151719>

12. Sawczuk W., Merksiz-Guranowska A., Rilo Cañas A. Assessment of disc brake vibration in rail vehicle operation on the basis of brake stand. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2021. Vol. 23 (2). P. 221–230. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2021.2.2>

13. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M., Zinchenko D. Intelligent locomotive decision support system structure development and operation quality assessment. IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239–243. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559487>

14. Боряк К.Ф., Лимаренко О.М., Перетяка Н.О. Особливості випробування на міцність авторегуляторів гальмівного обладнання пасажирських вагонів. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2020. 1(16). С. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2020-1-16-20-27>

O.V. Fomin

Department of «Wagons and wagon management», Kyiv Institute of Railway Transport, 19 M. Ogienko St., Kyiv, Ukraine, 03049

Tel: 067-836-59-07, E-mail: fomin_ov@gsuite.duit.edu.ua

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

V. M. Ishchenko

Department of «Wagons and wagon management», Kyiv Institute of Railway Transport, 19 M. Ogienko St., Kyiv, Ukraine, 03049

Tel: 067-836-59-07, E-mail: ischenko_vm@gsuite.duit.edu.ua

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

V.V. Obukhovsky

Department of «Wagons and wagon management», Kyiv Institute of Railway Transport, 19 M. Ogienko St., Kyiv, Ukraine, 03049

Tel: 096-91-93-333, E-mail: obyhovskuy_vv@gsuite.duit.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0922-7861>

D.A. Turovets

Department of «Wagons and wagon management», Kyiv Institute of Railway Transport, 19 M. Ogienko St., Kyiv, Ukraine, 03049

Tel: 093-988-38-90, E-mail: turovecd1520mm@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2405-4065>

BENCH TESTS OF BRAKE AIR DISTRIBUTORS OF RAILWAY ROLLING STOCK UNDER THE INFLUENCE OF LIMIT TEMPERATURE VALUES

Today, Ukraine is facing an urgent issue of producing its own air distributors for passenger and freight rolling stock and some types of locomotives. When putting brake air distributors for passenger and freight rolling stock into production, one of the key stages is testing under the influence of critically low and critically high temperatures (-50 °C and +50 °C). Today, in Ukraine, there is only one stand for climatic testing of only one model of freight air distributors, while there is no climatic stand for testing brake air distributors for passenger rolling stock. A solution to this problem is proposed in the form of separate use of a climatic chamber and stands for testing brake air

distributors for passenger and freight rolling stock.

The paper describes theoretical and practical methods of testing air distributors of passenger and freight rolling stock under the influence of critically low and critically high temperatures with the possibility of using standard stands for testing brake air distributors separately from the climatic chamber with monitoring of the temperature of the room in which these stands are installed and the temperatures of experimental brake air distributors that have been exposed in the climatic chamber under the influence of critically low and critically high temperatures.

Keywords: testing, influence of extreme temperatures, brake air distributors, technical condition, traffic safety.

REFERENCES

1. DSTU HOST 33724.1:2017 Ustatkuvannya hal'mivne pnevmatychne dlya rukhomoho zaliznychnoho skladu. Vymohy bezpeky ta metody vyprobuvan'. Chastyna 1. Povitrorozpodil'nyky, krany mashynista, bloky hal'mivni, humovi vyroby ushchil'nyuval'ni (HOST 33724.1-2016, IDT). 52 p.
2. Vodiannikov, Y., Svistun, S.M. & Makeeva, E.G. (2014). Methodology of braking efficiency recalculation of a car on braking efficiency of a train. *Railway transport of Ukraine*, 2, 27–37.
3. Vodiannikov, Y.Y., Safronov, A.M., Svistun, S.M. & Makeeva, E.G. (2014). Effect of the brake cylinder filling time with compressed air on the braking efficiency of a passenger car. *Railway transport of Ukraine*, 5, 3–8.
4. Vodyannikov, Y.Y., Sheleiko, T.V. & Makeeva, E.G. (2014). Inertial force at braking of a passenger car. *Railway transport of Ukraine*, 4, 3–8.
5. Vodyannikov, YU.YA., Pavlov, S.A., Mozheyko, A.E. & Donchenko, D.A. (2013). Oblik perekhidnykh protsesiv hal'muvannya pasazhyrs'kykh vahoniv iz kolodkovymy hal'mamy. *Zbirnyk naukovykh prats SE «UkrNDIV» "Reikovy rukhomiy sklad" - Collection of scientific papers of SE «UkrNDIV» Railroad rolling stock*, 9, 63-70. Kremenichuk: SE «UkrNDIV».
6. Safronov, A.M., Vodyannikov, Y.YA. & Makeeva, E.G. (2018) *Brake efficiency of freight vago-new. The methodology of calculation and experimental studies using mathematical models and computer simulations: a monograph*. Kremenichuk: DP «UkrNIIV», 173.
7. Panchenko, S., Gerlici, J., Lovska, A., Ravlyuk, V., Dižo, J. & Blatnický, M. (2024) Analysis of Asymmetric Wear of Brake Pads on Freight Wagons despite Full Contact between Pad Surface and Wheel. *Symmetry*, 16 (3), 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym16030346>
8. Panchenko, S., Gerlici, J., Lovska, A., Ravlyuk, V. & Dižo, J. (2024) Prediction of Residual Wear Resources of Composite Brake Pads of a Modernized Brake System of Freight Wagons. *Vehicles*, 6 (4), 1975–1994. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6040097>
9. Nedeliaková, E., Valla, M., Masár, M. (2024) Modernization of Railway Wagons for Customer Satisfaction and Safety. *Vehicles*, 6, (1), 374–383. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6010015>
10. Inagamov, S., Djabbarov, Sh., Abdullaev, B., Ruzmetov, Y. & Inoyatov, K., Hurmatov Y. (2023) *E3S Web of Conferences*, 401, 05036. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340105036>
11. Budati, S., Leman, Z., Sulaiman, M., Hanim, M.A., Ghazali, M. (2023) An investigation into the physical, mechanical, tribology, thermal and durability performance of commercial brake material for rail transportation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J*, 237 (8), 1620–1631. DOI: <https://doi.org/10.1177/13506501231151719>
12. Sawczuk, W., Merksiz-Guranowska, A., Rilo Cañás A. (2021) Assessment of disc brake vibration in rail vehicle operation on the basis of brake stand. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 23 (2), 221–230. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2021.2.2>
13. Gorobchenko, O., Fomin, O., Gritsuk, I., Saravas, V., Grytsuk, Y., Bulgakov, M., Volodarets, M. & Zinchenko, D. (2018) Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine, 239–243. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559487>
14. Boryak, K.F., Lymarenko, O.M. & Peretyaka, N.O. (2020) Osoblyvosti vyprobuвання na mitsnist' avtorehulyatoriv hal'mivnoho obladnannya pasazhyrs'kykh vahoniv. *Zbirnyk naukovykh prats' Odes'koyi derzhavnoyi akademiyi tekhnichnoho rehulyuvannya ta yakosti*, 1(16), 20–27. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2020-1-16-20-27>

В. Г. Равлюк

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 095-444-59-74, E-mail: ravvg@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

А. О. Ловська

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 066-338-19-46, E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

Д. І. Скуріхін

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 093-847-46-78, E-mail: skurikhin@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3746-5157>

А. В. Рибін

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 066-705-32-61, E-mail: rybinandrey@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4430-8018>

М. Г. Равлюк

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 068-064-52-19, E-mail: ravmg@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6021-660X>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЛЬМОВОЇ СИСТЕМИ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА НА БЕЗПЕКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

У статті висвітлено аналіз роботи гальмової системи вантажних вагонів, зокрема взаємодії гальмових колодок із поверхнею кочення коліс. Розглянуто конструкцію тріангеля, маятникових підвісок та важільної передачі, які забезпечують притискання та відведення колодок під час гальмування. Виявлено, що нерівномірний розподіл сили натиснення колодок на колеса зумовлений конструктивними особливостями гальмової системи, зокрема розташуванням отвору для вертикального важеля в розпірці тріангеля. Це призводить до утворення шкідливого крутного моменту, який спричиняє нахил колодок і нерівномірний їх знос.

© Равлюк В.Г., Ловська А.О., Скуріхін Д.І., Рибін А.В., Равлюк М.Г., 2025

Проведено комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження, які підтвердили, що триангель у зібраному стані є врівноваженим, але під дією зовнішніх сил може порушуватися його рівновага. Досліджено процеси кінематики колодок на маятникових підвісках, що забезпечує їх відведення від колеса під час попуску гальм. Встановлено, що через конструктивні особливості утворюються нерівномірні зазори між колодками та колесами, що призводить до часткового тертя та зносу верхніх кінців колодок у режимі тяги та вибігу вантажного поїзда.

Запропоновано класифікацію факторів, які впливають на розподіл сили натиснення колодок, включаючи конструктивні, технічні, динамічні, зовнішні, екологічні та технологічні аспекти. На підставі аналізу цих факторів обґрунтовано необхідність розробки комплексного підходу для оптимізації гальмової системи, що дозволить забезпечити рівномірний розподіл сили натиснення, знизити знос елементів гальмової системи та підвищити ефективність і безпеку гальмування вантажного рухомого складу.

Ключові слова: безпека руху, гальмова система, кінематика колодок, триангель, гальмові колодки, транспортна механіка.

Вступ та постановка проблеми. Підвищення ефективності експлуатації рухомого складу вимагає впровадження інноваційних підходів, спрямованих на створення якісно нових конструкцій вагонів, які характеризуються високою надійністю, економічністю в експлуатації та технічному утриманні [1–5]. Це є ключовим елементом для забезпечення конкурентоспроможності залізничного транспорту в умовах сучасних викликів, пов'язаних із зростанням вимог до якості перевезень, безпеки руху та екологічності.

Процес гальмування вантажного поїзда – це явище, яке описується із використанням мультидисциплінарного підходу та характеризує взаємодію різноманітних вузлів гальмової системи, спрямовану на оптимальне уповільнення та зупинку рухомого складу. Ефективність гальмових систем і їх надійна експлуатація мають вирішальне значення для зниження ризиків під час транспортування вантажів, враховуючи високі вимоги до безпеки та стабільності руху на залізничному транспорті [6]. Тому, сучасні тенденції в галузі залізничного транспорту зумовлюють посилення вимог до систем гальмування, підкреслюючи необхідність їх постійної модернізації та вдосконалення.

Недосконалість конструкції гальмової важільної передачі (ГВП) візків вантажних вагонів має значний вплив на ефективність процесу гальмування. Під час руху поїзда в режимі тяги та вибігу гальмові колодки нахиляються і торкаються своїми верхніми кінцями до поверхонь кочення коліс (рис. 1, а). За таких умов створюються небажане тертя, що спричиняє ненормативний знос колодок (рис. 1, б). Це не тільки призводить до збільшення експлуатаційних витрат на утримання вагонів, але й до збільшення опору руху поїзда, який споживає додаткові енергоресурси. Крім того, відсутність зазору у верхній частині між колодкою й колесом призводить до зменшення робочої площі колодок, а це знижує ефективність гальмування поїзда. За такої умови відбувається підвищення температури поверхонь триботехнічних пар «гальмова колодка – колесо», а це спричиняє появу високотемпературних пошкоджень коліс (рис. 1, в). Такі пошкодження можуть включати мікротріщини, вищербини та зсуви металу, які значно скорочують термін служби колісних пар і збільшують витрати на їх обслуговування та заміну.

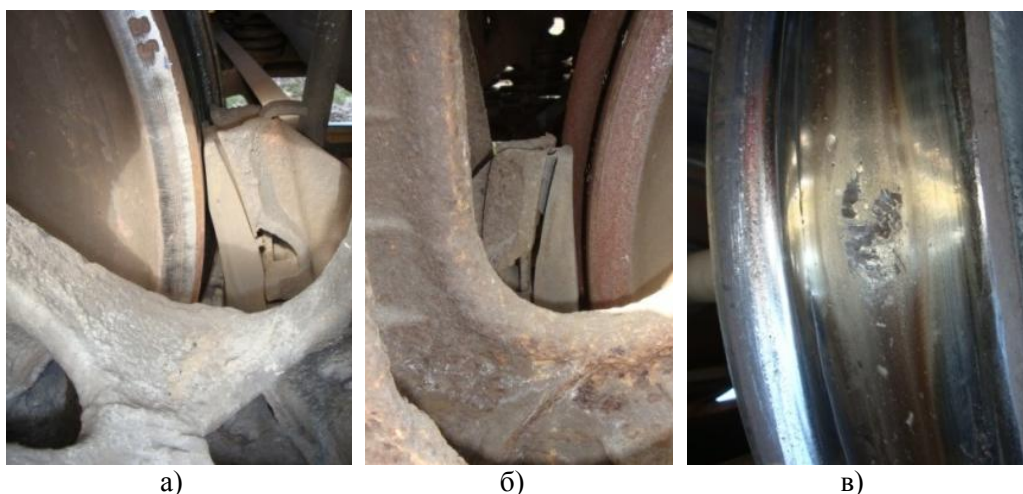


Рис. 1. Вигляд непрацездатних елементів триботехнічного вузла «гальмова колодка – колесо» в експлуатації через конструкційні особливості ГВП

(а) – відсутній зазор між колодкою і колесом під час попущених гальм;
(б) – клинодуальний знос колодки; (в) – високотемпературні пошкодження на поверхні колеса

Отже, існує необхідність у модернізації конструкції важільної передачі гальмових систем вантажних вагонів. Це забезпечить підвищення рівня безпеки руху, зменшення експлуатаційних витрат та оптимізацію функціонування залізничної інфраструктури. Впровадження інноваційних рішень у цій галузі є ключовим фактором для забезпечення ефективності та конкурентоспроможності залізничного транспорту.

Аналіз існуючих досліджень. У багатьох наукових дослідженнях, які зосереджені на застосуванні композиційних гальмових колодок в рухомому складі, наголошено акцент переважно на аспекти, пов'язані з безпекою руху та впливом їх на навколишнє середовище. З метою зниження експлуатаційних витрат у залізничній галузі, гальмові колодки часто сприймаються як товар, що закуповується за мінімальною ціною при їх задовільній роботі [7]. Проте, такий підхід може не забезпечувати найменші експлуатаційні витрати в довгостроковій перспективі. Вибір матеріалу для фрикційних компонентів колодок має безпосередній вплив на тривалість нормативного строку служби колісної пари, заміна якої, як правило, значно перевищує вартість елементів ГВП вагона. Таким чином, економічну вигоду від низької початкової ціни колодок можна вважати не обґрунтованою через підвищені витрати на подальше технічне обслуговування та ремонт рухомого складу.

У науковій роботі [8], базуючись на аналізі опублікованих матеріалів, авторами наведено порівняльні показники якості та експлуатаційні характеристики чавунних гальмових колодок, виготовлених методом лиття та композиційних колодок. У роботі виділено декілька недоліків застосування композиційних колодок, зокрема їх низька теплопровідність, яка спричиняє термічні пошкодження на поверхнях кочення коліс рухомого складу. Це в свою чергу призводить до зростання експлуатаційних витрат, які пов'язані з ремонтом колісних пар. Інший значний недолік полягає у відсутності в нормативних документах на виготовлення хімічного складу речовин, які входять до композиційної суміші. А це порушує чинне законодавство України і ускладнює контроль за цими речовинами. Однак, автори не згадують про витрати, спричинені ненормативним зносом композиційних гальмових колодок, що

виникає в умовах експлуатації вантажного рухомого складу без активного гальмування.

У праці [9] проведено аналіз різноманітних гальмових систем, зокрема тих, які використовуються у триботехнічних парах «колодка – колесо». Авторами наведено переваги дискових гальм і доцільність їх застосування зі звичайними триботехнічними парами. Основною проблемою композиційних гальмових колодок, які застосовуються у вантажних вагонах, є їх негативний вплив на поверхню кочення колісних пар. У зв'язку з низькою теплопровідністю колодок в зоні контакту з колесами виникають високі температури, що спричиняє утворення різноманітних дефектів на поверхні коліс.

У дослідженні [10] запропоновано науковий підхід для оцінки результатів натурних досліджень ефективності гальмової системи вантажних вагонів. Автор розглядає процеси гальмування з використанням методів комп'ютерного моделювання, пропонуючи застосування інформаційної моделі у вигляді диференціального рівняння руху вагона. Сформовані математичні моделі дозволяють визначати характеристики гальмової системи та оцінювати гальмову ефективність поїзда. Однак, у дослідженні не враховано вплив коефіцієнта клинодуальності композиційних колодок, що є суттєвим фактором для оцінки дійсного гальмового шляху вантажного поїзда. Крім того, конструктивні особливості гальмової передачі, зокрема нерівномірний розподіл сили натиснення колодок на колеса, можуть призводити до зниження ефективності гальмування та збільшення зносу елементів гальмової системи. Цей недолік потребує подальшого дослідження для удосконалення методів розрахунку та підвищення надійності гальмової системи вантажних вагонів.

Аналіз науково-технічних та науково-популярних джерел інформації про працездатність ГВП вагонів підтверджує, що існуючі конструкції гальмових систем візків, описані в працях [11–13], не вирішують повністю проблеми ненормативного зносу колодок під час попусків гальм. Встановлено, що розробники цих систем зосереджувалися на створенні допоміжних пристроїв для протидії зусиллям, які впливають на положення колодок, виходячи з кінетостатичного аналізу механізму ГВП [14]. Це вказує на те, що необхідно застосовувати комплексний підхід під час проєктування та оптимізації гальмових систем. При цьому слід враховувати динамічні та реальні експлуатаційні аспекти їх функціонування, а також зосередити увагу на зусиллях, які виникають у елементах триангельних важільних передач візків під час гальмування.

У науковій праці [15] здійснено аналіз експлуатаційних показників якості чавунних та композиційних гальмових колодок, які використовуються у пасажирському та вантажному рухомому складі. Авторами розглянуто ряд негативних аспектів від застосування композиційних колодок, зокрема їх вплив на навколишнє середовище. Окрім того, описано процеси, які призводять до пошкоджень коліс транспортних засобів, що обумовлено механічними властивостями матеріалів з яких виготовляють колодки. Це дослідження спрямоване на виявлення причинно-наслідкових зв'язків між різними типами гальмових колодок. Наведено вплив особливостей колодок на екологічне забруднення, підвищення довговічності й безпеку залізничного транспорту.

У дослідженні [16] вказано, що більшість міжнародних науковців фокусується на вирішенні проблемних питань стосовно дискових гальм. Вони аналізують міцність їх деталей, контролюють експлуатаційні параметри, визначають температурний режим окремих триботехнічних вузлів гальмових систем рухомого складу. Це свідчить про глобальну тенденцію до оптимізації гальмових систем з метою підви-

щення їх ефективності та надійності, зниження зносу і поліпшення загальних експлуатаційних характеристик рухомого складу.

У дослідженнях [17, 18], зосереджено увагу на застосуванні сучасних матеріалів для розробки нових конструкцій триботехнічних систем. Доведено ефективність цих інновацій у контексті сучасного рухомого складу. Завдяки таким нововведенням можна досягнути збільшення швидкості руху та осьового навантаження, а також підвищення ефективності гальмової системи рухомого складу. Однак, у наведених дослідженнях не приділялося належної уваги проблемам, пов'язаних з ненормативним зносом гальмових колодок у вантажному рухомому складі. Тому доцільно було б виконати аналіз факторів, що впливають на працездатність конструкцій триботехнічних систем з метою підвищення їх зносостійкості та врахування сучасних матеріалів за умов їх виготовлення.

Наведений літературний аналіз [7–18] дозволяє сформулювати висновок про актуальність проблеми ненормативного зносу колодок, що використовуються у гальмових системах візків вагонів. Це питання є важливим для забезпечення надійності та безпеки залізничних перевезень і зумовлює необхідність його подальшого дослідження та розвитку.

Метою роботи є дослідження впливу конструктивних параметрів гальмової системи вантажного вагона на безпеку експлуатації залізничного рухомого складу.

Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

- дослідити процес утворення ненормативного зносу колодок у ГВП і встановити причини його виникнення;
- проаналізувати систему маятникового підвішування триангеля й визначити нормативні величини зазорів між колодкою і колесом під час попуску гальм;
- виконати аналіз факторів, що впливають на розподіл сили натиску між гальмовими колодками та колесами.

Матеріали та результати досліджень. У парку вантажних вагонів на мережі залізниць застосовуються типові ГВП, які включають триангелі з додатковими конструктивними елементами, врівноважено закріплені на бокових рамах візків. Конструктивне виконання ГВП з використанням триангелів забезпечує рівномірне відведення гальмових колодок від поверхонь кочення коліс у стані попущеного гальма, а також їх стабільне утримання на нормативній відстані під час руху поїзда. Це є ключовим фактором для забезпечення довговічної та безвідмовної роботи гальмових пристроїв, а також для дотримання нормативних показників зносу елементів ГВП. Крім того, така конструкція сприяє зниженню динамічних навантажень на елементи системи, що позитивно впливає на їх ресурс експлуатації. Оптимізація роботи ГВП також дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування та ремонт, що є важливим аспектом для підвищення економічної ефективності залізничних перевезень [19, 20].

Важливим елементом типової ГВП є триангелі, які забезпечують не лише стабільність, а й функціональність системи. У типовій ГВП до цапф триангелів, розташованих на його кінцях, жорстко приєднані башмаки з колодками. Ця жорстка конструкція шарнірно підвішується на дві маятникові підвіски у візку. За умови відхилення яких гравітаційними силами забезпечується підведення й притиснення колодок до поверхні кочення коліс для гальмування й відведення колодок від коліс під час попуску гальм. У такому стані у візку триангелі шарнірно спираються на маятникові підвіски, у рівновазі утримуються горизонтально й забезпечують необхідні зазори між гальмовими колодками та колесами. З приєднанням вертикального важеля до отвору у розпірці триангеля рівновага порушується, триангель нахиляється

до спирання верхніми кінцями колодок на поверхні кочення коліс. Схиляння колодки до спирання верхнім кінцем на колесо зумовлено наявністю відстані l_1 . Під дією сили $P+P_{дин}$ на плече l_1 з'являється шкідливо діючий крутний момент $M_{кр}$ (рис. 2) [21].

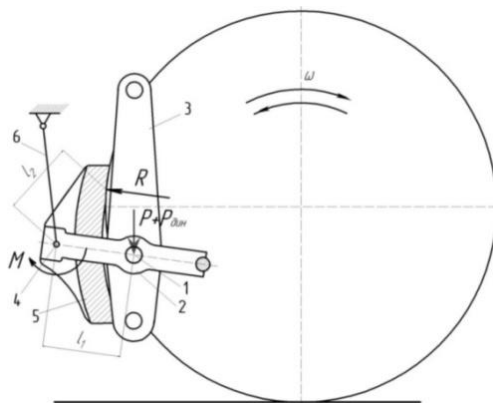


Рис. 2. Розрахункова схема колодки під час її взаємодії з колесом

1 – шарнір з'єднання вертикального важеля з розпівкою триангеля; 2 – розпівка триангеля; 3 – вертикальний важіль; 4 – шарнір підвішування башмака; 5 – гальмова колодка; 6 – маятникова підвіска; R – сила реакції від спирання колодки на колесо; l_1 – відстань від центра отвору у розпівці триангеля до шарніра підвішування башмака; l_2 – плече дії сили реакції R до центра підвішування башмака на маятниковій підвісці

Причиною нахилу колодок до спирання на поверхні кочення колісних пар у візку стає те, що отвір для приєднання вертикального важеля у розпівках триангелів розташований на боці струни. Відстань l_1 від центра отвору у розпівці до умовної осі підвішування триангеля на маятникових підвісках утворює шкідливо діючий крутний момент $M_{кр}$ (рис. 2), який визначається за такою формулою:

$$M_{кр} = (P + P_{дин}) \cdot l_1, \quad (1)$$

де $P+P_{дин}$ – сила, зумовлена навантаженням триангеля вагою вертикального важеля і приєднаних до нього деталей у попущеному стані гальма, Н.

Залежність (1) вказує на те, що шкідливо діючий крутний момент $M_{кр}$ утворюється наявністю відстані l_1 від центра отвору у розпівці триангеля до умовної осі підвішування триангеля на маятникових підвісках.

На врівноважений триангель діє сила $P+P_{дин}$ від ваги приєданого до його розпівки вертикального важеля з верхньою тягою й нижньою затяжкою вертикальних важелів. Під дією сил $P+P_{дин}$ на плече l_1 з'являється шкідливо діючий крутний момент сил $M_{кр}$, який нахилє триангель і колодки спираються верхнім кінцем на колеса [22]. Водночас триангель врівноважується силою реакції R , яка створюється від спирання пари гальмових колодок на поверхні кочення колісної пари.

На підставі схеми дії сил складемо рівняння моментів відносно шарнірів підвішування триангеля, маючи на увазі, що сила $P+P_{дин}$ діє на розпівку триангеля в його середній частині й розподіляється на дві гальмові колодки колісної пари

$$(P + P_{\text{дин}}) \cdot l_1 = 2R \cdot l_2, \quad (2)$$

звідси

$$R = \frac{(P + P_{\text{дин}}) \cdot l_1}{2l_2}, \quad (3)$$

де l_2 – плече дії реакції R до центра підвішування гальмової колодки, мм.

Із рівняння (2) видно, що сила $P + P_{\text{дин}}$ передається на колодки таким чином, що виникає нахил триангеля з притисканням верхніх кінців колодок до поверхонь кочення колісних пар. Через це відбувається стирання верхніх кінців колодок на довжині від 3 до 140 мм за попущених гальм. Це й спричиняє перерозподіл питомих сил натиснення колодки на колесо під час гальмування. На верхній частині колодки діють значно більші контактні натиснення, і знос її верхньої частини збільшується, що призводить до ненормативного зносу композиційних гальмових колодок [19].

Для визначення сил, які спричиняють нахил колодок проведено комп'ютерне моделювання врівноваженості одного триангеля (рис. 3). Триангель 1 розглянуто у зібраному стані з гальмовими колодками 2 на маятникових підвісках 3 [19, 23].

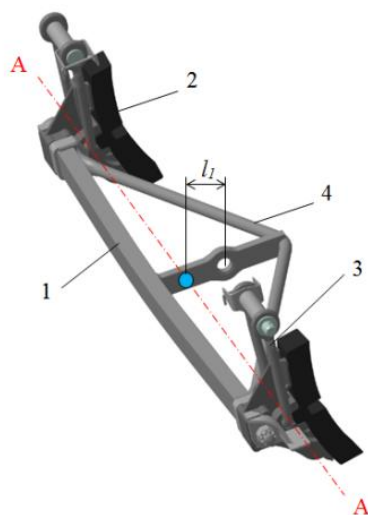


Рис. 3. Типовий триангель у зібраному стані

1 – швелерна балка триангеля; 2 – гальмова колодка; 3 – маятникова підвіска;
4 – струна; А-А умовна вісь підвішування

Теоретичну перевірку виконано математичним порівнянням суми моментів, що утворюються власною вагою деталей триангеля, розташованих на протилежних від осі (А-А) частинах. Водночас перевірялася й порівнювалася сума моментів на боці як балки триангеля ΣM_b , так і на боці струни ΣM_c .

У разі невірності конструкції триангеля сума моментів від ваги деталей на боці балки триангеля буде відрізняться від суми моментів на боці струни, тобто

$$\Sigma M_o \neq \Sigma M_c, \quad (4)$$

де ΣM_o – сума моментів від ваги частин триангеля, розташованих на боці балки триангеля відносно умовної осі (А-А) його підвішування на маятникових підвісках;

ΣM_c – сума моментів від ваги частин триангеля, розташованих на боці струни відносно осі (А-А).

Комп'ютерне моделювання й розрахунки, виконані за такої умови, показали, що триангель у зібраному стані з гальмовими колодками має врівноважену конструкцію відносно умовної осі (А-А).

Для підтвердження виконання умови врівноваженості було обстежено 348 триангелів, які встановлювались на маятникові підвіски візків після їх ремонту у вантажному вагонному депо регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця». Водночас визначалася можливість нахилу триангеля прикладеною силою на боці струни або на боці швелерної балки триангеля. В усіх перевірених триангелях не зафіксовано випадків перевішування й нахилу триангеля ні у бік балки, ні у бік струни. Така позитивна властивість конструкції триангеля дає змогу утримуватися йому на маятникових підвісках таким чином, що гальмові колодки не спираються ні верхніми, ні нижніми кінцями до поверхні кочення коліс.

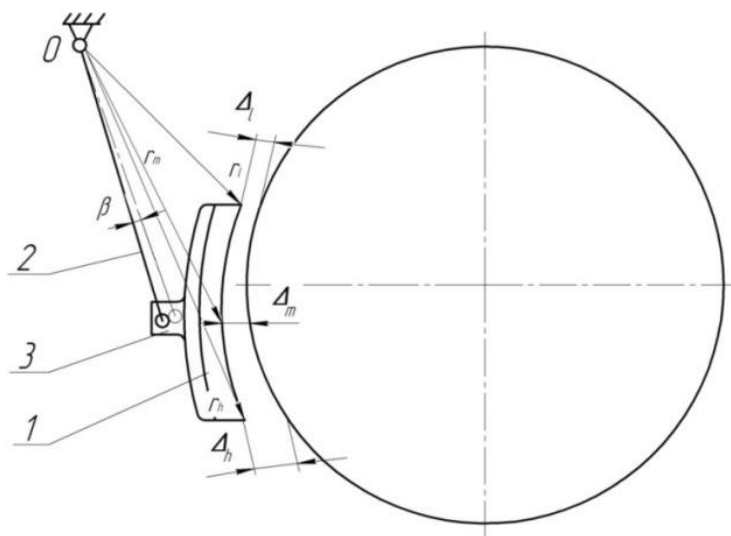


Рис. 4. Схема відведення гальмової колодки від колеса на маятниковій підвісці

1 – гальмова колодка; 2 – маятникова підвіска; 3 – башмак

Маятникове підвішування забезпечує коливальну рухомість гальмових колодок за рахунок повертання підвіски навколо її верхнього шарніра, закріпленого у спеціальному кронштейні бокової рами візка. Підвішування й утримування всієї ГВП у візку з колодками здійснюється на чотирьох маятникових підвісках. Верхні шарніри кожної маятничової підвіски приєднуються до кронштейнів бокових рам візка. Відхилення кожної маятничової підвіски в один або інший бік відносно верхнього шарніра забезпечує віддалення або наближення гальмової колодки відносно повер-

хні кочення колеса [24, 25].

Виконаний аналіз кінематики гальмової колодки, яка відходить від поверхні кочення колеса під час попуску гальм, показав, що маятникове підвішування колодок забезпечує не тільки поступальний рух колодки від колеса, але й обертальний щодо центра O (рис. 4). Якщо маятникова підвіска відхиляється на кут β , верхній кінець колодки, рухаючись по дузі малого радіуса r_l , відходить від поверхні кочення колеса на відстань Δ_l , а нижній – по дузі значно більшого радіуса r_h буде відходити від поверхні кочення колеса на значно більшу відстань Δ_h . Відстань Δ_m від колеса до колодки у середній частині буде дорівнювати середньому значенню радіуса r_m .

За малих величин кута відхилення маятничової підвіски α , що спостерігається в реальних умовах, величини таких проміжків можуть апроксимуватися з достатньою для практичних розрахунків точністю за такими аналітичними виразами:

– для верхнього кінця колодки

$$\Delta_l = r_l \cdot \sin \beta; \quad (5)$$

– для середньої частини колодки

$$\Delta_m = r_m \cdot \sin \beta; \quad (6)$$

– для нижнього кінця колодки

$$\Delta_h = r_h \cdot \sin \beta, \quad (7)$$

де r_l , r_m і r_h – радіуси траєкторій, якими здійснюється відхід відповідно верхньої, середньої й нижньої частин гальмової колодки стосовно твірної поверхні кочення колеса;

β – кут відхилення маятничової підвіски під час попуску гальма.

Наведене вище вказує на закономірність утворення нерівномірних зазорів між поверхнями тертя колодок і поверхнями кочення коліс за попущених гальм. Це зумовлено конструкцією вузла підвішування гальмових колодок на маятникових підвісках у важільній передачі візка [23].

Малий зазор Δ_l , що утворюється між верхнім кінцем колодки і колесом, та інтенсивні вимушені власні коливання цих частин візка вагона під час руху на великих швидкостях зумовлюють часткові торкання верхнього кінця колодки до поверхні кочення колеса, яке швидко обертається. Виникають часткові торкання різного характеру за тривалістю й силою притиснення верхнього кінця колодки до колеса. Від цього утворюється місцева стертість верхнього кінця колодки на робочій поверхні.

Під час гальмувань ця уже частково стерта верхня частина колодки не може притискатися до поверхні кочення колеса. Вона навпаки відходить від колеса. Через це під час гальмувань натиснення колодки на колесо і фрикційна їх взаємодія порушується. На верхній частині колодки інтенсивно зростає фрикційне стирання її робочої маси й різко підвищується температура від тертя, що негативно впливає на загальну ефективність гальмування та створює умови для високотемпературних пошкоджень поверхні кочення колеса [25].

Результати розрахунків величин зазорів, на які гальмова колодка під час попуску гальма віддаляється від твірної поверхні кочення колеса наведено на рис. 5.

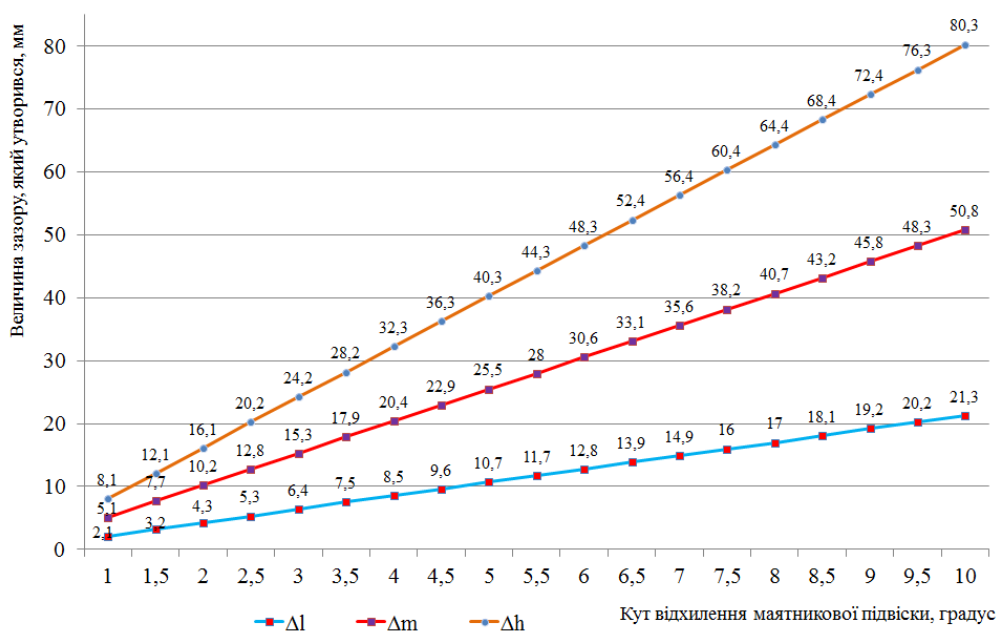


Рис. 5. Залежність величини зазору між колодкою та колесом від кута відхилення маятникової підвіски

Проаналізувавши графік, наведений на рис. 5, можна зробити висновок, що відрегулювати нормативний зазор між гальмовою колодкою та колесом у процесі експлуатації на тривалий час практично неможливо. Це пояснюється значним зносом кінтостатичних вузлів з'єднання елементів ГВП вагона [19, 24]. Внаслідок цього відбувається поступове порушення геометрії контакту, що негативно впливає на рівномірність гальмування та підвищує ризик передчасного виходу з ладу окремих елементів гальмової системи.

Дослідження закономірностей розташування гальмових колодок відносно поверхні кочення колісних пар вантажних вагонів засвідчили, що колодки можуть частково здійснювати шкідливе тертя по поверхнях кочення коліс навіть у режимі руху без гальмування. Це явище спричинене конструктивними особливостями ГВП, що призводить до нерівномірного розподілу сили натиснення колодок на колеса, спричиняє клинодуальний знос і зумовлює розвиток інших експлуатаційних факторів.

Таким чином, рівномірний розподіл сили натиснення композиційних гальмових колодок на колеса є ключовим аспектом ефективності та безпеки гальмової системи вагонів [26]. Він залежить від комплексу факторів, які можна класифікувати за їх природою: конструктивні, технічні, експлуатаційні, зовнішні, екологічні та технологічні. Детальний аналіз цих факторів дозволяє виявити основні причини нерівномірного розподілу сили натиснення та запропонувати шляхи їх усунення (рис. 6).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

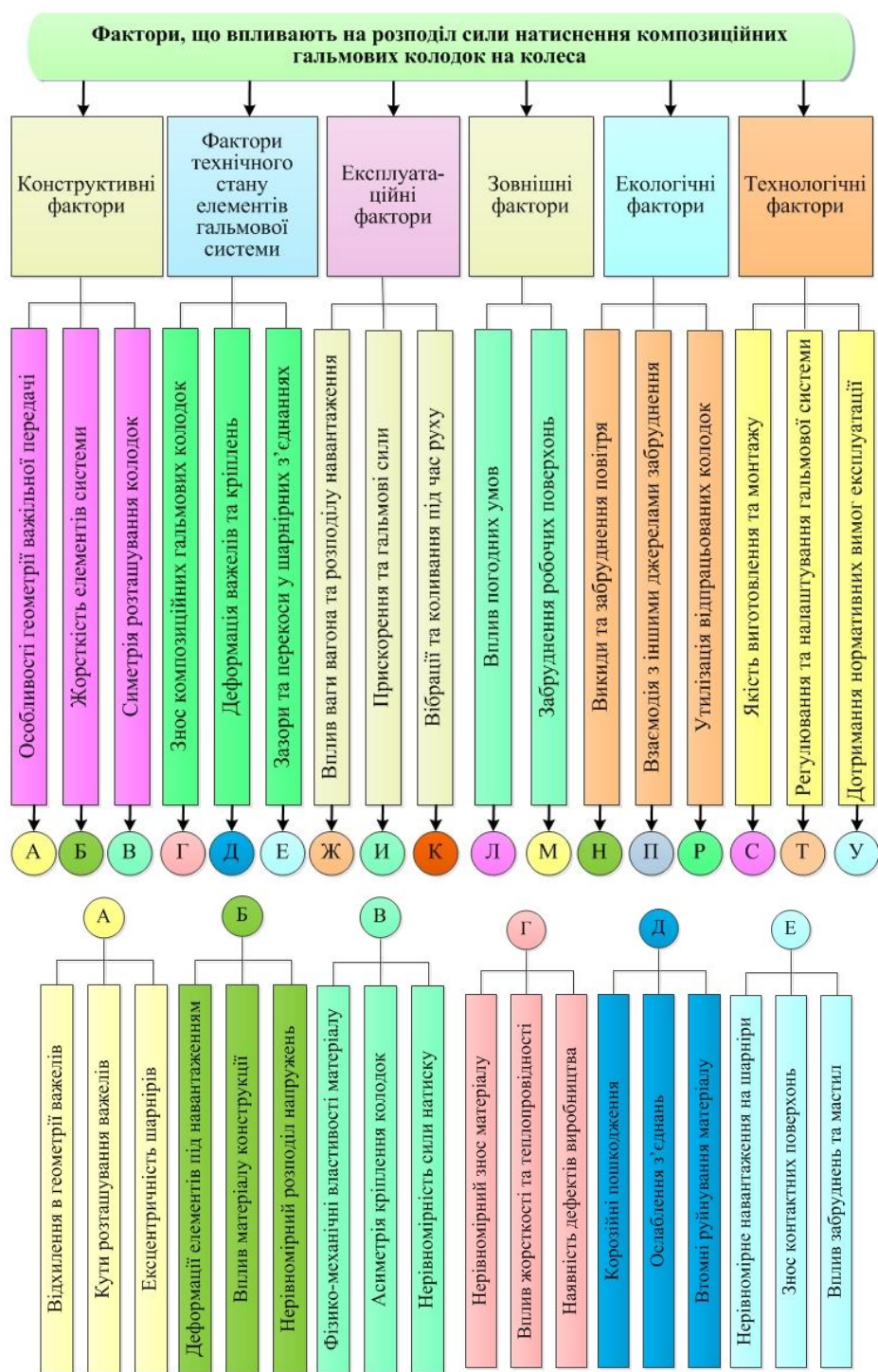


Рис. 6. Ієрархічна схема систематизації факторів, що визначають розподіл сили натиснення композиційних гальмових колодок на колеса

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

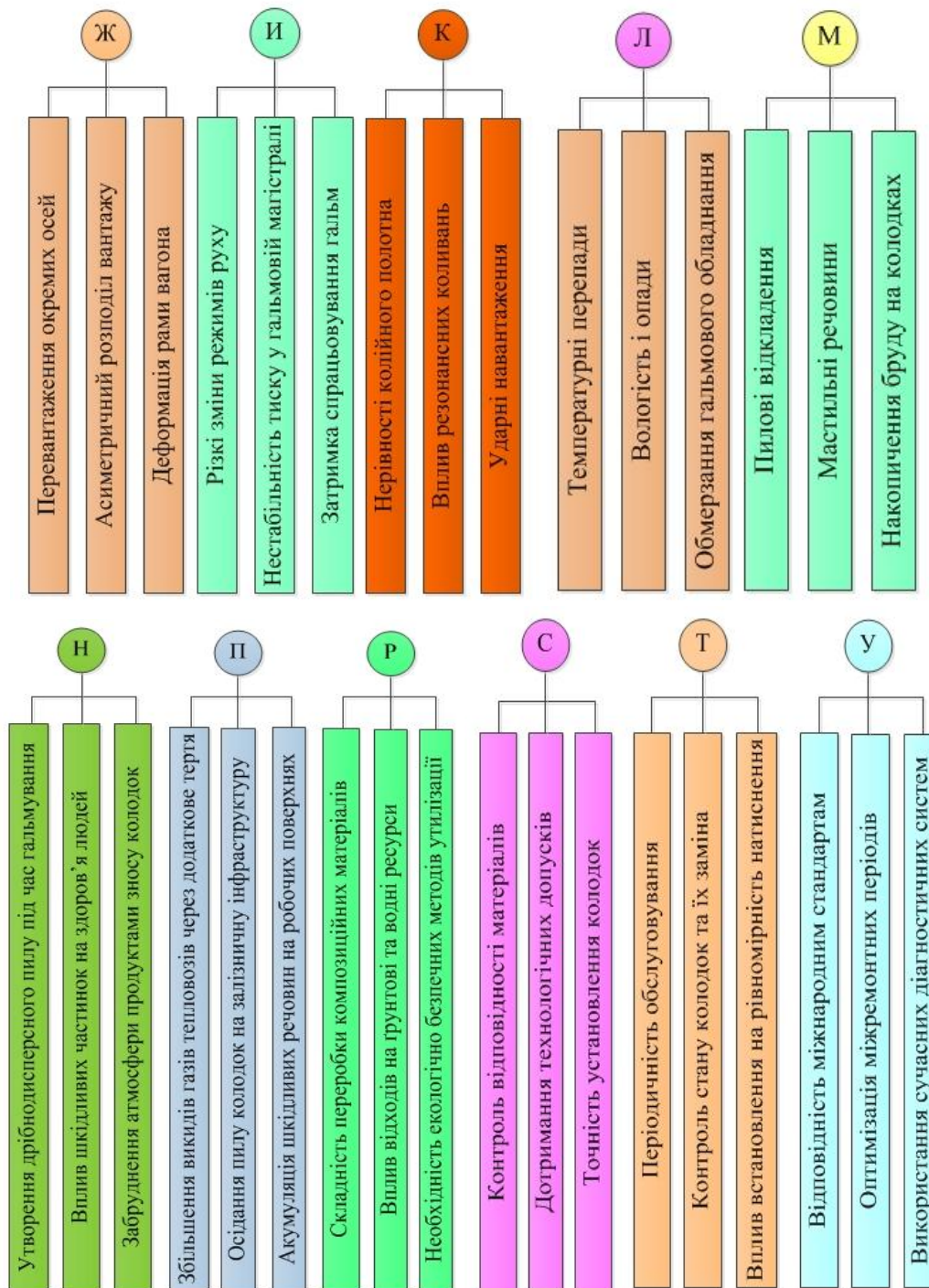


Рис. 6 (продовження). Ієрархічна схема систематизації факторів, що визначають розподіл сили натиснення композиційних гальмових колодок на колеса

Конструктивні фактори пов'язані з особливостями проектування та будови гальмової системи вагона. Вони включають геометрію важільної передачі, яка визначає, як сила передається від гальмового механізму до колодок. Наприклад, якщо важільна передача має неправильний кут нахилу, це може призводити до нерівномірного розподілу сили на колодки. Жорсткість елементів системи також відіграє важливу роль: якщо матеріали важелів недостатньо жорсткі, вони можуть деформуватися під навантаженням, що призводить до втрати ефективності гальмування. Симетрія розташування колодок є ще одним ключовим фактором, якщо одна колодка розташована ближче до колеса, ніж інша, це може призводити до нерівномірного зносу та зменшення ефективності гальмування [27].

Фактори технічного стану елементів гальмової системи вагона відображають стан елементів системи під час експлуатації. Знос композиційних гальмових колодок, особливо клинодуальний є одним із найважливіших факторів. Якщо колодки зношені на 50 %, це може призводити до зменшення тертя та збільшення гальмового шляху. Деформація важелів та кріплень також впливає на роботу системи, якщо важіль деформований, це може призводити до нерівномірного передавання сили на колодки. Зазори та перекося у шарнірних з'єднаннях є однією з проблем, якщо в шарнірному з'єднанні є зазор 2 мм і більше, то це може призводити до втрати енергії та зменшення ефективності гальмування рухомого складу.

Експлуатаційні фактори пов'язані з умовами руху вагона. Вплив ваги вагона та розподілу навантаження є ключовим, якщо вагон перевантажений з одного боку, це може призводити до нерівномірного тиску на колодки. Прискорення та гальмові сили також впливають на систему, якщо вагон різко гальмує, це може призводити до перевантаження передніх за напрямком руху поїзда колодок. Вібрації та коливання під час руху є ще одним важливим фактором, якщо вагон рухається по нерівній рейковій колії, це може призводити до послаблення кріплень та зміни розподілу сили.

Зовнішні фактори пов'язані з умовами навколишнього середовища. Вплив погодних умов є одним із найважливіших, якщо на вулиці дощ, це може призводити до зменшення тертя між колодками та колесами. Забруднення робочих поверхонь також впливає на ефективність гальмування, якщо на колодках є шар пилу, це може призводити до зменшення ефективності гальмування.

Екологічні фактори стосуються впливу гальмової системи на навколишнє середовище. Викиди та забруднення повітря є одним із ключових факторів, особливо тоді, коли в ГВП не працюють пристрої рівномірного зносу і колодки під час руху поїзда торкаються верхніми кінцями об поверхні кочення коліс і зношуються клинодуально. У результаті цього, колодки виділяють шкідливі частинки пилу в повітря, а це негативно впливає як на оточуюче середовище, так на людей і тварин. Взаємодія з іншими джерелами забруднення також впливає на стан колодок, якщо вагон рухається в зоні з високим рівнем забруднення, це може призводити до прискореного зносу колодок. Утилізації відпрацьованих композиційних гальмових колодок на сьогодні не існує і вони також не підлягають відновленню для подальшої експлуатації. Тому колодки масово вивозять на міські сміттєзвалища, що суттєво їх захаращує і вони на них розкладаються сотні років, що в свою чергу призводить до забруднення навколишнього середовища.

Технологічні фактори пов'язані з процесами виготовлення та експлуатації. Якість виготовлення та монтажу є ключовим фактором, якщо композиційні гальмові колодки виготовлені з неякісних матеріалів, це може призводити до їх швидкого зносу. Регулювання та налаштування гальмової системи також впливає на її ефек-

тивність, якщо гальмова система неправильно налаштована, це може призводити до нерівномірного розподілу сили на колодки. Дотримання нормативних вимог експлуатації є ще одним важливим фактором, якщо не дотримуються нормативні вимоги, це може призводити до зниження безпеки та ефективності роботи гальмової системи.

Таким чином, для забезпечення рівномірного розподілу сили натиснення композиційних гальмових колодок необхідно враховувати всі зазначені фактори. У зв'язку з цим передбачається розроблення комплексного підходу до оптимізації сили натиснення гальмових колодок на колеса вагона з метою досягнення однакових вагових коефіцієнтів натиснення. Реалізація такого підходу сприятиме підвищенню ефективності гальмування рухомого складу, зниженню зносу елементів ГВП та підвищенню рівня безпеки експлуатації вагонів.

Висновки.

1. Дослідження особливостей відведення колодок від коліс у візках вантажних вагонів під час попуску гальм показали, що колодки схилиються до спирання верхніми кінцями колодок та здійснюють шкідливе тертя по поверхнях кочення коліс. Аналіз дії сил ГВП вантажних вагонів доводить, що ці сили виникають від ваги деталей, які в гальмовій системі візка з'єднані циліндричними шарнірами з відносно великими зазорами. А оскільки вони розміщені в підресореній частині візка, то вимушені коливання деталей під час руху вагона сприяють виникненню переміщень ударного характеру в цих шарнірних вузлах. Унаслідок цього сила P значно збільшується динамічною складовою $P_{дин}$ жорстко-ударного характеру.

Доведено, що основною причиною виникнення ненормативного зносу колодок вантажних вагонів стає невірноваженість конструкції тріангеля з приєднаним вертикальним важелем відносно маятникового підвішування, через це під час попуску гальм відбувається нахилання тріангеля до спирання й тертя верхніми кінцями гальмових колодок на поверхні кочення коліс.

2. За результатами аналізу системи маятникового підвішування тріангеля встановлено, що відрегулювати нормативний зазор між колодкою й колесом в умовах експлуатації на тривалий час практично не можливо. Це спричинено значним зносом, який відбувається в кінетостатичних вузлах з'єднання елементів ГВП вагона.

Досліджено залежності величин зазорів між колодкою та колесом від кута відхилення маяткової підвіски у візку. Отримані результати свідчать про те, що верхній кінець колодки відходить від колеса на величину Δ_l значно менше мінімально допустимої відстані за встановленими нормативами – 5 мм, водночас нижній кінець відходить від колеса на величину Δ_n , що значно перевищує максимально допустиму величину 8 мм.

Наявність такої відстані є конструктивним недоліком ГВП візка, яку можна ліквідувати за рахунок модернізації тріангеля, а саме змінити місце розташування отвору у його розпірці. Така модернізація тріангеля дасть можливість забезпечити умову, коли зазори між колодкою і колесом будуть однакові в усіх частинах, тобто $\Delta_l = \Delta_m = \Delta_n$.

3. Встановлено, що нерівномірний розподіл сили натиснення між гальмовими колодками та колесами обумовлений конструкційними особливостями важільної передачі, зносом кінетостатичних вузлів, нерівномірністю регулювання механізмів, а також відмінностями у геометричних параметрах і фізико-механічних характеристиках колодок, які застосовуються у вантажному рухомому складі. З'ясовано, що вплив конструктивних, динамічних, експлуатаційних, технологічних і зовнішніх факторів призводить до суттєвої нерівномірності розподілу сили натиску, що своєю

чергою викликає підвищений знос колодок і зниження ефективності гальмування. Особливу роль у цьому процесі відіграють збільшене осьове навантаження, зміни температурних режимів і механічні деформації вузлів гальмової системи під час експлуатації вагонів.

Подяка

Дане дослідження проведено в рамках науково-дослідної роботи «Підвищення безпеки руху залізничного рухомого складу шляхом впровадження інтегрованих технологій підтримки життєвого циклу» (№ДР 0125U001907), яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2025 року.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dizo J., Blatnický M., Harušinec J., Suchanek A. Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry* [online]. 2022. 14(3), 536. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
2. Dizo J., Blatnický M. Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology* [online]. 2019. 19(2). P. 197–203. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/mt/19/2/197>
3. Гладких І. В., Сулим А. О., Лупітько Н. В. Основні дослідження динаміки оновлення та розвитку парку вантажних вагонів в Україні. Аналітичний огляд. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. 2020. № 20. С. 4–13.
4. Сулим А. О., Мельник О. О., Бялобжеський О. В., Ломонос А. І. Дослідження факторів та оцінка рівня їх впливу на показник питомих витрат електроенергії рухомого складу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2021. № 4. С. 118–127. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127>
5. Дячков Д. В., Сулим А. О. Особливості застосування інформаційних систем управління підприємством в умовах цифрової економіки. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. 2020. Вип. 1(83). С. 79–86.
6. Сафронов О. М. Дослідження дискової гальмівної системи пасажирського вагона. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2009. Вип. 14. С. 51–67.
7. Hodges T. A life-cycle approach to braking costs. *International Railway Journal*. 2012. <http://www.railjournal.com>
8. Мазур В. Л., Сіренко К. А. Економічні та екологічні аспекти використання гальмових колодок з чавуну чи композиційного матеріалу для залізничного транспорту. *Метал та лиття України*. 2022. № 3(149). С. 54–62.
9. Sharma R. C., Dhingra M., Pathak R. K. Braking systems in railway vehicles. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2015. Vol. 4. P. 206–211.
10. 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. Вип. 32(2). С. 61–75.
11. Блохин Е. П., Алпысбаев К. Т., Панасенко В. Я., Гаркави Н. Я., Клименко И. В., Грановский Р. Б., Федоров Е. Ф. Тележки ZK1 полувагонов, построенных в КНР. *Вагонный парк*. 2012. № 9 (66). С. 12–14.
12. Радзиховский А. А., Омеляненко И. А., Тимошина Л. А. Системный подход к проектированию тележек для грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками. *Вагонный парк*. 2008. № 8. С. 10–16.
13. Радзиховский А. А., Омеляненко И. А., Тимошина Л. А. Устройство отвода тормозных колодок. *Вагонный парк*. 2009. № 11–12. С. 18–21.
14. Босов А. А., Мямлин С. В., Панасенко В. Я., Клименко И. В. Пути совершенствования конструкции тележки грузового вагона. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2009. Вип. 2. С. 27–32.
15. Мазур В. Л., Найдек В. Л., Попов Є. С. Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці. *Метал та лиття України*. 2021. № 2(29). С. 30–39.

16. Sarip S. Design Development of Lightweight Disc Brake for Regenerative Braking – Finite Element Analysis. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*. 2013. Vol. 3(1). P. 52–58.
17. Cruceanu C., Oprea R., Spiroiu M., Craciun C., Arsene S. Computer Aided Study Regarding the Influence of Filling Characteristics on the Longitudinal Reaction within the Body of a Braked Train. *Recent Advances in Computer: Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Computers* (Greece, July 23–25, 2009). P. 531–537.
18. Cruceanu C. Train Braking, Reliability and Safety in Railway. Intech. 2012.
19. Равлюк В. Г. Розвиток наукових основ з забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації гальмових систем вантажних вагонів: дис.... д-ра техн. наук: 05.22.07. Харків, 2024. 408 с.
20. Gerlici J., Kravchenko K., Fomina Y. Development of an Innovative Technical Solution to Improve the Efficiency of Rolling Stock Friction Brake Elements Operation. In: *International Conference TRANSBALITICA: Transportation Science and Technology*. Cham: Springer International Publishing, 2019. P. 28–38.
21. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Гребенюк В. А., Ткачук М. Р. Визначення факторів, що впливають на надійність роботи гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. Вип. 187. С. 63–74.
22. Ловська А. О., Равлюк В. Г. Дослідження ненормативного зносу гальмових колодок і його вплив на ефективність гальмування вантажних поїздів. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. 2022. № 25. С. 30–50. DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-25-30-50>.
23. Бабаєв А. М., Дмитрієв Д. В. Принцип дії, розрахунки та основи експлуатації гальм рухомого складу залізниць: навчальний посібник. Київ: ДЕТУТ, 2007. 176 с.
24. Равлюк В., Равлюк М., Фісіна Я., Нуруллаєв Р. Уточнені розрахунки 2D схем-моделей гальмових важільних передач для збільшення ресурсу колодок вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. № 35. С. 24–34.
25. Ловська А. О., Равлюк В. Г. Виявлення причин утворення поверхневих дефектів коліс вагонів, обладнаних композиційними колодками. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології»*. 2022. № 40. С. 102–120. DOI: <http://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-9>.
26. Колодки гальмові композиційні з сітчато-дротяним каркасом для залізничних вантажних вагонів. Технічні умови. ТУ У 6-05495978.017-2001. Білоцерківське ВАТ «Трібо». 30.01.2001. 27 с.
27. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України. ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015: затв. наказом Укрзалізничці від 28.10.1997 р. № 264-Ц. Київ: 2004. 146 с.

V. G. Ravlyuk

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel.: 095-444-59-74, E-mail: ravvg@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

A. O. Lovska

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbak hsq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel.: 066-338-19-46, E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

D. I. Skurikhin

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel.: 093-847-46-78, E-mail: skurikhin@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3746-5157>

A. V. Rybin

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

Tel.: 066-705-32-61, E-mail: rybinandrey@kart.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4430-8018>

M. G. Ravliuk

Ukrainian State University of Railway Transport

Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

Tel.: 068-064-52-19, E-mail: ravmg@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6021-660X>

STUDY OF THE INFLUENCE OF STRUCTURAL PARAMETERS OF THE FREIGHT WAGON BRAKE SYSTEM ON THE SAFETY OF RAILWAY ROLLING STOCK OPERATION

The article presents an analysis of the performance of the braking system of freight wagons, with a particular focus on the interaction between brake pads and the wheel tread surface. The structural design of the brake triangle, pendulum suspensions, and the brake leverage system is examined, as these components are responsible for applying and releasing the brake pads during braking. It has been identified that the uneven distribution of braking force between the pads and the wheels is caused by design-specific features of the brake system, particularly the location of the vertical lever connection hole within the brake triangle strut. This results in the generation of a detrimental torque, leading to tilting of the brake pads and their uneven wear.

Computer simulations and experimental studies confirmed that the brake triangle is balanced in its assembled state, but its equilibrium may be disrupted under external forces. The kinematics of brake pad movement on pendulum suspensions has been investigated, demonstrating how the pads retract from the wheel during brake release. It has been established that due to design-related factors, uneven gaps form between the pads and the wheel tread, resulting in partial friction and wear of the upper ends of the brake pads during traction and coasting modes of the freight train.

A classification of factors influencing the distribution of braking force between brake pads has been proposed, including structural, technical, dynamic, external, environmental, and technological aspects. Based on the analysis of these factors, the necessity of developing an integrated approach to optimizing the braking system has been substantiated. Such an approach would enable uniform distribution of braking force, reduce wear on braking system components, and improve both the efficiency and safety of freight train braking.

Keywords: traffic safety, brake system, kinematics of brake pads, triangle, brake pads, transport mechanics.

REFERENCES

1. Dizo, J., Blatnický, M., Harusinec, J., & Suchanek, A. (2022). Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry* [online], 14(3), 536. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
2. Dizo, J., & Blatnický, M. (2019). Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology* [online], 19(2), 197-203. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/mt/19/2/197>
3. Hladkykh, I. V., Sulym, A. O., & Lupitko, N. V. (2020). Osnovni doslidzhennia dynamiky onovlennia ta rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini. *Analitichnyi ohliad* [Main studies of the dynamics of re-

newal and development of the freight car fleet in Ukraine. Analytical review]. Zbirnyk naukovykh prats «Reikovi rukhomiy sklad» - Collection of scientific papers Railbound rolling stock, 20, 4-13 [in Ukrainian]

4. Sulym, A. O., Melnyk, O. O., Bialobrzheskyi, O. V., & Lomonos, A. I. (2021). Doslidzhennia faktoriv ta otsinka rivnia yikh vplyvu na pokaznyk pytomykh vytrat elektroenerhii rukhomoho skladu [Study of factors and assessment of their influence on the indicator of specific electricity consumption of rolling stock]. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia - Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl, 4, 118-127. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127> [in Ukrainian]

5. Diachkov, D. V., & Sulym, A. O. (2020). Osoblyvosti zastosuvannia informatsiinykh system upravlinnia pidpriemstvom v umovakh tsyfrovoy ekonomiky [Features of the use of enterprise management information systems in the digital economy]. Bulletin of Sumy National Agrarian University, 1(83), 79-86 [in Ukrainian]

6. Safronov, O. M. (2009). Doslidzhennia dyskovoi halmivnoi systemy pasazhyrskoho vahona [Study of the disc brake system of a passenger car]. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tehnolohichnoho universytetu transportu, seriia Transportni systemy i tekhnolohii - Collection of scientific papers of the State University of Economics and Technology of Transport, Transport Systems and Technologies series, 14, 51-67 [in Ukrainian]

7. Hodges, T. (2012). A life-cycle approach to braking costs. International Railway Journal. Retrieved from: <http://www.railjournal.com>

8. Mazur, V. L., & Sirenko, K. A. (2022). Ekonomichni ta ekolohichni aspekty vykorystannia halmovykh kolodok z chavunu chy kompozytsiinoho materialu dlia zaliznychnoho transportu [Economic and environmental aspects of using brake pads made of cast iron or composite material for railway transport]. Metal ta lyttia Ukrainy - Metal and casting of Ukraine, 3(149), 54-62 [in Ukrainian]

9. Sharma, R. C., Dhingra, M., Pathak, R. K. (2015). Braking systems in railway vehicles. International Journal of Engineering Research & Technology, 4, 206-211.

10. Safronov, O. M. (2018). Zastosuvannia kompiuternoho modeliuvannia dlia utochnenoi otsinky halmivnoi efektyvnosti vantazhnykh vahoniv [Application of computer modelling for a refined assessment of the braking efficiency of freight cars]. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. Seriia: Transportni systemy i tekhnolohii - Collection of scientific papers of the State University of Infrastructure and Technology. Transport systems and technologies series, 32(2), 61-75 [in Ukrainian]

11. Blokhin, E. P., Alpysbayev, K. T., Panasenko, V. Ya., Garkavi, N. Ya., Klimenko, I. V., Granovskiy, R. B., & Fedorov, E. F. (2012). Telezhki ZK1 poluvagonov, postroennykh v KNR [ZK1 bogies of gondola wagons built in the PRC]. Vagonnyy park - Wagon fleet, 9(66), 12-14

12. Radzihovskiy, A. A., Omelyanenko, I. A., & Timoshina, L. A. (2008). Sistemnyy podhod k proektirovaniyu telezhek dlya gruzovykh vagonov s povyshennymi osevyimi nagruzkami [System approach to bogie design for freight wagons with increased axial loads]. Vagonnyy park - Wagon fleet, 8, 10-16

13. Radzihovskiy, A. A., Omelyanenko, I. A., & Timoshina, L. A. (2009). Ustroystvo otvoda tormoznykh kolodok [Brake shoe withdrawal device]. Vagonnyy park - Wagon park, 11-12, 18-21

14. Bosov, A. A., Myamlin, S. V., Panasenko, V. Ya., & Klimenko, I. V. (2009). Puti sovershenstvovaniya konstruktsii telezhek gruzovogo vagona [Ways to improve the design of a freight car bogie]. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana - Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, 27-32

15. Mazur, V. L., Naidek, V. L., & Popov, Ye. S. (2021). Porivniannia chavunnykh i kompozytsiinykh z chavunnymy vstavkami halmovykh kolodok dlia rukhomoho skladu zaliznytsi [Comparison of cast iron and composite brake pads with cast iron inserts for railway rolling stock]. Metal ta lyttia Ukrainy - Metal and casting of Ukraine, 2(29), 30-39 [in Ukrainian]

16. Sarip, S. (2013). Design Development of Lightweight Disc Brake for Regenerative Braking - Finite Element Analysis. International Journal of Applied Physics and Mathematics, 3(1), 52-58.

17. Cruceanu, C., Oprea, R., Spiroiu, M., Craciun, C., Arsene, S. (2009). Computer Aided Study Regarding the Influence of Filling Characteristics on the Longitudinal Reaction with in the Body of a Braked Train. Recent Advances in Computer. Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Computers, (Greece, July 23-25, 2009), 531-537.

18. Cruceanu, C. (2012). Train Braking, Reliability and Safety in Railway, Intech.

19. Ravlyuk, V. G. (2024). Rozvytok naukovykh osnov z ubezpechennia rukhu poizdiv shliakhom pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii halmovykh system vantazhnykh vahoniv [Development of scientific foundations for train traffic safety by increasing the efficiency of freight car brake systems operation]. Candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian]

20. Gerlici, J., Kravchenko, K., & Fomina, Y. (2019). Development of an Innovative Technical Solution to Improve the Efficiency of Rolling Stock Friction Brake Elements Operation. In: International Conference TRANSBALICA: Transportation Science and Technology. Cham: Springer International Publishing, 28-38.
21. Ravlyuk, V. G., Ravlyuk, M. G., Hrebeniuk, V. A., & Tkachuk, M. R. (2019). Vyznachennia faktoriv, shcho vplyvaiut na nadiinist roboty halmovoi vazhilnoi peredachi vizkiv vantazhnykh vahoniv [Determination of factors influencing the reliability of the brake lever transmission of freight car bogies]. Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collection of scientific papers of the Ukrainian State University of Railway Transport, 187, 63-74 [in Ukrainian]
22. Lovska, A. O., & Ravlyuk, V. G. (2022). Doslidzhennia nenormatyvnoho znosu halmovykh kolodok i yoho vplyv na efektyvnist halmuvannia vantazhnykh poizdiv [Research of abnormal wear of brake pads and its influence on the efficiency of braking freight trains]. Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» – Collection of scientific papers Railbound rolling stock, 25, 30-50 DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-25-30-50>. [in Ukrainian]
23. Babaiev, A. M., & Dmytriiev, D. V. (2007). Pryntsyp dii, rozrakhunky ta osnovy ekspluatatsii halm rukhomoho skladu zaliznyts [Principle of operation, calculations and basics of operation of brakes of railway rolling stock] [in Ukrainian]
24. Ravliuk, V., Ravliuk, M., Fisina, Ya., & Nurullaiev, R. (2020). Utochneni rozrakhunky 2D skhem-modelei halmovykh vazhilnykh peredach dlia zbilshennia resursu kolodok vantazhnykh vahoniv [Improved calculations of 2D scheme-models of brake lever gears to increase the service life of freight car pads]. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii: Seriya: Transportni systemy i tekhnolohii – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technology: Transport Systems and Technologies series, 35, 24-34 [in Ukrainian]
25. Lovska, A. O., & Ravliuk, V. G. (2022). Vyiavlennia prychyn utvorennia poverkhnevnykh defektiv kolis vahoniv, obladnanykh kompozytsiinymy kolodkami [Identification of the causes of formation of surface defects of wheels of wagons equipped with composite pads]. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii: Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technology: Transport Systems and Technologies series, 40, 102-120 DOI: <http://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-9>. [in Ukrainian]
26. Kolodky halmovi kompozytsiini z sitchato-drotianym karkasom dlia zaliznychnykh vantazhnykh vahoniv. Tekhnichni umovy [Composite brake pads with a mesh-wire frame for railway freight cars. Technical specifications]. (2001). TU U 6-05495978.017-2001 [in Ukrainian]
27. Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu na zaliznytsiakh Ukrainy [Instruction on the operation of rolling stock brakes on the railways of Ukraine]. (2004). TsT-TsV-TsL-0015 [in Ukrainian]

Ж.О. Семко

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (05366) 6-02-50, E-mail: shaganne@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0047-8509>

ОЦІНКА ВІДПОВІДНОСТІ У СФЕРІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ. МОДУЛІ ОЦІНКИ ВІДПОВІДНОСТІ. ОСОБЛИВОСТІ СКЛАДАННЯ ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Відповідно до Закону України Про технічні регламенти та оцінку відповідності діяльність усіх зацікавлених сторін щодо надання на ринку України, введення в обіг чи в експлуатацію продукції має бути направлена насамперед на захист життя та здоров'я людей, тварин і рослин, охорону довкілля та природних ресурсів, забезпечення енергоефективності, захист майна, забезпечення національної безпеки та запобігання підприємницькій практиці, що вводить споживача (користувача) в оману. Задля виконання цього завдання законом передбачено проведення оцінки відповідності продукції вимогам технічних регламентів, що є важливим аспектом законодавчо обґрунтованої системи технічного регулювання в Україні. Положеннями цього закону, які поширюються на усю продукцію, що надається на ринку України, зокрема і на продукції залізничного транспорту, встановлено, що технічні регламенти, якими передбачене застосування процедур оцінки відповідності, як правило, містять або самі процедури оцінки відповідності, які повинні або можуть застосовуватися для оцінки відповідності продукції технічним вимогам, визначеним у технічних регламентах, або, в разі якщо такі процедури затверджені іншими нормативно-правовими актами, посилання на них.

Оскільки відповідно до постанови № 377 від 04 квітня 2025 р. «Про внесення змін до пункту 2 постанови Кабінету Міністрів України від 26 січня 2022 р. № 53» відтерміновано впровадження змін до технічних регламентів у сфері залізничного транспорту, є нагода розглянути деякі аспекти проведення оцінки відповідності продукції вимогам технічних регламентів шляхом застосування модулів. В статті наведено теоретичний погляд на виконання вимог, передбачених кожним модулем стосовно змісту та обсягів технічної документації, що має бути складена для підтвердження відповідності продукції встановленим до неї вимогам.

Крім того, в статті наведено порівняльний аналіз вимог, встановлених Рішенням Європейської комісії від 9 листопада 2010 р. № 2010/713/ЄС «Про модулі для процедур оцінювання відповідності, придатності до використання та перевірки ЄС, що мають використовуватись у технічних специфікаціях експлуата-

© Семко Ж. О., 2025

ційної сумісності, ухвалених Директивою 2008/57/ЄС Європейського Парламенту та Ради» з вимогами затвердженими в Україні «Модулями оцінки відповідності у сфері залізничного транспорту», затвердженими постановою КМУ від 3 жовтня 2018 р. № 797.

На виконання вимог закону в сфері залізничного транспорту було прийнято два технічних регламенти: Технічний регламент безпеки інфраструктури залізничного транспорту, затверджений постановою КМУ 11 липня 2013 р. № 49, та Технічний регламент безпеки рухомого складу залізничного транспорту, затверджений постановою КМУ від 30 грудня 2015 р. № 1194, а також Модулі оцінки відповідності у сфері залізничного транспорту, затверджені постановою КМУ від 3 жовтня 2018 р. № 797.

Ключові слова: оцінка відповідності, модуль, задані вимоги, процедура оцінки відповідності, технічний регламент.

Вступ

Законом України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» [1] встановлено, що «процедура оцінки відповідності – це будь-яка процедура, яка безпосередньо чи опосередковано використовується для визначення того, що заявлені потреби чи очікування, які зафіксовані в технічних регламентах, стандартах, технічних специфікаціях або в інший спосіб» (далі - задані вимоги) виконуються.

Законом визначено також, що уніфікована процедура оцінки відповідності або її частина є модулем оцінки відповідності.

Кожен модуль, із наведених у постанові «Про затвердження модулів оцінки відповідності у сфері залізничного транспорту» від 03.10.2018 № 797 [2], визначає певну процедуру (або її частину) оцінки відповідності із наданням загальних вимог, що стосуються правил виконання, обов'язків учасників процесу оцінки, змісту технічної документації, складання документів про відповідність.

Під час проведення оцінки відповідності вимогам технічних регламентів безпеки інфраструктури [3] та безпеки рухомого складу залізничного транспорту [4] постановою [2] визначено такі модулі:

1) стосовно складових оперативної сумісності:

Модуль СА - внутрішній контроль на виробництві (процедура);

Модуль СА1 - внутрішній контроль на виробництві з перевіркою шляхом індивідуального дослідження (процедура);

Модуль СА2 - внутрішній контроль на виробництві з перевіркою через довільні проміжки часу (процедура);

Модуль СВ - експертиза типу (частина процедури);

Модуль СС - відповідність типу на основі внутрішнього контролю на виробництві (частина процедури);

Модуль CD - відповідність типу на основі системи управління якістю процесу виробництва (частина процедури);

Модуль CF - відповідність типу на основі перевірки складової (частина процедури);

Модуль СН - відповідність на основі повної системи управління якістю (процедура);

Модуль СН1 - відповідність на основі повної системи управління якістю та дослідження проекту (процедура);

Модуль CV - затвердження типу на підставі дослідної (підконтрольної) експлуатації (частина процедури);

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

2) стосовно підсистем залізничного транспорту:

Модуль SB - оцінка відповідності типу підсистеми (частина процедури);

Модуль SD - оцінка відповідності на основі системи управління якістю процесу створення та/або утримання підсистеми у відповідному стані (частина процедури);

Модуль SF - оцінка відповідності на основі перевірки підсистеми (частина процедури);

Модуль SG - оцінка відповідності на основі перевірки окремої підсистеми (процедура);

Модуль SH1 - оцінка відповідності на основі повної системи управління якістю процесу створення та/або утримання підсистеми у відповідному стані і дослідження проекту (процедура).

Інформацію стосовно того, у чому полягає різниця між процедурою оцінки відповідності та частиною процедури, викладено у [5] та обґрунтовано таким чином: якщо процедура оцінки відповідності є цілком суто самостійною одиницею процесу оцінювання, що забезпечує повне та об'єктивне досягнення результату, тоді частини процедури оцінки відповідності є тими частинами, які за своєю властивістю створюють у цілому відповідну процедуру оцінки тільки шляхом їх комбінації (або поєднання).

Незважаючи на цю відмінність усі модулі поєднує необхідність за кожним з них складання технічної документації за [2], або так званого, технічного файлу, який має докази щодо відповідності продукції заданим вимогам.

Мета роботи полягає у визначенні особливостей змісту технічної документації за одним із обраних модулів (чи їх комбінації або поєднання) під час проведення оцінки відповідності вимогам технічних регламентів у сфері залізничного транспорту, а також наведення прикладів документів, що можуть бути додані до технічної документації, складання якої є обов'язковим відповідно до вимог, зазначених у постанові № 797 [2].

Матеріали та методи дослідження

Слід зазначити, що частиною другою статті 25 закону [1] встановлено, що виробники продукції застосовують процедури оцінки відповідності (модулі) вимогам технічних регламентів самостійно або, якщо це визначено у технічних регламентах чи передбачених ними процедурах оцінки відповідності із залученням відповідних органів з оцінки відповідності.

Але прийняття самостійного рішення виробника щодо застосування того чи іншого модуля або їх комбінації має відбуватися з урахуванням певних вимог за одним із варіантів, що запропоновані у додатку 1 до технічного регламенту [3] або [4] згідно із змінами [6].

В таблицях 1 та 2 наведено зміст технічної документації, яка має бути складена для підтвердження відповідності складових оперативної сумісності та підсистем залізничного транспорту.

Таблиця 1. – Зміст технічної документації щодо складових оперативної сумісності

№ з/п	Зміст технічної документації	Модуль									
		CA	CA1	CA2	CB	CC	CD	CF	CH	CH1	CV ¹⁾
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	загальний опис складової	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	проект (за наявності), виробничі креслення, електричні, гідравлічні та інші схеми (за наявності) компонентів складової	+									
	концептуальний проект та виробничі креслення і схеми компонентів складової		+	+							
	концептуальний проект, конструкторська та технологічна документація, схеми компонентів, складових вузлів, контурів тощо								+	+	
	проект та виробничі креслення і схеми компонентів складової				+	+	+	+			+
3	описи та пояснення (за наявності), необхідні для розуміння таких креслень, схем, способу експлуатації, у тому числі умови використання, та технічного обслуговування складової	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	умови інтеграції складової у систему залізничного транспорту та необхідні умови, пов'язані з інтерфейсом	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5	перелік нормативних документів, застосованих повністю або частково, та описи рішень, ухвалених для виконання вимог нормативних документів, якщо такі документи не застосовані. У разі коли нормативний документ частково застосований, у технічній документації зазначаються частини, що застосовані	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	результати виконаних проектних розрахунків, проведених досліджень тощо	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7	звіти про випробування	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8	інша документація, яка необхідна для доведення відповідності складової вимогам нормативних документів			+							
	підтвердні докази щодо адекватності технічного проекту. Такі докази повинні містити посилання на всі використані документи, зокрема ті, що використані не у повному обсязі. Докази включають результати випробувань, виконаних відповідною лабораторією виробника або будь-якою іншою випробувальною лабораторією від його імені та під його відповідальність									+	
9	Документація системи управління якістю, яка має містити:										
9.1	цілі, пов'язані з якістю						+		+	+	
9.2	організаційну структуру						+		+	+	
9.3	відповідальність та повноваження керівництва щодо забезпечення якості складової						+				
	обов'язки і повноваження керівництва стосовно якості проектування складової								+	+	
9.4	відповідні методи виробництва, контролю якості та забезпечення якості, процесів і системних заходів, які будуть застосовуватись						+				
	технічні прийоми, процеси та систематичні дії із здійснення контролю та перевірки проектів, що будуть використовуватися під час проектування складової, з урахуванням їх впливу на стан безпеки								+	+	

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 1

9.4	відповідні технічні прийоми виробництва, контролю якості та системи управління якістю проектування, виробництва та кінцевої перевірки і випробування складової, процесів та систематичних дій, що будуть використовуватись								+	+	
9.5	дослідження і випробування, які будуть проводитися до, під час та після виробництва продукції, а також періодичність їх проведення						+		+	+	
9.6	протоколи (записи) щодо якості (звіти про інспектування, дані випробувань і калібрувань, звіти про кваліфікацію відповідного персоналу тощо)						+		+	+	
9.7	звіти щодо відповідності кваліфікації персоналу						+		+	+	
9.8	засоби моніторингу забезпечення необхідної якості виробів та ефективності функціонування системи управління якістю процесу виробництва складової						+		+	+	
9.9	специфікації технічного проекту, в тому числі перелік документів, що будуть застосовуватися. Якщо відповідні нормативні документи не будуть застосовуватися у повному обсязі, зазначається інформація про відповідність складової вимогам документів, що застосовуються до неї									+	
10	дослідження та необхідні випробування кожної окремої складової, визначені у відповідних нормативних документах							+			
	або дослідження та необхідні випробування, визначені у відповідних нормативних документах, кожної складової із вибірки, що обрана із партії							+			
11	програма дослідження щодо затвердження типу за допомогою дослідної (підконтрольної) експлуатації та інші документи, що вимагаються ¹⁾										+
¹⁾ Особливості змісту технічної документації, що має бути підготовлена та надана під час подання заявки, при застосуванні модулю CV наведено у [7].											

Таблиця 2. – Зміст технічної документації щодо підсистем

№ з/п	Зміст технічної документації	Модуль				
		SB	SD	SF	SG	SH1
1	2	3	4	5	6	7
1	загальний опис підсистеми	+	+	+	+	+
2	повний опис проекту та структури підсистеми	+	+	+	+	+
3	технічні специфікації (умови), що встановлюють вимоги до проектування технічного, технологічного, організаційного та кваліфікаційного забезпечення підсистеми	+				+
	будь-які технічні вимоги, зазначені у відповідних документах, що враховуються під час створення, технічного обслуговування або експлуатації підсистеми		+	+		+
	документи, необхідні для складення технічної документації		+	+	+	
	супровідна документація щодо розроблення, проектування, виробництва, встановлення, налагодження, випробування, пуску, введення в експлуатацію, обслуговування та ремонту					+
4	необхідні дані, що вимагаються згідно з відповідними документами для реєстрів інфраструктури та рухомого складу		+	+	+	

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 2

5	технологічна та організаційна документація щодо будівництва, монтажу, налагодження, пуску, введення в експлуатацію підсистеми	+				
	технологічна та організаційна документація з будівництва, монтажу, налагоджування, пуску, експлуатації та обслуговування підсистеми					+
6	перелік складових частин технічного, технологічного, організаційного та кваліфікаційного забезпечення підсистеми та місць їх стикування з діючими підсистемами або їх частинами із зазначенням переліку документів, які визначають вимоги до оперативної сумісності та місця стикування складових	+				
7	загальні та деталізовані креслення, електро-, пневмо-, гідросхеми, схеми управління, документація на програмно-технічні комплекси	+				
8	описи та пояснення, необхідні для розуміння способу експлуатації та технічного обслуговування підсистеми	+	+	+	+	
	умови проведення технічного обслуговування та використання технічної документації стосовно технічного обслуговування підсистеми		+	+		
	умови технічного обслуговування та технічна документація щодо технічного обслуговування підсистеми із зазначенням вимог до обладнання, матеріалів та комплектуючих, технологічної документації, технології оснащення та інструменту, допоміжних матеріалів, виробничого середовища, рівня забруднення навколишнього природного середовища під час виконання процесу або знищення залишків продуктів та вихідних матеріалів, організаційної структури підприємства, посадових обов'язків окремих працівників, кваліфікаційного складу працівників					+
9	умови інтеграції підсистеми в систему залізничного транспорту та необхідні умови, пов'язані з інтерфейсом	+	+	+	+	+
10	перелік нормативних документів, застосованих повністю або частково, та описи рішень, ухвалених для виконання вимог нормативних документів, якщо такі документи не були застосовані. У разі коли документи застосовані частково, у технічній документації зазначаються частини, що застосовані;	+	+	+	+	+
11	організаційна структура підсистеми та посадові повноваження працівників					+
	умови використання підсистеми з визначенням окремих показників (обмеження часу експлуатації, максимального допустимого зношення технічних засобів, частоти та обсягу технічного обслуговування обладнання, умови взаємодії окремих підсистем, вимоги до організаційної структури підприємства, посадових обов'язків окремих працівників, кваліфікаційного складу працівників та інші показники)		+	+	+	
	умови використання підсистеми					+
12	інші технічні докази, які демонструють, що попередні перевірки або випробування виконані успішно компетентними органами		+	+	+	+
13	концептуальний проект та виробничі креслення і схеми компонентів, складових агрегатів, вузлів, контурів				+	
14	описи та пояснення, необхідні для розуміння таких креслень				+	
15	результати виконаних проектних розрахунків, проведених досліджень тощо	+	+	+	+	
	результати виконаних розробок, проектних рішень та розрахунків, проведених досліджень та випробувань тощо в частині створення, введення в експлуатацію, експлуатації, проведення обслуговування та ремонту					+

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 2

16	звіти про випробування	+	+	+	+	
	програма та звіти про випробування					+
17	докази, що засвідчують адекватність рішень технічного проекту. Такі докази посилаються на будь-які документи, що використовуються, зокрема у разі коли відповідні нормативні документи не застосовані у повному обсязі. Докази включають результати випробувань, виконаних відповідною лабораторією заявника або будь-якою іншою випробувальною лабораторією від його імені та під його відповідальність	+				
18	документація щодо створення (проектування, будівництва, монтажу, пуску та налагоджування, кінцевого випробування, введення в експлуатацію тощо) підсистеми		+	+	+	
19	перелік підприємств, залучених до створення підсистеми		+			
	перелік підприємств, що залучені до проектування, будівництва, монтажу, пуску та налагоджування, остаточного випробування, введення в експлуатацію тощо			+	+	
	перелік організацій (підприємств), що залучені до розроблення, проектування, виробництва окремих елементів, установки, монтажу, налагодження, випробування, пуску, введення в експлуатацію підсистеми або її окремої частини з підтвердженням права виконувати ці роботи					+
20	звіти згідно з методами загальної безпеки оцінки ризиків				+	
21	докази відповідності іншим нормативним актам, у тому числі сертифікатам, які підтверджують відповідність		+	+	+	
22	будь-яка додаткова інформація у разі, коли вона вимагається відповідними документами			+	+	+
23	Документація стосовно системи управління якістю, яка має містити:					
23.1	наказ про затвердження організаційної структури, обов'язків та повноважень керівництва щодо забезпечення якості		+			+
23.2	специфікації технічного проекту, в тому числі стандартів, що будуть застосовуватися, у разі, коли відповідні нормативні документи та/або технічні специфікації не будуть застосовуватися у повному обсязі					+
23.3	документи щодо відповідних технічних прийомів та систематичних дій з управління процесом створення та/або утримання підсистеми у відповідному стані		+			
	документи щодо відповідних технічних прийомів та систематичних дій з контролю та перевірки проектів, що будуть використовуватися під час проектування підсистеми					+
	документи щодо відповідних технічних прийомів та систематичних дій з управління процесом створення та/або утримання відповідної підсистеми у відповідному стані, контролю за якістю та процедури повної системи управління якістю					+
23.4	документи щодо досліджень та випробувань, що здійснюватимуться до, під час та після створення та/або утримання підсистеми у відповідному стані, а також періодичності їх здійснення		+			+
23.5	процедури щодо якості (звіти про перевірки, дані випробувань, дані щодо калібрування засобів вимірювальної техніки, кваліфікаційні звіти щодо відповідного персоналу)		+			
	документи щодо процедур оцінки якості (звіти про перевірки та дані випробувань, кваліфікаційні звіти щодо відповідного персоналу)					+
23.6	процедури моніторингу щодо досягнення необхідної якості та ефективної експлуатації системи управління якістю		+			

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Закінчення таблиці 2

23.6	документи щодо процедур моніторингу досягнення необхідної якості проектів і підсистеми та ефективної експлуатації повної системи управління якістю					+
23.7	свідчення того, що створення підсистеми охоплено системою управління якістю заявника, а також докази її ефективності		+			
23.8	інформацію щодо призначеного органу, відповідального за затвердження та нагляд за системою управління якістю		+			

Виходячи із наведеної в таблицях 1 та 2 інформації, можна зробити такий висновок: незважаючи на відсутність принципової різниці щодо змісту технічної документації, яку має бути складено, деякі відмінності все ж таки існують. І справа не тільки в тому, що модулі, під час застосування яких використовується оцінювання системи управління якістю, містять вимоги щодо документів на цю систему, але й в тому, що деякі вимоги до змісту технічної документації окремих модулів відрізняються більш розширеним формулюванням, яке уточнює ці вимоги залежно від модуля. Здебільшого це стосується модулів, які являють собою повну процедуру оцінки, а не її частину.

Крім того, наведена в таблицях 1 та 2 інформація має у більшості випадків загальне визначення та не надає розуміння щодо конкретних документів, які мають потрапити до технічної документації під певний модуль.

Якщо з такими визначеннями технічної документації, як наприклад:

- «перелік підприємств, залучених до створення підсистеми»;
- «звіти про випробування»;
- «результати виконаних розробок, проектних рішень та розрахунків, проведених досліджень та випробувань»;
- «описи та пояснення, необхідні для розуміння таких креслень»;
- «загальний опис підсистеми»;
- «загальний опис складової»;
- «проект (за наявності), виробничі креслення, електричні, гідравлічні та інші схеми (за наявності) компонентів складової»

все достатньо зрозуміло, то з такими, як:

- «умови використання підсистеми з визначенням окремих показників (обмеження часу експлуатації, максимального допустимого зношення технічних засобів, частоти та обсягу технічного обслуговування обладнання, умов взаємодії окремих підсистем, вимоги до організаційної структури підприємства, посадових обов'язків окремих працівників, кваліфікаційного складу працівників та інші показники)»;
- «умови інтеграції підсистеми в систему залізничного транспорту та необхідні умови, пов'язані з інтерфейсом»;
- «умови інтеграції складової у систему залізничного транспорту та необхідні умови, пов'язані з інтерфейсом»

є певні труднощі.

На погляд автора ці труднощі насамперед полягають у тому, що ці вимоги виписані відповідно до РІШЕННЯ КОМІСІЇ від 9 листопада 2010 року «Про модулі для процедур оцінювання відповідності, придатності до використання та перевірки ЄС, що мають використовуватись у технічних специфікаціях експлуатаційної сумісності, ухвалених Директивою 2008/57/ЄС Європейського Парламенту та Ради

(2010/713/ЄС)» [8]. Оскільки Директивою 2008/57/ЄС [9] передбачалось приведення різноманітних національних вимог щодо функціонування залізничної системи в кожній країні Європейського Союзу до спільних ефективних та прогресивних вимог, завдяки яким буде створено умови щодо технічної гармонізації та стандартизації, яким повинні відповідати складові інтероперабельності, введено загальну процедуру досягнення відповідності та забезпечення відповідності правилам безпеки, здоров'я та захисту прав споживачів, що стосуються залізничних мереж під час їх проектування, спорудження, підготовки та експлуатації. Також Директива 2008/57/ЄС [9] мала на меті досягнення по всій залізничній мережі «особливо високої сумісності між характеристиками інфраструктури та самого транспорту та ефективного зв'язку між інформаційними та комунікативними системами різних управлінь інфраструктури та залізничних підприємств, враховуючи, що «рівень ефективності, безпеки, якості обслуговування та витрат залежить від сумісності, зв'язку та, зокрема, від інтероперабельності залізничної системи».

Отже, наявність однакових вимог до залізничної системи на всій території України, надає можливість стверджувати, що умови інтеграції чи то підсистеми, чи то складової оперативної сумісності в систему залізничного транспорту та забезпечення виконання умов, пов'язаних з інтерфейсом, є вихідними параметрами при розробці, створенні та будівництві як рухомого складу так і складових елементів інфраструктури (далі – елементи інфраструктури), які належать до складових оперативної сумісності або підсистем залізничного транспорту.

Іншою проблемою можна вважати той факт, що в чинних технічних регламентах у сфері залізничного транспорту відсутній перелік конкретних показників безпеки щодо рухомого складу та елементів інфраструктури, що мають бути обов'язково розглянуті під час проведення оцінки відповідності.

Зважаючи на встановлені у технічних регламентах [3] та [4] на підставі положень закону України [1] та закону України «Про загальну безпечність нехарчової продукції» [10] обов'язкові вимоги щодо безпеки рухомого складу та інфраструктури залізничного транспорту, наявність переліку показників безпеки залізничного транспорту є не тільки актуальним питанням, але й фактором, який дозволить ліквідувати непорозуміння у виборі процедур (модулів) оцінки відповідності певних об'єктів залізничного транспорту.

Крім того, ураховуючи положення пункту 4 статті 44 закону України [1] щодо права секторальних (міжсекторальних) груп призначених органів «розробляти та ухвалювати документи, спрямовані на забезпечення узгодженості в технічному застосуванні призначеними органами процедур оцінки відповідності вимогам технічних регламентів, що належать до сфери відповідальності зазначених груп», визначення та обрання спільного (однакового) підходу до певних процедур (модулів) оцінки відповідності для конкретних об'єктів залізничного транспорту, стає дуже важливим аспектом у створенні об'єктивного, ефективного, без зайвого навантаження на виробників, підходу до процесу оцінки відповідності у залізничній галузі. Що в свою чергу сприятиме забезпеченню безпеки як залізничної системи у цілому, так і окремих її підсистем, складових та елементів. Такий спільний підхід також надасть змогу обирати об'єктивне обґрунтування щодо визначення підсистем, складових та елементів, що становлять низький, або середній, або високий рівень небезпеки, а також надасть можливість виконувати вибір, ідентифікацію та оцінку притаманних ризиків (що будуть певними для конкретного об'єкту) за спільними правилами стосовно загально визначених показників безпеки.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

На підставі вище викладеного можна вважати, що відповідь на питання щодо умов інтеграції складових оперативної сумісності та елементів інфраструктури у систему залізничного транспорту, містить цілком логічні пояснення, а саме:

1) відповідно до пункту 7.2 ДСТУ ГОСТ 15.902 [11] для постановки продукції на виробництво має бути розроблене технічне завдання (ТЗ), в якому має бути **урахований досвід попередніх розробок аналогічної продукції та її експлуатації**;

2) відповідно до пункту 7.7 та 8.3 ДСТУ ГОСТ 15.902 [11] проведення приймальних випробувань під час приймання результатів дослідно-конструкторських робіт та кваліфікаційних випробувань під час освоєння з метою встановлення її відповідності встановленим вимогам як у нормативних документах так і конструкторській та технологічній документації;

3) відповідно до 7.7.11 та 8.3.12 ДСТУ ГОСТ 15.902 [11] у відповідних документах (протоколах приймальних випробувань та актах приймальної комісії або в протоколах (або звітах) кваліфікаційних випробувань та актах кваліфікаційної комісії) мають бути засвідчені результати проведених випробувань, перевірок, оглядів, контролю та вимірювань, та містять, зокрема дані про:

- відповідність дослідного зразка вимогам, встановленим у ТЗ, у разі приймання результатів дослідно-конструкторських робіт;

- або

- відповідність конструкторській документації (КД) під час освоєння виробництва;

- рекомендації щодо можливості подальшого використання дослідних (головних) зразків;

- рекомендації щодо виготовлення установчої серії та її обсяг;

- можливість виконання робіт, передбачених у документах щодо експлуатації та ремонту.

Якщо взяти до уваги, що у разі проведення перелічених вище етапів постановки продукції на виробництво, отримано позитивні результати, то можна стверджувати, що затверджені протокол приймальних випробувань, акт приймальної комісії, протокол (звіт) кваліфікаційних випробувань, акт кваліфікаційної комісії разом із затвердженими технічними умовами (ТУ) на продукцію (якщо розроблення технічних умов було передбачено) є тими документами, які можуть бути доказом інтеграції складових оперативної сумісності та елементів інфраструктури у систему залізничного транспорту.

Але, слід визнати, що таке твердження не є панацеєю. В цій статті автором наведено приклади можливих варіантів документів, що будуть доречними у складі технічної документації, яку має створювати та подавати виробник чи інша особа, що діє від імені виробника, задля підтвердження відповідності продукції вимогам технічних регламентів.

Також треба зазначити, що цілковиту відповідальність за складання та повноту технічної документації разом із оформленням декларації про відповідність несе виробник.

Але при цьому:

1) рішення про відповідність продукції та про видачу сертифікату відповідності за модулями, що передбачають такі дії, приймає призначений орган оцінки відповідності на підставі проведення відповідних перевірок, зокрема наданої технічної документації, та на підставі позитивних результатів

2) відповідно до статті 41, пунктів 2-5 закону України [1]:

«- призначені органи повинні дотримуватися ступеня вимогливості та рівня захисту, що є необхідними для відповідності продукції вимогам відповідного технічного регламенту;

- у разі якщо призначений орган вважає, що виробником не були виконані вимоги, визначені в технічному регламенті, відповідних стандартах з переліку національних стандартів для цілей застосування технічного регламенту чи інших технічних специфікаціях, зазначений орган повинен вимагати від виробника вжиття відповідних коригувальних заходів та не видавати документ про відповідність;

- у разі якщо під час проведення моніторингу відповідності після видачі документа про відповідність призначений орган виявить, що продукція вже не відповідає вимогам, зазначений орган повинен вимагати від виробника вжиття відповідних коригувальних заходів і в разі необхідності призупинити або припинити дію документа про відповідність;

- у разі якщо коригувальних заходів не було вжито або вони не дали необхідних результатів, призначений орган залежно від обставин повинен установити обмеження щодо будь-яких документів про відповідність, призупинити або припинити їхню дію».

Оскільки на даний час практичний досвід щодо проведення оцінки відповідності продукції для залізничного транспорту відповідно до встановлених постановою № 797 [2] процедур, майже відсутній, то говорити про об'єктивність та правильність викладених варіантів підтверджуючих документів, буде занадто впевнено. Скоріш за все конкретні роботи щодо оцінки відповідності залізничної продукції вимогам застосованих до неї технічних регламентів [3] та [4] внесуть свої корективи та пропозиції, особливо у разі застосування складних модулів таких, як CD, CV, CH, CH1, SD, SF, SG, SH1. Але у виборі саме за якою процедурою має бути виконана оцінка відповідності, позитивним фактором є те, що відповідно до постанови КМУ від 26.01.2022 № 53 «Про внесення змін до Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту і Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту» [6] у виробника є право обирати той чи інший модуль або їх комбінацію, які наведено у переліку складових елементів інфраструктури залізничного транспорту, які підлягають оцінці відповідності та у переліку рухомого складу та його складових частин, що підлягають оцінці відповідності.

Яким чином буде відбуватись процес оцінки відповідності вимогам технічних регламентів у сфері залізничного транспорту покаже майбутнє, оскільки впровадження змін до технічних регламентів [3] та [4] відкладено постановою КМУ від 4 квітня 2025 р. № 377 на 51 місяць від дня опублікування постанови № 53 [6].

Наприкінці слід нагадати, що законом України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» (стаття 24) встановлено, що здійснювати добровільну оцінку відповідності технічні регламенти не вимагають, але законом і не заборонено здійснення такої оцінки. При цьому, в законі [1] наведено: «Добровільна оцінка відповідності здійснюється на добровільних засадах, в будь-яких формах, включаючи випробування, декларування відповідності, сертифікацію та інспектування, та на відповідність будь-яким заявленим вимогам.

Орган з оцінки відповідності залучається до здійснення добровільної оцінки відповідності на умовах, визначених договором між заявником і таким органом».

Висновки

1 Оцінка відповідності за одним із модулів або їх комбінацією з метою підтвердження відповідності складових оперативної сумісності та елементів інфраструктури системи залізничного транспорту встановленим вимогам є важливою складовою

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

забезпечення безпечного функціонування залізничної системи України та виконання законодавчих вимог щодо надання на ринку, введення в обіг або вводу в експлуатацію безпечної продукції залізничного призначення.

2. Відповідальність за зміст та повноту технічної документації, яку потрібно надавати як доказ відповідності продукції встановленим вимогам, покладається на виробника.

3. Для підтвердження відповідності своєї продукції встановленим у технічних регламентах вимогам, виробник має право обирати процедуру (модуль, комбінацію модулів), що наведені у цих технічних регламентах.

4. Документи, що отримані під час постановки продукції на виробництво відповідно до ДСТУ ГОСТ 15.902, можуть служити доказом умов інтеграції складових оперативної сумісності та елементів інфраструктури у систему залізничного транспорту.

5. За бажанням виробника на підставі відповідного договору між ним та органом з оцінки відповідності може бути здійснена добровільна оцінка відповідності в будь-яких формах, включаючи випробування, декларування відповідності, сертифікацію та інспектування, та на відповідність будь-яким заявленим вимогам.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про технічні регламенти та оцінку відповідності: Закон України від 15 січня 2015 р. № 124-VIII // База даних «Законодавство України» ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19#Text>

2. Про затвердження модулів оцінки відповідності у сфері залізничного транспорту: Постанова Кабінету Міністрів України від 3 жовтня 2018 р. № 797. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/797-2018-%D0%BF#Text>

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

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

5. Герко Н.П. Оцінка відповідності у сфері залізничного транспорту. Модуль CV. Теоретичний погляд на можливості застосування. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2024. Вип. 28 С. 50-62 DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-28-50-62>.

6. 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. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/53-2022-%D0%BF#Text>

7. Семко Ж.О. Оцінка відповідності у сфері залізничного транспорту. Модуль CV. Необхідність, особливості та можливості застосування. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2023. Вип. 27. С. 35-45. DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2023-27-35-45>.

8. РІШЕННЯ КОМІСІЇ від 9 листопада 2010 року № 713 Про модулі для процедур оцінювання відповідності, придатності до використання та перевірки ЄС, що мають використовуватись у технічних специфікаціях експлуатаційної сумісності, ухвалених Директивою 2008/57/ЄС Європейського Парламенту та Ради. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/EU100026>

9. Директива № 2008/57/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 17 червня 2008 року про інтероперабельність залізничної системи в межах Співтовариства (Доопрацьована). 46 с. URL: <http://doszt.gov.ua/content/media/Direktiva-57-UA.pdf>

10. Закон України від 2 грудня 2010 року № 2736-VI Про загальну безпечність нехарчової продукції. *Відомості Верховної Ради України, 2011, № 22, ст. 145.* URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2736-17#Text>

11. ДСТУ ГОСТ 15.902:2017 (ГОСТ 15.902-2014, IDT) Система розроблення та постановлення продукції на виробництво. Залізничний рухомий склад. Порядок розроблення та постановлення на виробництво [Чинний від 2017-07-11]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 36 с. (Національні стандарти України)

Zh. O. Semko

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380 536(6) 60250, E-mail: shaganne@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0047-8509>

**CONFORMITY ASSESSMENT IN THE FIELD OF RAILWAY
TRANSPORT. CONFORMITY ASSESSMENT MODULES.
ASPECTS OF EXECUTING TECHNICAL DOCUMENTATION**

In accordance with the Law of Ukraine On Technical Regulations and Conformity Assessment, the activities of all parties involved in placing products on the Ukrainian market, introducing them into the market or putting them into operation should be aimed primarily at protecting human, animal and plant life and health, preserving the environment and natural resources, ensuring energy efficiency, protecting property, ensuring national security and preventing business practices that mislead consumers (users). In order to fulfil this task, the law provides for the assessment of product compliance with the requirements of technical regulations, which is an important aspect of the legally sound system of technical regulation in Ukraine. The provisions of this law, which apply to all products on the Ukrainian market, including railway transport products, stipulate that technical regulations that provide for the application of conformity assessment procedures generally contain either the conformity assessment procedures themselves, which must or may be applied to assess the conformity of products with the technical requirements set out in the technical regulations, or, if such procedures are approved by other regulatory acts, references to them.

Since, pursuant to Resolution No. 377 dated April 04, 2025 «On Amendments to Clause 2 of Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 53 dated January 26, 2022», the implementation of amendments to technical regulations in the field of railway transport has been postponed, there is an opportunity to consider some aspects of assessing the conformity of products with the requirements of technical regulations by applying modules. The article provides a theoretical view of the requirements stipulated by each module with regard to the content and scope of technical documentation to be prepared to confirm the conformity of products with the requirements set for them.

In addition, the article provides a comparative analysis of the requirements set out in the Decision of the European Commission of November 9, 2010 No. 2010/713/EU «On modules for conformity assessment, fitness for use and EU verification procedures to be used in technical specifications for interoperability adopted by Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council» with the requirements approved in Ukraine «Conformity assessment modules in the field of railway transport», approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 797 of October 3, 2018.

Two technical regulations were adopted to implement the requirements of the law in the field of railway transport: The Technical Regulations on the Safety of Railway Transport Infrastructure, approved by CMU Resolution No. 49 on July 11, 2013, and the Technical Regulations on the Safety of Railway Transport Rolling Stock, approved by CMU Resolution No. 1194 on December 30, 2015, as well as the Conformity

Assessment Modules in the field of railway transport, approved by CMU Resolution No. 797 on October 3, 2018.

Key words: conformity assessment, module, specified requirements, conformity assessment procedure, technical regulations.

REFERENCES

1. Zakon Ukrainy Pro tekhnichni rehlementy ta otsinku vidpovidnosti vid 15 sichnia 2015 roku № 124-VIII [Law of Ukraine about technical regulations and conformity assessment from January 15 2015, № 124-VIII]. (2015, January 15). *Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» - «Legislation of Ukraine» database. Vidomosti Verkhovnoi Rady – Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19#Text> [in Ukrainian].
2. Postanova KМУ Pro zatverdzhennia moduliv otsinky vidpovidnosti u sferi zaliznychnoho transportu. vid 3 zhovtnia 2018 roku № 797 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on conformity assessment modules in the field of railway transport from 3d Oktober 2018, № 797]. (2018, October 3). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/797-2018-%D0%BF#Text>
3. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlementu bezpeky infrastruktury zaliznychnoho transport vid 11 lypnia 2013 roku № 494 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on the approval of the Technical Regulations for the Safety of Infrastructure of Railway Transport from July 11 2013 № 494]. (2013, July 11). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
4. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 30 grudnia 2015 roku № 1194 Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlementu bezpeky rukhomoho skladu zaliznychnoho transport [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on the approval of the Technical Regulations for the Safety of Rolling Stock of Railway Transport from December 30 2015 № 1194-2015]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1194-2015-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
5. Gerko N. (2024) Conformity assessment in the field of railway transport. Module CV. Theoretical view on the application possibilities *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific works «Railbound Rolling Stock»*, 28, 50-62 DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-28-50-62>. [in Ukrainian].
6. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 26 sichnnia 2022 roku № 53 Pro vnesennia zmin do Tekhnichnoho rehlementu bezpeky infrastruktury zaliznychnoho transport i Tekhnichnoho rehlementu bezpeky rukhomoho skladu zaliznychnoho transportu [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on approval of changes to the Technical Regulations of Infrastructure of Railway Transport and for the Safety of Rolling Stock of Railway Transport from January 26 2022, № 53]. (2022, January 26). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/53-2022-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
7. Semko Zh. Compliance assessment in the field of railway transport. Module SV. Necessity, features and application possibilities. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific works «Railbound Rolling Stock»*, 27, 35-45 [in Ukrainian].
8. RISHENNIA KOMISII Pro moduli dlia protsedur otsiniuvannia vidpovidnosti, prydatnosti do vykorystannia ta perevirky ES, shcho maiut vykorystovuvaty u tekhnichnykh spetsyfikatsiakh ekspluatatsiinoi sumisnosti, ukhvalenykh Dyrektyvoiu 2008/57/ES Evropeiskoho Parlamentu ta Rady vid 9 lystopada 2010 roku № 713 [COMMISSION DECISION No. 713 On the modules for conformity assessment, suitability for use and EU verification procedures to be used in technical specifications for interoperability adopted by Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of November 9 2010]. (2010, November 9). Retrieved from: <https://ips.ligazakon.net/document/EU100026>
9. Pro interoperabelnist zaliznychnoi systemy v mezhakh Spivtovarystva (Doopratsovana). Dyrektyva № 2008/57/EC Evropeyskoho Parlamentu ta Rady vid 17 chervnya 2008 roku [Directive No. 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of June 17, 2008 On the interoperability of the railway system within the Community (Revised)]. (2008, June 17). Retrieved from: <http://doszt.gov.ua/content/media/Direktiva-57-UA.pdf> [in Ukrainian].
10. Zakon Ukrainy vid 2 hrudnya 2010 roku № 2736-VI Pro zahalnu bezpechnist nekharchovoi produktsii [Law of Ukraine On the general safety of non-food products] (2010, December 2) *Vidomosti Verkhovnoi Rady – Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine 2011. № 22, st. 145*). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2736-17#Text>
11. Systema rozroblennia ta postanovlennia prodyktsii na vyrobnytstvo. Zaliznychnyi rukhomyi sklad. Poriadok rozroblennia ta postanovlennia na vyrobnytstvo [System of development and launching into manufacture. Railway rolling stock. Procedure of development and launching into manufacture]. (2017). *DSTU GOST 15.902:2017 (GOST 15.902-2014, IDT) from 11d July 2017*. Kyiv: SE «UkrNDNC».

І. В. Гладких

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (063)171 5009, E-mail: innagladkih59@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

Д. О. Брусило

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (096)205 5692, E-mail: tyschkovez28@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9976-0793>

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ІННОВАЦІЙНОГО РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ У СВІТІ

У статті досліджуються перспективи впровадження інноваційного рейкового рухомого складу залізниць та міського транспорту у світі. Проаналізовано інноваційні рішення, що використовуються виробниками у новітніх технологіях рейкового транспорту, з акцентом на їхній потенціал у зменшенні викидів парникових газів та переході до екологічно чистих видів транспорту.

Проведено огляд найактуальніших тенденцій та технологій, таких як: Маглев (магнітна левітація); електрифікація та відновлювані джерела енергії; впровадження технології Інтернету речей та штучного інтелекту – інтелектуальне обслуговування та цифрова трансформація, використання штучного інтелекту для прогнозування технічного стану обладнання. Наприклад, такі технології, як Інтернет речей дозволяють оснащувати контейнери «розумними» сенсорами, які збирають та передають дані в режимі реального часу. Це дає можливість відстежувати безліч параметрів, включаючи: розташування контейнера за допомогою GPS, температуру та вологість всередині контейнерів рефрижераторів, стан вантажу, рівень вібрації або потрапляння світла (що може свідчити про спробу відкриття вантажу) та багато іншої інформації необхідної для безпеки руху. Така прозорість дозволяє вантажовідправникам та перевізникам своєчасно реагувати на будь-які відхилення.

Також висвітлюється інтеграція штучного інтелекту в управлінні пасажиропотоками в міському залізничному транспорті. Моделі, що поєднують графові нейронні мережі, дозволяють точно прогнозувати пасажиропотоки в міському залізничному транспорті.

А також, екологічні інновації – перехід від дизеля на гібридні та автономні потяги. Одним із найперспективніших напрямків для подолання цих викликів є розвиток водневих та гібридних технологій. Використання водневих

© Гладких І.В., Брусило Д.О., 2025

технологій у залізничному транспорті набуває все більшої популярності серед провідних компаній світу, які прагнуть зменшити викиди CO₂ та підвищити енергоефективність. Цей вид транспорту демонструє значний потенціал для зниження викидів парникових газів і поступової заміни дизельних локомотивів.

***Ключові слова:** інноваційний рейковий транспорт, технології Інтернету речей, штучний інтелект, цифрова трансформація, водневий двигун, екологічні рішення, дослідження та інновації.*

Вступ та постановка проблеми. Глобальні виклики, пов'язані з кліматичними змінами та екологічною нестабільністю, змушують транспортну індустрію шукати нові, більш сталі рішення. Основне завдання сьогодення в умовах інтеграції України в Європейський простір є відповідність транспорту та транспортних комунікацій держави з найменшими витратами та збереженням національного інтелектуального фонду. На основі постійного аналізу ринкових тенденцій розробляються стратегії щодо освоєння нових напрямків діяльності і випуску нової науково-технічної продукції, яка була б корисна для потенційних замовників.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження в галузі інновацій рейкового транспорту демонструють активний розвиток у кількох ключових напрямках: магнітна левітація, штучний інтелект, екологічна модернізація, цифрова трансформація, а також вдосконалення інфраструктури [1].

Мета статті. Метою цієї роботи є аналіз стану світових тенденцій та перспектив розвитку інноваційного рейкового рухомого складу залізниць шляхом пошуку цілеспрямованих досліджень та інновацій, а також ринкових рішень прискорення інтеграції нових та передових технологій в інноваційні рішення для залізничної продукції.

Матеріал та результати досліджень.

Інноваційний рейковий транспорт – це майбутнє, яке вже починає втілюватись у життя. Він поєднує в собі екологічність, швидкість, комфорт і технологічність. Це ключовий напрям у сфері сталого розвитку інфраструктури та мобільності.

Наразі відстежуються деякі перспективні напрями його розвитку, які зменшують забруднення навколишнього середовища, оптимізують рух поїздів і витрати на експлуатацію. Такі як:

1. Маглев (магнітна левітація)

Найвідоміше застосування магнітної левітації – це високошвидкісні поїзди. Поїзди на магнітній подушці, Maglev (від слів «magnetic levitation») – найшвидший вид наземного громадського транспорту. Розвитку технології магнітної левітації присвячені наступні роботи [2, 3].

Перші експерименти були проведені в Японії у 1960-70-ті роки. Магнітолевітаційні поїзди використовують магнітні поля для руху без контакту з рейками. Це дозволяє досягати надвисоких швидкостей (понад 600 км/год) з мінімальним зносом і шумом.

В основі сучасних проектів технологій магнітного підвісу лежать три основні підсистеми: левітації, стабілізації і прискорення. У той же час на даний момент існує дві основні технології магнітного підвісу і одна експериментальна, доведена лише на папері (рис. 1, 2).

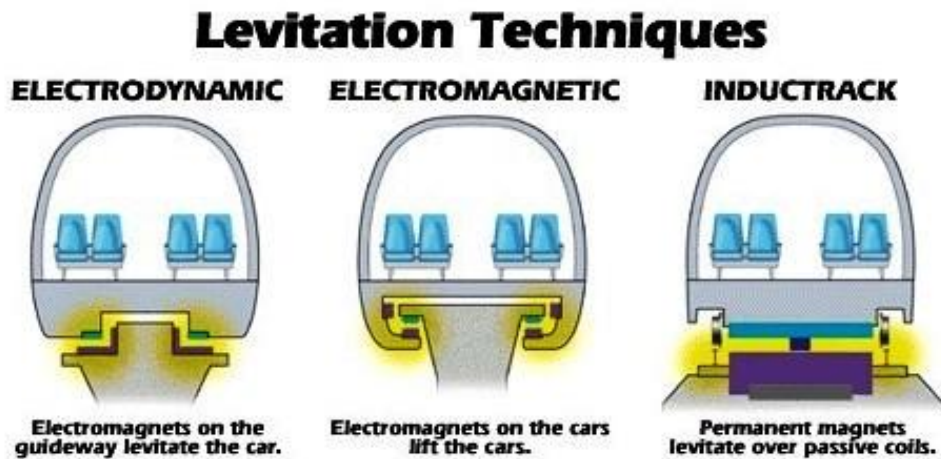


Рис. 1. Технології магнітного підвісу

Потяги, побудовані на базі технології електромагнітного підвісу (EMS) для левітації використовують регульовані електромагніти постійного струму. При цьому практична реалізація даної системи схожа на роботу звичайного залізничного транспорту, але замість колісних пар використовується система електромагнітів – опорних і напрямних.

У разі застосування технології електродинамічного підвісу (EDS) левітація здійснюється при взаємодії магнітного поля, створюваного надпровідними магнітами на борту потягу з електропровідним полотном. На базі технології EDS побудовані японські поїзди JR-Maglev.

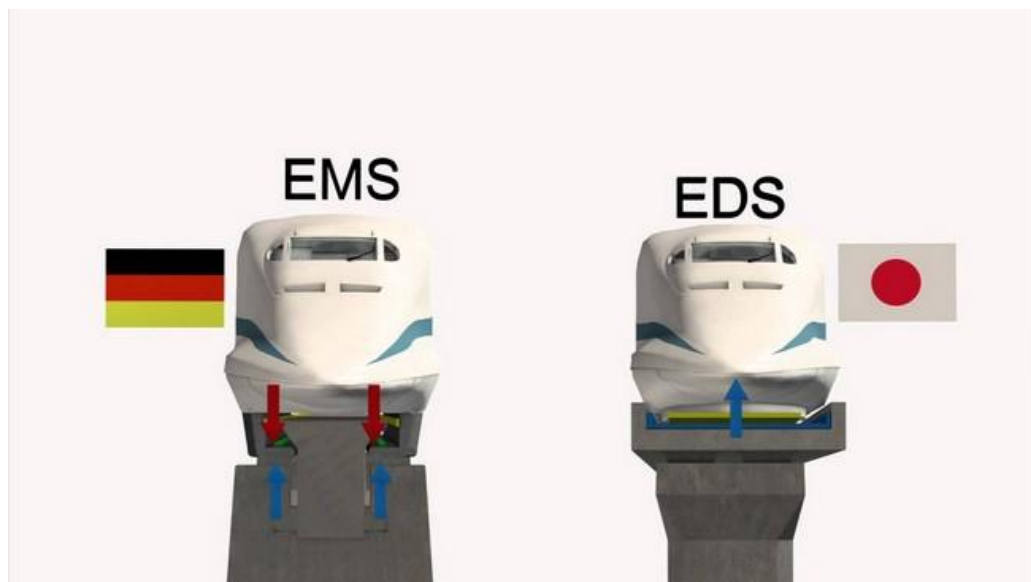


Рис. 2. Технології електромагнітного підвісу (EMS) та електродинамічного підвісу (EDS)

Поїзд на магнітній подушці Linimo, експлуатація якого почалася в березні 2005 року, був розроблений компанією Chubu HSST і досі використовується в Японії. Він курсує між двома містами префектури Аїті. Протяжність полотна, над яким летить Maglev, становить близько 9 км (9 станцій). При цьому максимальна швидкість Linimo дорівнює 100 км/год. Це не завадило йому тільки протягом перших трьох місяців з моменту запуску перевезти понад 10 млн пасажирів.

На даний момент перший рядок у списку найшвидших поїздів на магнітній подушці утримує японське рішення JR-Maglev MLX01, якому 2 грудня 2003 року на випробувальній трасі в Яманасі вдалося розвинути рекордну швидкість – 581 км/год.

Серед поїздів на магнітній подушці, експлуатація яких розпочнеться в найближчому майбутньому, варто відзначити Maglev L0 в Японії, його випробування були відновлені зовсім нещодавно. Очікується, що до 2027 року він буде курсувати за маршрутом Токіо – Нагоя [4].

Китай – активно розвиває маглеви; є діючий маршрут Шанхай – аеропорт Пу-дун. Перша у світі комерційна залізнична лінія на магнітній підвісі. З'єднує станцію шанхайського метро «Лун'ян Лу» з міжнародним аеропортом Шанхай-Пудун. Потяг долає відстань 30 км за 8 хв. 01 сек., розганяючись до швидкості 431 км/год, на якій тримається протягом приблизно 1,5 хв. [5].

2. Розумні залізничні системи

Впровадження IoT та AI.

Сучасні контейнерні перевезення перебувають на порозі глобальної трансформації. Технології Інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту (AI) стрімко впроваджуються в цю галузь, допомагаючи оптимізувати процеси, підвищувати безпеку та знижувати витрати.

Наприклад: Технології IoT дозволяють оснащувати контейнери «розумними» сенсорами, які збирають та передають дані в режимі реального часу. Це дає можливість відстежувати безліч параметрів, включаючи:

- Розташування контейнера за допомогою GPS.
- Температуру та вологість всередині контейнерів рефрижераторів.
- Стан вантажу – наприклад, рівень вібрації або потрапляння світла (що може свідчити про спробу відкриття вантажу).

Така прозорість дозволяє вантажовідправникам та перевізникам своєчасно реагувати на будь-які відхилення.

AI у контейнерній логістиці стає незамінним інструментом для обробки величезних обсягів даних та прийняття рішень. Його ключові застосування включають:

а) Прогнозування попиту

Штучний інтелект аналізує історичні дані, погодні умови, тренди у торгівлі та інші фактори для прогнозування завантаження портів. Це допомагає компаніям заздалегідь розподіляти ресурси, уникаючи навантаження терміналів.

б) Оптимізація маршрутів

Алгоритми AI враховують поточні умови на маршрутах – погоду, стан портів і трафік – і пропонують найефективніші шляхи проходження. Це знижує витрати на паливо та прискорює доставку.

в) Розпізнавання пошкоджень

Камери та системи машинного зору на терміналах можуть автоматично виявляти пошкодження контейнерів, заощаджуючи час на ручний огляд. AI аналізує зображення та повідомляє про необхідність ремонту.

г) Боротьба з шахрайством та крадіжками

Системи AI здатні аналізувати поведінку користувачів та сенсорів для виявлення підозрілих дій, таких як спроби відкриття контейнера або підробки даних про його розташування.

Інтеграція IoT, штучного інтелекту, систем управління трафіком дозволяє: оптимізувати рух поїздів, зменшити аварійність, підвищити енергоефективність [6].

Інтеграція штучного інтелекту в управління пасажиропотоками стає більш актуальною. Моделі, що поєднують графові нейронні мережі, ResNet та LSTM, дозволяють точно прогнозувати пасажиропотоки в міському залізничному транспорті, враховуючи фактори, такі як погода та якість повітря. Такі технології сприяють оптимізації розкладів, зменшенню заторів та підвищенню комфорту пасажирів. Переваги виходять за межі підвищення ефективності й охоплюють покращену видимість, економію коштів, покращене прийняття рішень, управління ланцюгом постачання та більшу гнучкість. Перехід до цифрових послуг у транспортному секторі є неминучим і має першочергове значення для сталого зростання та конкурентоспроможності. [7]

3. Електрифікація та відновлювані джерела енергії

Перехід на електротягу, зокрема із використанням сонячної та вітрової енергії, зменшує вуглецевий слід. А нові акумуляторні технології дозволяють навіть відмовлятися від контактної мережі.

Сонячні панелі на дахах поїздів – для живлення бортових систем (освітлення, вентиляція, інфо-табло). Сонячні електростанції уздовж колій – для постачання електроенергії на тягові підстанції. Живлення залізничних станцій та депо – зменшення споживання від центральної енергосистеми.

Наприклад: в Індії експлуатуються вагони з сонячними панелями, а в Австралії у місті Байрон-Бей діє повністю сонячний потяг (на короткому маршруті).

Вітрова енергія використовується для живлення інфраструктури – освітлення станцій, сигналізація, інформаційні системи. Вітрові турбіни поблизу залізничних колій подають електроенергію до контактної мережі. Наприклад, Нідерланди вже з 2017 року всі електропоїзди NS (Dutch Railways) використовують виключно енергію з вітрових турбін. Залізниці в цій країні, в основному, управляються компанією Nederlandse Spoorwegen (NS), досягли важливої віхи, ставши першою залізничною мережею у світі, яка у 100% своїх поїздів використовує енергію вітру [8].

Інтеграція відновлюваних джерел у залізничну інфраструктуру – це не просто тренд, а **частина глобальної енергетичної трансформації**.

Іспанський залізничний оператор Renfe планує побудувати сонячну панель потужністю 20 МВт для живлення своїх поїздів. Більша частина виробленої електроенергії буде використовуватися для тяги поїздів, а надлишок буде продаватися на ринку. У 2023 році оператор отримав від Aenor сертифікат Carbon Neutral для електричних пасажирських і вантажних поїздів, який гарантує, що всі поїзди Renfe працюють на 100% відновлюваній енергії [9].

Компанія SNCF Gares&Connexions планує розгорнути 1,1 мільйона м² сонячних панелей на території залізничної станції до 2030 року. Вони розпочали загальнонаціональні консультації щодо встановлення сонячних панелей на території перших 156 французьких станцій, щоб визначити першого промислового партнера. Сонячна енергія на станціях може збільшити частку зеленої енергії залізниці [10].

4. Гібридні та автономні потяги

Традиційні дизельні та навіть електричні поїзди, попри їхні переваги, не завжди є екологічно безпечними або економічно доцільними, особливо в регіонах із обмеженою електрифікацією залізничної інфраструктури. Одним із найперспективніших напрямків для подолання цих викликів є розвиток водневих та гібридних технологій [11].

Аналіз останніх досліджень, що були проведені в різних містах та країнах, показав, що використання відновлюваного палива може значно зменшити шумове забруднення та викиди, що створюються громадським транспортом. Якщо Європа збільшить кількість водневих автобусів удвічі, це дозволить зменшити витрати на інфраструктуру та пришвидшити впровадження технології загалом. Це відкриває нові перспективи для залізничного транспорту, де водневі поїзди можуть конкурувати за ефективністю з дизельними аналогами.

Поширення водню не обмежується лише автомобільним громадським транспортом: зустрічаються приклади водневих поїздів і кораблів. Вважається, що за витратами водневі поїзди можуть конкурувати із дизельними поїздами, існує навіть окрема ініціатива Спільного підприємства «Shift2Rail», яка підтримує розширення використання водневих поїздів у Європі. Провідні суднохідні оператори та виробники також вивчають доцільність використання водню; понад 120 компаній створили коаліцію «GettingtoZero», яка прийняла на себе амбіційне зобов'язання розробити проект комерційно вигідних суден з нульовими викидами. В даний час діють пробні проекти використання водневих паромів в Норвегії, Німеччині та Бельгії.

Використання водневих технологій у залізничному транспорті набуває все більшої популярності серед провідних компаній світу, які прагнуть зменшити викиди CO₂ та підвищити енергоефективність. Цей вид транспорту демонструє значний потенціал для зниження викидів парникових газів і поступової заміни дизельних локомотивів. Водневі поїзди забезпечують екологічно чистий вид транспорту, працюючи на водні та виділяючи лише воду як побічний продукт, що робить їх привабливими для регіонів із частковою електрифікацією або складними ландшафтами.

Нижче наведено основні приклади впровадження водневих технологій світовими виробниками – лідерами в залізничному секторі:

- Французька компанія Alstom – пасажирський поїзд на водневих паливних елементах – **Coradiai Lint**.
- Siemens Mobility – поїзд **Mireo Plus H**.
- Компанія Talgo – поїзд **Talgo 250**.
- Hyundai Rotem показала водневий **трамвай H₂**.
- Водневий поїзд **CINOVA H2** від CRRC та оновлений **ETR 1000** від Hitachi Rail.
- Компанія Deutz представила новий водневий **двигун TCG 7.8 H₂** (рис. 3), потужністю 200 кВт.
- Залізничний **автобус RS ZERO** (рис. 4) від компанії Stadler, оснащений водневими двигунами Deutz.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

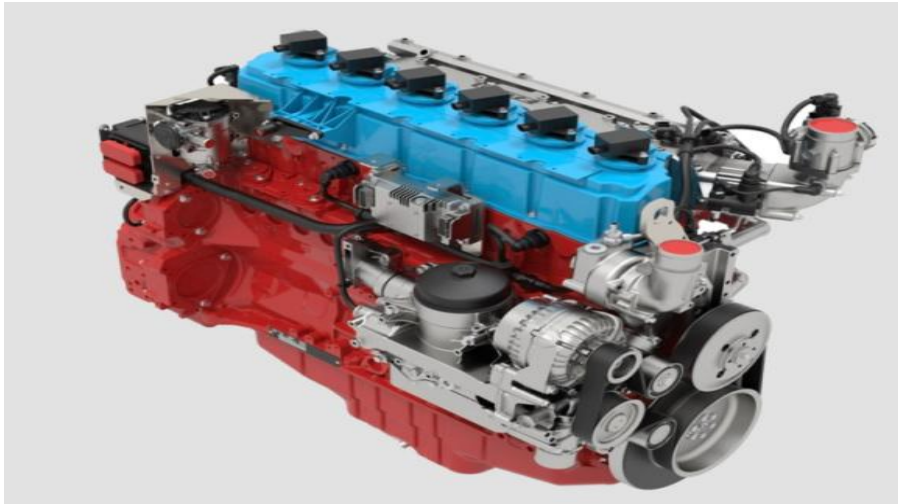


Рис. 3. Водневий двигун TCG 7.8 H₂ від компанії Deutz



Рис. 4. Гібридний потяг RS ZERO

- Компанії Vossloh Rolling Stock і Duisportrail представили **Modula BFC** (рис. 5), новий локомотив на акумуляторно-водневих паливних елементах
- Локомотив **SM42-6 Dn** – результат співробітництва компанії Pesa із залізницями Польщі та компанією PKN Orlen.
- Компанія Canadian Pacific Kansas City (CPKC) нещодавно провела перші випробування водневих локомотивів **CP 1200** (рис. 6), які можуть змінити ринок вантажоперевезень.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



Рис. 5. Локомотив на акумуляторно-водневих паливних елементах Modula BFC



Рис. 6. Водневі локомотиви СРКС на випробуваннях

Нині водень претендує на статус одного з основних каталізаторів енергетичної трансформації у напрямку сталого розвитку суспільства із всеохоплюючим застосуванням відновлювальних джерел енергії. За прогнозами експертів, до 2050 р. попит на водень тільки в Європі має зрости у вісім разів порівняно з 2020 р. (до 2500 ТВт·год на рік) [12].

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Висновок.

Інновації в рейковому транспорті спрямовані на підвищення швидкості, комфортності, безпеки, екологічності та ефективності перевезень. Впровадження цифрових технологій, альтернативних джерел енергії та системи штучного інтелекту є ключовими напрямками тенденцій розвитку галузі.

На основі постійного аналізу ринкових тенденцій розробляються стратегії щодо освоєння нових напрямків розвитку галузі і випуску нової науково-технічної продукції, яка була б корисна для потенційних замовників.

Для України важливо адаптувати ці тенденції, враховуючи національні особливості та потреби. Адаптація інновацій у залізничному транспорті України – це процес пристосування світових технологічних рішень до українських реалій: технічних, економічних, законодавчих та інфраструктурних. Це не просто впровадження нових технологій, а їх осмислене перенесення з урахуванням національних особливостей. Не тільки технічне копіювання, а глибока інтеграція нових рішень у національний контекст, координація між державою, приватним сектором, наукою та громадським суспільством.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДР № 0125U001177 Звіт про НДР «Аналіз стану, тенденцій і перспектив розвитку галузі з науково-технічного напрямку «Рейковий рухомий склад залізниць» / керівник Сулим А. О., викон. Гладких І. В., Брусило Д. О. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2024. 43 С.
2. Скрипин В. Поезда на магнитной подушке – транспорт, способный изменить мир. URL: <https://itc.ua/articles/poezda-na-magnitnoy-podushke-transport-sposobnyi-izmenit-mir/>
3. Теряев В. І., Ліберт Н. Є. Монорейки КПП: історія магнітного польоту. Київський політехнік. Газета НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 2018. № 3 (3219). С. 6–7. URL: <https://kpi.ua/monorail>
4. Потяги на магнітної подушці – транспорт майбутнього. URL: <https://epa.kpi.ua/science/interesting-info/maglev/>
5. Шанхайський маглев [Електронний ресурс] // Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B0%D0%BD%D1%85%D0%B0%D0%B9%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D0%B2
6. Як технології IoT та штучний інтелект змінюють управління контейнерними перевезеннями. URL: <https://uk.container-trade.net/kak-tehnologii-iot-i-iskusstvennyj-intellekt-menyayut-upravlenie-kontejnernymi-perevozkami/>
7. Ложачевська О. М., Марціпака В. М. Інноваційний розвиток транспортного комплексу в умовах цифрової трансформації. Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління. 2023. № 10. DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-10>
8. Як потяги в Голландії працюють на 100% від енергії вітру. URL: https://uk.renovablesverdes.com/los-trenes-holanda-funcionan-al-100-energia-eolica/#google_vignette
9. Оператор Renfe прагне стати більш енергонезалежним, будуючи сонячні електростанції. URL: <https://www.railtech.com/policy/2023/10/09/renfe-aims-to-become-more-energy-independent-by-building-solar-plants/>
10. SNCF to install solar panels on 1.1 million m2 of station areas by 2030. URL: <https://www.railtech.com/infrastructure/2022/02/23/sncf-to-install-solar-panels-on-1-1-million-m2-of-station-areas-by-2030>
11. Брусило Д. О., Гладких І. В. Водневі технології у залізничному транспорті: аналіз перспектив впровадження на основі інноваційних рішень, представлених на InnoTrans 2024. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2018. Вип. 29. С. 61-71. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-29-61-71>
12. Водневі локомотиви СРКС: перші випробування та майбутнє залізничного транспорту. URL: <https://www.railway.supply/uk/vodnevi-lokomotivi-cpkc-pershi-viprobuvannya-ta-majbutnje-zaliznichnogo-transportu>

I. V. Hladkykh

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine
Tel.: (063) 171 5009, E-mail: innagladkih59@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

D. O. Brusylo

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine
Tel.: (096) 205 5692, E-mail: tyschkovez28@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9976-0793>

PROMISING PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF INNOVATIVE RAIL TRANSPORT IN THE WORLD

The article examines the prospects for the introduction of innovative rail rolling stock for railways and urban transport in the world. The innovative solutions used by manufacturers in the latest rail transport technologies are analysed, with an emphasis on their potential to reduce greenhouse gas emissions and transition to environmentally friendly modes of transport.

An overview of the most relevant trends and technologies, such as: Maglev (magnetic levitation); electrification and renewable energy sources; introduction of the Internet of Things and artificial intelligence, that is, intelligent maintenance and digital transformation, use of artificial intelligence to predict the technical condition of equipment.

For example, technologies such as the Internet of Things allow containers to be equipped with smart sensors that collect and transmit data in real time. This makes it possible to track many parameters, including: the location of the container using GPS, temperature and humidity inside refrigerated containers, the condition of the cargo, the level of vibration or light (which may indicate an attempt to open the cargo) and much more information necessary for traffic safety. This transparency allows shippers and carriers to respond to any deviations in a timely manner.

The article also highlights the integration of artificial intelligence in the management of passenger flows in urban rail transport. Models that combine graph neural networks allow for accurate forecasting of passenger flows in urban rail transport.

And also, environmental innovations, i.e., transition from diesel to hybrid autonomous trains. One of the most promising areas for overcoming these challenges is the development of hydrogen and hybrid technologies. The use of hydrogen technologies in railway transport is becoming increasingly popular among the world's leading companies seeking to reduce CO₂ emissions and increase energy efficiency. This mode of transport demonstrates significant potential for reducing greenhouse gas emissions and gradually replacing diesel locomotives.

Keywords: innovative rail transport, Internet of Things technologies, artificial intelligence, digital transformation, hydrogen engine, environmental solutions, research and innovation.

REFERENCES

1. Hladkykh, I. V., & Brusylo, D. O. (2024). Analiz stanu, tendentsii i perspektyv rozvytku haluzi z naukovo-tekhnichnoho napriamu «Reikovy rukhomyi sklad zaliznyts DR №0125U001177 [Report on the research work 'Analysis of the state, trends and prospects for the development of the industry in the scientific and technical direction 'Rail rolling stock of railways DR №0125U001177']. Sulym A. O. (Ed.) Kremenчук: SE «UkrNDIV», 43 [in Ukrainian]
2. Skripin V. Poezda na magnitnoi podushke – transport, sposobnyj izmenit mir [Magnetic cushion trains - transport that can change the world]. Retrieved from: <https://itc.ua/articles/poezda-na-magnitnoy-podushke-transport-sposobnyiy-izmenit-mir/>
3. Teriaiev, V. I., & Libert, N. E. (2018). Monoreiky KPI: istorii a mahnytnoho polotu [KPI monorails: the history of magnetic flight]. Kyivskyi politekhnika. Hazeta NTUU «KPI im. Ihoria Sikorskoho» - Kyiv Polytechnic. Newspaper of NTUU 'KPI', 3 (3219), 6-7. Retrieved from: <https://kpi.ua/monorail> [in Ukrainian]
4. Potiagy na mahnytnoi podushtsi – transport maibutnoho [Trains on a magnetic cushion - transport of the future. Retrieved from: <https://epa.kpi.ua/science/interesting-info/maglev/> [in Ukrainian]
5. Shangkhaisky mahlev [Shanghai Maglev]. Vikipediia - Wikipedia. Retrieved from: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B0%D0%BD%D1%85%D0%B0%D0%B9%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D0%B2 [in Ukrainian]
6. Yak tekhnolohii IoT ta shtuchnyi intelekt zminiuiut upravlinnia konteineronymy perevezenniamy [How IoT technologies and artificial intelligence are changing the management of container transportations]: Retrieved from: <https://uk.container-trade.net/kak-tehnologii-iot-i-iskusstvennyj-intellekt-menyayut-upravlenie-kontejnernymi-perevozkami/> [in Ukrainian]
7. Lozhachevska, O. M., & Martsipaka, V. M. (2023). Innovatsiyni rozvytok transportnoho kompleksu v umovakh tsyfrovoi transformatsii [Innovative development of the transport complex in the context of digital transformation]. Problemy suchasnykh transformatsii. Seriya: ekonomika ta upravlinnia - Problems of modern transformations. Series: Economics and Management, 10. Retrieved from: <https://reicst.com.ua/pmt/article/view/2023-10-04-10> DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-10> [in Ukrainian]
8. Yak potiagy v Hollandi pratsuiut na 100% vid enerhii vitru [How trains in Holland run on 100% wind power]. Retrieved from: https://uk.renovablesverdes.com/los-trenes-holanda-funcionan-al-100-energia-eolica/#google_vignette [in Ukrainian]
9. Operator Renfe prahne staty bilsh enerhonezalezhnym, buduichy soniachni elektrostantsii [Renfe aims to become more energy independent by building solar power plants]. Retrieved from: <https://www.railtech.com/policy/2023/10/09/renfe-aims-to-become-more-energy-independent-by-building-solar-plants/> [in Ukrainian]
10. SNCF to install solar panels on 1.1 million m2 of station areas by 2030. Retrieved from: <https://www.railtech.com/infrastructure/2022/02/23/sncf-to-install-solar-panels-on-1-1-million-m2-of-station-areas-by-2030>
11. Brusylo, D. O., & Hladkykh I. V. (2024) Vodnevi tekhnolohii u zaliznychnomu transporti: analiz perspektiv vprovadzhennia na osnovi innovatsiynykh rishen, predstavlenykh na InnoTrans. Zbirnyk naukovykh prats SE «UkrNDIV» «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific papers of SE «UkrNDIV» Railbound rolling stock, 24, 7–20. Kremenчук: SE «UkrNDIV». DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-29-61-71> [in Ukrainian]
12. Vodnevi lokomotyvy CPKC: pershi vyprobuvannia ta maibutnie zaliznychnoho transportu [CPKC hydrogen locomotives: first tests and the future of rail transport]. Retrieved from: <https://www.railway.supply/uk/vodnevi-lokomotivi-cpkc-pershi-viprobuvannya-ta-majbutn%D1%94/> [in Ukrainian]

А.О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Телефон: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

Ю.С. Павленко

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Телефон: (05366) 6-12-57, E-mail: usp.mmm.un@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8612-3228>

О.І. Войтенко

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна

Телефон: (05366) 6-12-57, E-mail: a.nikolina1985@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0009-0008-8345-4054>

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ПОШКОДЖЕНЬ КУЗОВІВ ВАГОНІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ З ВИЧЕРПАНИМ СТРОКОМ СЛУЖБИ

В статті обґрунтовано необхідність проведення науково-експериментальних досліджень щодо аналізування механічних пошкоджень кузовів вагонів метрополітену. Виконано оцінку технічного стану обстежуваних кузовів вагонів метрополітену, що експлуатувалися коліями комунального підприємства «Київський метрополітен», з метою виявлення механічних пошкоджень.

Проаналізовано результати науково-експериментальних досліджень кузовів і рам вагонів метрополітену різних серій та моделей, які мають вичерпаний строк служби та експлуатуються від 30 до 60 років, щодо наявності механічних пошкоджень. Обрано в якості об'єктів досліджень кузови вагонів метрополітену серій Д, Є та їх модифікацій, а також моделей Єм-501, 81-502, 81-710, 81-714, 81-717, 81-714.5, 81-717.5. При цьому об'єкти досліджень експлуатувались в різних умовах: на Святошинсько-Броварській, Оболонсько-Теремківській, Сирецько-Печерській лініях комунального підприємства «Київський метрополітен» з обслуговуванням в електродепо «Дарниця», «Оболонь», «Харківське» відповідно.

Наведено класифікацію механічних пошкоджень кузовів вагонів залежно від місця їх виникнення та критерії виключення з інвентарного парку кузовів вагонів метрополітену за наявністю в них механічних пошкоджень. Перелічено виявлені механічні пошкодження у кузовах та рамах вагонів метрополітену, що експлуатувались у комунальному підприємстві «Київський метрополітен». Визначено моделі вагонів метрополітену, у яких зафіксовано найбільшу кількість механічних пошкоджень.

© Сулим А.О., Павленко Ю.С., Войтенко О.І., 2025

Визначено, що механічні пошкодження кузова вагона метрополітену в меншій мірі залежать від його конструктивного виконання, а в більшій мірі від умов експлуатації. Механічні пошкодження зафіксовані у кузовах вагонів метрополітену, які експлуатуються на Оболонсько-Теремківській та Сирецько-Печерській лініях комунального підприємства «Київський метрополітен». При цьому механічні пошкодження кузовів вагонів метрополітенів, що експлуатуються на Святошинсько-Броварській лінії, відсутні. Визначено найбільш характерні типи механічних пошкоджень кузовів вагонів метрополітену. У більшості випадків механічні пошкодження кузовів обстежуваних вагонів метрополітену відсутні, а їх технічний стан оцінюється як задовільний, з можливістю подовження строку служби та подальшого корисного використання.

Ключові слова: вагон метрополітену, дослідження, кузов, металоконструкція, механічне пошкодження, строк служби, технічний стан.

Вступ та постановка проблеми. Наразі інвентарні парки метрополітенів нашої країни складаються переважно із фізично та морально застарілих вагонів серії Є та їх модифікацій, а також вагонів моделей 81-714, 81-717, 81-718, 81-719, 81-714.5, 81-717.5, що виготовлені у 1970-1995 роках. В нинішніх реаліях у комунальних підприємств України недостатньо коштів для інтенсивного оновлення та модернізації свого інвентарного парку [1].

Починаючи з 1999 року, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» (ДП «УкрНДІВ») постійно співпрацює з комунальним підприємством «Київський метрополітен» (КП «КМ») у напрямку виконання науково-експериментальних досліджень з технічного діагностування кузовів вагонів метрополітену з вичерпаним строком служби з метою можливості їх подальшого корисного використання та подовження терміну служби. Проведення таких робіт дозволяє підтримувати в Україні необхідну чисельність експлуатаційного парку вагонів метрополітену та забезпечувати потрібний обсяг пасажирських перевезень підземним міським електротранспортом.

Подовження строку служби кузовів вагонів метрополітену виконують згідно розроблених та погоджених встановленим порядком методик досліджень, які передбачають проведення технічного діагностування кожного окремого вагона метрополітену. Під час технічного діагностування аналізують механічні та корозійні пошкодження кузовів вагонів метрополітену з визначенням їх фактичних величин методами неруйнівного контролю. Потім порівнюють отримані фактичні величини пошкоджень та зносів з допустимими значеннями, встановленими в нормативній документації та методиках досліджень. За результатами проведення науково-експериментальних досліджень оформлюють технічні рішення, в яких зазначаються можливості подальшої експлуатації та корисного використання обстежених кузовів вагонів метрополітену.

Аналіз останніх досліджень. Питання технічного діагностування, проведення науково-експериментальних досліджень щодо можливості модернізації з подальшим подовження строку служби вагонів метрополітену розглядалися в роботах [2–7]. З робіт [2–4] відомо, що вагони метрополітену серії Є та їх модифікації, а також вагони моделей 81-714/717 добре себе зарекомендували в експлуатації. Навіть після 30-45 років експлуатації металоконструкції їх кузовів мають в цілому задовільний технічний стан. Це дало підставу очікувати, що металоконструкції кузовів таких вагонів можуть мати значний залишковий ресурс та можливість подовження строку їх експлуатації. Зазначені очікування були підтверджені результатами нау-

ково-експериментальних досліджень залишкового ресурсу металоконструкцій кузовів вагонів метрополітену серії Є та вагонів моделей 81-714/717, проведених фахівцями ДП «УкрНДІВ» у 2011 та 2018 роках [2–4]. За результатами вказаних досліджень визначено, що металоконструкції кузовів вагонів метрополітену серії Є та їх модифікацій, що знаходяться в експлуатації більше 45 років та вагони моделей 81-714/717, що експлуатуються в умовах КП «КМ» майже 40 років, мають залишковий ресурс від 20 до 22 років відповідно. Отримані результати досліджень стали підставою для прийняття рішень про можливість модернізації з подовженням строку експлуатації вагонів метрополітену серії Є та їх модифікацій, а також вагонів моделей 81-714/717 інвентарного парку КП «КМ».

В роботі [5] наведено результати обстеження технічного стану вагонів моделей 81-714/717 після тривалої експлуатації. Виконано серію розрахунків на міцність методом кінцевих елементів їх металоконструкцій з урахуванням фактичного і прогнозного технічного стану основних несних елементів. Наведено результати експериментальних досліджень напруженого стану кузовів вагонів метрополітену. Оцінено розрахунково-експериментальним методом залишковий ресурс металоконструкцій кузовів вагонів метрополітену моделей 81-714/717 після їх тривалої експлуатації. Показано, що після закінчення вагонами нормативного строку служби, виходячи з критерію втомної міцності, ці вагони мають залишковий ресурс та можливе подовження строку їх експлуатації на 5 років і більше.

В статті [6] наведено результати проведених науково-експериментальних досліджень технічного стану та залишкового ресурсу металоконструкцій кузовів вагонів метрополітену типу Єма-502, побудованих у 1979 році, які експлуатуються в умовах Тбіліського метрополітену.

В роботі [7] розглянуто позитивний досвід комплексної модернізації з подовженням строку експлуатації вагонів метрополітену серії Є та порядок проведення робіт з модернізації.

Таким чином, за результатами досліджень [2–7] встановлено наявність залишкового ресурсу та можливість подальшої експлуатації вагонів метрополітену серії Є та їх модифікацій, а також вагонів моделей 81-714/717. Однак в розглянутих роботах не розглянуто питання щодо визначення характерних типів механічних пошкоджень залежно від серії (моделі) обстежуваного вагона. Так, в роботі [5] лише частково порушувалось питання механічних пошкоджень кузовів вагонів метрополітену після тривалої експлуатації. Зокрема, визначено характерні місця появи тріщин та наявності механічних пошкоджень під час тривалої експлуатації в несних металоконструкціях вагонів метрополітену моделей 81-714/717. Однак в жодній із наведених робіт детально не розглянуто питання, яким чином різні умови експлуатації впливають на інтенсивність виникнення механічних пошкоджень і, навпаки, який вплив здійснюють однакові умови експлуатації на кузова різних серій (моделей) вагонів метрополітену. Тому в цій роботі пропонується детальніше зупинитись на цих питаннях.

Мета статті – аналізування результатів науково-експериментальних досліджень щодо механічних пошкоджень кузовів вагонів метрополітену залежно від їх серії (моделей) та умов експлуатації.

Матеріал та результати досліджень. У період з 2016 по 2024 роки фахівцями ДП «УкрНДІВ» на коліях КП «КМ» були проведені науково-експериментальні дослідження металоконструкцій кузовів вагонів метрополітену, побудованих у 1955-1993 роках. Науково-експериментальні дослідження технічного стану кузовів вагонів метрополітену виконувались в електродепо «Дарниця», «Оболонь», «Харківсь-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ке» КП «КМ». При цьому обстежувані кузови вагонів метрополітену експлуатувались на різних лініях КП «КМ»: Святошинсько-Броварській, Оболонсько-Теремківській, Сирецько-Печерській лінії. Об'єктами науково-експериментальних досліджень були кузови вагонів метрополітену з вичерпаним строком служби:

- кузови вагонів метрополітену серії Є та їх модифікацій, побудови Митищинського машинобудівного заводу;
- кузови вагонів метрополітену моделей Ем-501, 81-502, 81-710 побудови Ленінградського вагонобудівного заводу (ЛВЗ) ім. І.Є. Єгорова;
- кузови службових вагонів метрополітену серії Є та Д, побудованих на Митищинському машинобудівному заводі;
- кузови вагонів метрополітену моделі 81-714/717 та їх модифікацій, побудовані на Митищинському машинобудівному заводі (ВО «Метровагонмаш») або ЛВЗ ім. І.Є. Єгорова.

Зовнішній вигляд вагонів метрополітену, яким проведено науково-експериментальні дослідження кузовів та рам, зображено на рис. 1.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Вагони метрополітену серії або моделі:

а – «Єж»; б – «Д»; в – Єм-501; г – 81-502; д – 81-717; е – 81-714

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

У цей період було виконано технічне діагностування 403 кузовів і рам вагонів метрополітену зазначених серій (моделей) та їх модифікацій, з яких 394 вагони використовувались для перевезення пасажирів, а інші 9 обстежених вагонів знаходились у службовому користуванні (вагони-колісвимірювачі, вагони електровози, переобладнані у вантажні вагони тощо). При цьому із загальної кількості обстежених вагонів 231 вагон експлуатувався на Оболонсько-Теремківській лінії з обслуговуванням в електродепо «Оболонь»; 86 вагонів – на Святошинсько-Броварській лінії з обслуговуванням в електродепо «Дарниця»; 86 вагонів – на Сирецько-Печерській лінії з обслуговуванням в електродепо «Харківське».

Науково-експериментальні дослідження несних металоконструкцій кузовів вагонів метрополітену було проведено згідно вимог методик технічного діагностування вагонів метрополітену [8, 9] з використанням засобів візуального, ультразвукового, магнітопорошкового контролю (рис. 2).

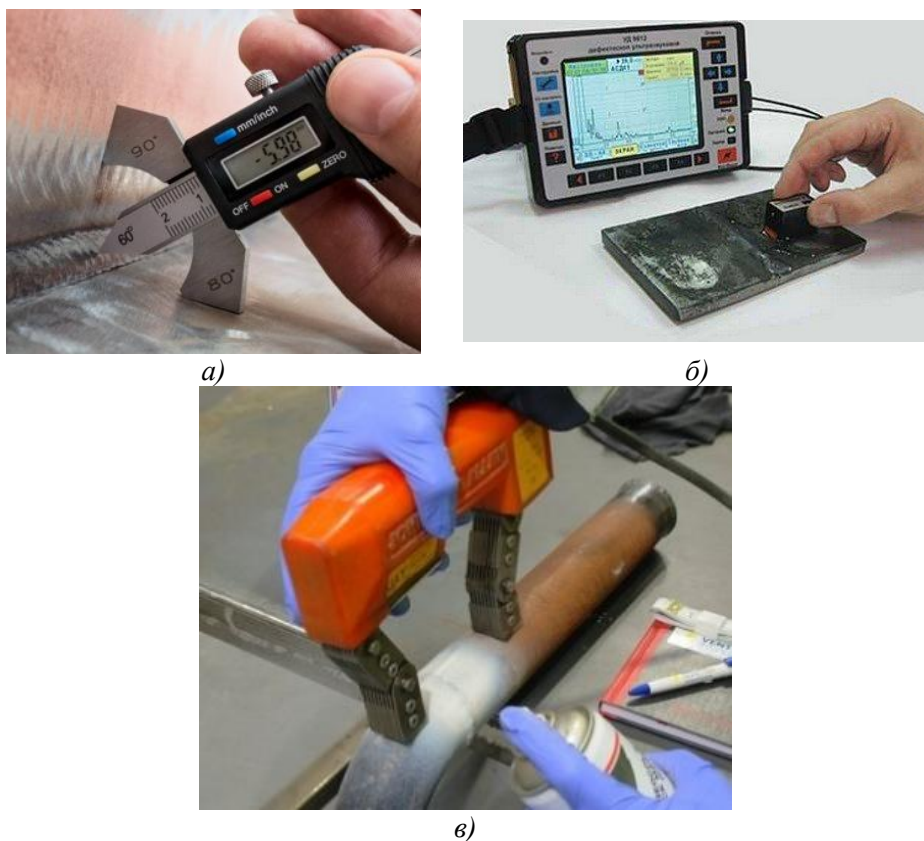


Рис. 2. Засоби контролю пошкоджень під час обстежень:

а – візуального; б – ультразвукового; в – магнітопорошкового

Згідно наведених методик [8, 9] всі виявлені механічні пошкодження під час технічного діагностування кузовів метрополітену групувались наступним чином: пошкодження хребтової балки (01), шворневої балки (02), поздовжніх балок рами (03), поперечних балок рами (04), настилу підлоги (05), підвіконних стійок бокової

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

стіни (06), обшиви бокової стіни (07), вертикальних стійок бокових стін (08), обшиви кінцевої та лобової частини кузова (09), обшиви даху (10).

Також кожен із обстежуваних кузовів вагонів метрополітену перевірявся на наявність таких критеріїв (механічних пошкоджень), згідно яких такий вагон має бути виключено з інвентарного парку [8, 9]: тріщина верхнього, нижнього або вертикального листа хребтової балки; тріщини або розриви елементів шворневої балки у вузлі з'єднання її з хребтовою балкою, що не підлягають ремонту; наскрізна тріщина горизонтальної або вертикальної полиці поздовжньої балки; горизонтальний більше ніж 100 мм або вертикальний прогин більше ніж 200 мм хребтової або поздовжньої балки; - відхилення від площинності кузова більше ніж 75 мм; відхилення від площинності рами більше 200 мм.

За результатами технічного обстеження стану кузовів вагонів метрополітену з вичерпаним строком служби визначено наявність таких механічних пошкоджень: ремонтний зварний шов довжиною до 30 мм на вертикальній стінці шворневої балки у районі першого візка зліва (код 02); ремонтний зварний шов довжиною до 40 мм на вертикальній стінці шворневої балки у районі першого візка справа (код 02); ремонтний зварний шов довжиною до 40 мм на вертикальному листі шворневої балки у районі першого візка зліва (код 02); ремонтний зварний шов довжиною до 40 мм на вертикальному листі шворневої балки у районі першого візка зліва (код 02); ремонтний зварний шов довжиною до 20 мм на вертикальному листі шворневої балки у районі першого візка зліва (код 02); ремонтний зварний шов довжиною до 30 мм на вертикальному листі шворневої балки у районі першого візка справа (код 02); ремонтний зварний шов довжиною до 20 мм на вертикальному листі шворневої балки у районі кондуїтного вікна першого візка (код 02); прогин бокових поздовжніх балок рами у вертикальній площині до 30 мм (код 03); тріщина у вікна заварена (код 03);

Результати технічного обстеження стану кузовів вагонів на наявність механічних пошкоджень наведено на рис. 3, 4.

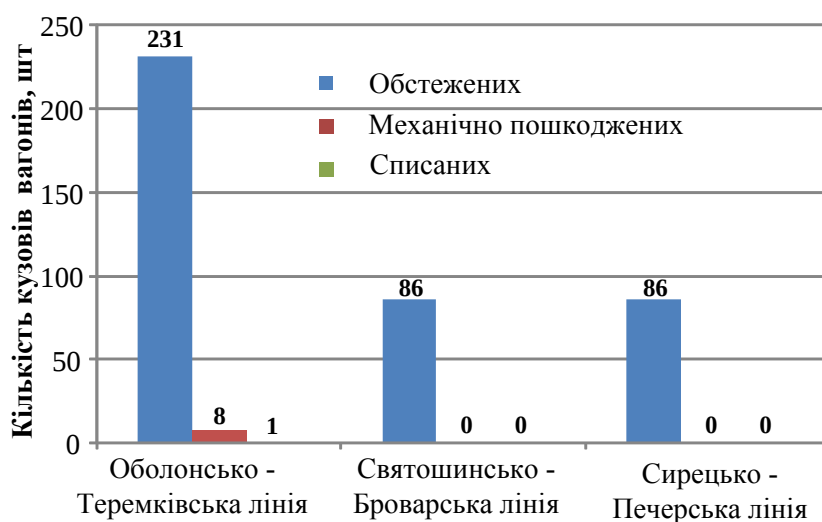


Рис. 3. Порівняльна гістограма кількості обстежених, механічно пошкоджених, списаних вагонів залежно від умов їх експлуатації

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

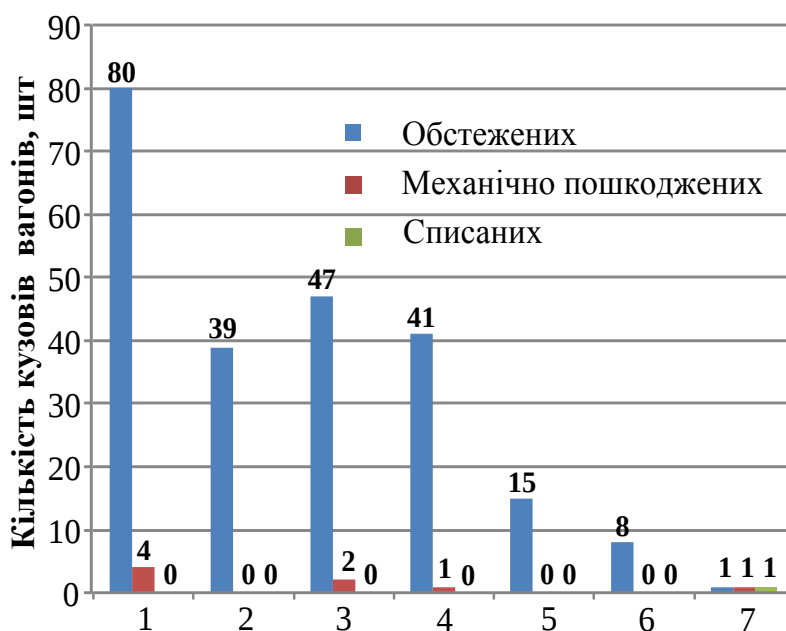


Рис. 4. Порівняльна гістограма кількості обстежених, пошкоджених, списаних вагонів на Оболонсько-Теремківській лінії залежно від моделі:

1 – 81-717 виробництва ЛВЗ ім. І.С.Сгорова; 2 – 81-714 виробництва ЛВЗ ім. І.С. Сгорова;
3 – 81-717 виробництва Митищинського машинобудівного заводу; 4 – 81-714 виробництва
Митищинського машинобудівного заводу; 5 – 81-714.5 виробництва ВО «Метровагонмаш»;
6 – 81-717.5 ВО «Метровагонмаш»; 7 – 81-710 виробництва ЛВЗ ім. І.С.Сгорова

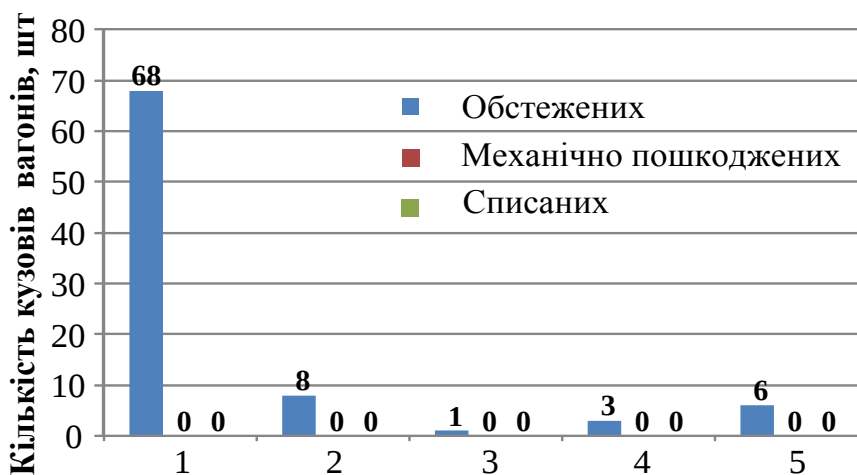


Рис. 5. Порівняльна гістограма кількості обстежених, пошкоджених, списаних вагонів на Святошинсько-Броварській лінії залежно від серії (моделі):

1 – Еж виробництва Митищинського машинобудівного заводу; 2 – Єм-501 виробництва ЛВЗ ім.
І.С. Сгорова; 3 – 81-502 виробництва ЛВЗ ім. І.С. Сгорова; 4 – Є виробництва Митищинського маши-
нобудівного заводу; 5 – Д виробництва Митищинського машинобудівного заводу

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

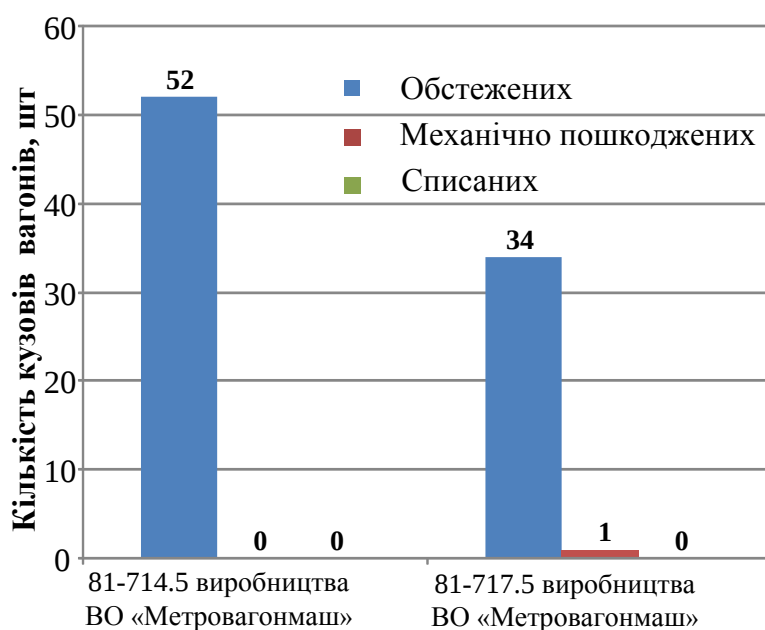


Рис. 6. Порівняльна гістограма кількості обстежених, пошкоджених, списаних вагонів на Сирецько-Печерській лінії залежно від моделі

За аналізом результатів науково-експериментальних досліджень кузовів вагонів метрополітену з вичерпаним нормативним строком служби на наявність механічних пошкоджень встановлено наступне.

1. Механічні пошкодження зафіксовані у несних конструкціях вагонів моделей 81-710 (зав. № 5823, 1975 року побудови, виробництва ЛВЗ ім. І.Є. Єгорова), 81-717 (зав. №№ 8408, 8431, 8443, 8446, 1980-1981 років побудови, виробництва ЛВЗ ім. І.Є. Єгорова), 81-717 (зав. №№ 9260, 9262, 9644, 1982 року побудови, виробництва Митищинського машинобудівного заводу), 81-717.5 (зав. №№ 0188, 1989 року побудови, виробництва ВО «Метровагонмаш»), що експлуатувались на Оболонсько-Теремківській та Сирецько-Печерській лініях. При цьому механічних пошкоджень у вагонах, що експлуатувались на Святошинсько-Броварській лінії, не зафіксовано.

2. Виключено з інвентарного парку 1 з-поміж обстежених 403 кузовів вагонів метрополітену, а саме вагон моделі 81-710 (зав. № 5823, 1975 року побудови, виробництва ЛВЗ ім. І.Є. Єгорова), за наявності такого механічного пошкодження: прогин бокових поздовжніх балок рами у вертикальній площині до 30 мм (код 03)

3. Визначено, що найбільш характерним типом механічних пошкоджень для кузовів вагонів метрополітену, є наявність зварних швів на вертикальному листі шворневої балки (код несправності – 02).

4. Встановлено, що інтенсивність виникнення механічних пошкоджень не має явно вираженої закономірності залежно від конструктивно виконання кузовів вагонів (виключення має вагон моделі 81-710, але вибірка кількості обстежених кузовів вагонів цієї моделі відсутня, що є недостатньою умовою для підтвердження або спростування цього судження). Проте майже всі механічні пошкодження зафіксо-

вані у кузовів вагонів, які експлуатувалися на Оболонсько-Теремківській лінії, що свідчить про вплив умов експлуатації на виникнення механічних пошкоджень.

5. У більшості випадків пошкодження механічного характеру несних конструкцій на обстежуваних кузовах вагонів метрополітену з вичерпаним нормативним строком служби відсутні, що свідчить про їх задовільний технічний стан та можливість продовження строку експлуатації.

Висновки. За результатами виконаних науково-експериментальних досліджень щодо аналізу механічних пошкоджень кузовів вагонів метрополітену визначено експлуатаційні умови та конструктивне виконання кузовів вагонів метрополітену, у яких зафіксовано механічні пошкодження несних конструкцій; наведено механічне пошкодження кузова вагона, за яким його було виключено з інвентарного парку КП «КМ»; встановлено відсутності залежності виникнення механічних пошкоджень від типу обстежуваного кузова вагона метрополітену, проте визначено, що існує залежність кількості механічних пошкоджень від умов експлуатації; визначено найбільш характерний тип механічних пошкоджень вагонів метрополітену. В цілому у більшості випадків (за виключенням поодинокого випадку) пошкодження механічного характеру несних конструкцій на кожному із розглянутих типів обстежуваних вагонів з завершеним строком служби відсутні, що свідчить про наявність запасу міцності цих конструкцій та можливості продовження строку експлуатації вагонів метрополітену на визначений термін.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сулим А.О., Мужичук С.О., Хозя П.О., Павленко Ю.С., Єжов Ю.В. Сучасний стан та перспективи розвитку парку рухомого складу метрополітену. Залізничний транспорт України. 2019. № 3. С. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-14-20>
2. Звіт про НДР. РК 0111U006307. Дослідження стану несучих металокопункцій кузовів вагонів метрополітену (серії Е та її модифікацій) з метою визначення їх залишкового ресурсу та продовження терміну експлуатації. Керівник: Єжов Ю.В. Виконавці: Донченко А.В., Троцький М.І., Ткачов В.І., Швець А., Серета Т.А., Бондарева І.Ю. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2011. 145 с.
3. Звіт про НДР. РК 0119U102463. Розробка нормативно-технічної документації технічного діагностування вагонів метрополітену серії 81-717/714 та її модифікацій. Керівник: Єжов Ю.В. Виконавці: Павленко Ю.С., Алексєєв Д.А., Бреславець Т.А., Сафонов О.М., Семко Ж.О., Хозя П.О., Холод К.Ю., Столетов С.О. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2018. 138 с.
4. Єжов Ю.В., Павленко Ю.С., Войтенко О.І., Полулях С.М. Дослідження технічного стану несучих металокопункцій кузовів вагонів метрополітену моделей 81-717/714 та їх модифікацій. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2018. Вип. 17. С. 22–28.
5. Пуятю А.В. Оценка ресурса несущих конструкций вагона метрополитена моделей 81-717 и 81-714 после длительной эксплуатации. Залізничний транспорт України. 2022. № 1. С. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2022-142-1-04-13>
6. Єжов Ю.В., Павленко Ю.С., Войтенко О.І., Полулях С.М. Дослідження технічного стану несучих металокопункцій кузовів вагонів типу Ема-502 Тбіліського метрополітену. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2018. Вип. 17. С. 36–45.
7. Войтенко О.І. Дослідження модернізації вагонів метрополітену в Україні як альтернативи придбанню нового рухомого складу та порядку проведення робіт з модернізації. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2018. Вип. 17. С. 29–35.
8. Методика технічного діагностування вагонів метрополітену, що виступили призначений термін, з метою його продовження. 2011. Кременчук, ДП «УкрНДІВ». 18 с.
9. М 4.1.00718. Вагони метрополітену моделі 81-717/714 та їх модифікації. Методика технічного діагностування. 2018. Кременчук, ДП «УкрНДІВ». 35 с.

A.O. Sulym

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

Yu.S. Pavlenko

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: (05366) 6-12-57, E-mail: usp.mmm.un@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8612-3228>

O.I. Voitenko

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: (05366) 6-12-57, E-mail: a.nikolina1985@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0009-0008-8345-4054>

STUDY OF MECHANICAL DAMAGE TO METRO CAR BODIES WITH EXPIRED SERVICE LIFETIME

The article substantiates the necessity of carrying out scientific and experimental studies to analyse mechanical damage to metro car bodies. The technical condition of the examined metro car bodies, which were operated on the tracks of the municipal enterprise «Kyiv Metro», was assessed in order to identify mechanical damage.

The paper analyses the results of scientific and experimental studies of metro car bodies and frames of different series and models, which have an expired service life and have been in operation with in the period from 30 to 60 years, for the signs of mechanical damage. The bodies of metro cars of the D, E series and their modifications, as well as models Em-501, 81-502, 81-710, 81-714, 81-717, 81-714.5, 81-717.5. The objects of research were operated in different conditions: on the Sviatoshynsko-Brovarska, Obolonsko-Teremkivska, Syretsko-Pecherska lines of the Kyiv Metropolitan utility company with service in Darnytsia, Obolon, and Kharkivske electric depots, respectively.

The article presents a classification of mechanical damages of car bodies depending on the place of their occurrence and criteria for excluding metro car bodies from the inventory fleet due to the presence of mechanical damages. The mechanical damages detected in the bodies and frames of metro cars operated by the municipal enterprise «Kyiv Metro» are listed. The models of metro cars with the highest number of mechanical damages are defined.

It has been determined that mechanical damage to the body of a metro car depends less on its design and more on the operating conditions. Mechanical damages were recorded in the bodies of metro cars operated on the Obolonsko-Teremkivska and Syretsko-Pecherska lines of the Kyiv Metro. At the same time, there are no mechanical damages to the bodies of metro cars operating on the Sviatoshynsko-Brovarska line. The most typical types of mechanical damage to metro car bodies have been identified. In most cases, there are no mechanical damages to the bodies of the examined metro cars, and their technical condition is assessed as satisfactory, with the possibility of extending their service life and further efficient operation.

Keywords: metro car, research, body, metal structure, mechanical damage, service life, technical condition.

REFERENCES

1. Sulym, A. O., Muzhychuk, S. O., Khozia, P. O., Pavlenko, Yu. S., & Yezhov, Yu. V. (2019). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku parku rukhomoho skladu metropolitenu [Current state and prospects of development of the metro rolling stock fleet]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 3, 14–20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-14-20> [in Ukrainian]
2. Yezhov, Yu. V. (Eds.), Donchenko, A. V., Trotskiy, M. I., Tkachov, V. I., Shvets, A., Sereda, T. A., & Bondareva, I. Iu. (2011). Zvit pro NDR. RK 0111U006307. Doslidzhennia stanu nesuchykh metalokonstruktsii kuzoviv vahoniv metropolitenu (serii E ta yii modyfikatsii) z metoiu vyznachennia yikh zalyshkovoho resursu ta prodovzhennia terminu ekspluatatsii [R&D report. RK 0111U006307. Investigation of the state of bearing metal structures of metro car bodies (series E and its modifications) in order to determine their residual life and extend the service lifetime]. Kremenчук: SE «UkrNDIV», 145 [in Ukrainian]
3. Yezhov, Yu. V. (Eds.), Pavlenko, Yu. S., Aleksieiev, D. A., Breslavets, T. A., Safronov, O. M., Semko, Zh. O., Khozia, P. O., Kholod, K. Iu., & Stoliyev, S. O. (2018). Zvit pro NDR. RK 0119U102463. Rozrobka normatyvno-tekhnichnoi dokumentatsii tekhnichnoho diahnostuvannia vahoniv metropolitenu serii 81-717/714 ta yii modyfikatsii [R&D report. RK 0119U102463. Development of regulatory and technical documentation for technical diagnostics of metro cars of 81-717/714 series and its modifications]. Kremenчук: SE «UkrNDIV», 138 [in Ukrainian]
4. Yezhov, Yu. V., Pavlenko, Yu. S., Voitenko, O. I., Poluliakh, S. M. (2018). Doslidzhennia tekhnichnoho stanu nesuchykh metalokonstruktsii kuzoviv vahoniv metropolitenu modelei 81-717/714 ta yikh modyfikatsii [Study of the technical condition of the bearing metal structures of metro car bodies of models 81-717/714 and their modifications]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific papers «Railbound rolling stock»*, 17, 22–28 [in Ukrainian]
5. Putiato, A. V. (2022). Ocenka resursa nesushih konstrukcij vagona metropolitena modelej 81-717 i 81-714 posle dlitelnoj ekspluatatsii [Estimation of the service life of the bearing structures of metro cars of models 81-717 and 81-714 after long-term operation]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 1, 4–13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2022-142-1-04-13>
6. Yezhov, Yu. V., Pavlenko, Yu. S., Voitenko, O. I., & Poluliakh, S. M. (2018). Doslidzhennia tekhnichnoho stanu nesuchykh metalokonstruktsii kuzoviv vahoniv typu Ema-502 Tbiliskoho metropolitenu [Study of the technical condition of load-bearing metal structures of car bodies of Ema-502 type cars of the Tbilisi metro]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific papers «Railbound rolling stock»*, 17, 36–45 [in Ukrainian]
7. Voitenko, O. I. (2018). Doslidzhennia modernizatsii vahoniv metropolitenu v Ukraini yak alternatyvu prydbanniu novoho rukhomoho skladu ta poriadku provedennia robot z modernizatsii [Study of modernisation of metro cars in Ukraine as an alternative to the purchase of new rolling stock and the procedure for carrying out renovation works]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific papers «Railbound rolling stock»*, 17, 29–35 [in Ukrainian]
8. Metodyka tekhnichnoho diahnostuvannia vahoniv metropolitenu, shcho vysluzhyly pryznachenyi termin, z metoiu yoho prodovzhennia [Procedure on technical diagnostics of metro cars that have served their designated service life in order to extend it] (2011). Kremenчук: SE «UkrNDIV», 18 [in Ukrainian]
9. Vahony metropolitenu modeli 81-717/714 ta yikh modyfikatsii. Metodyka tekhnichnoho diahnostuvannia. M 4.1.00718. [Metro cars of model 81-717/714 and their modifications. Procedure on technical diagnostics. M 4.1.00718]. (2018). Kremenчук: SE «UkrNDIV», 35 [in Ukrainian]

О.В. Фомін

Державний університет інфраструктури та технологій
вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна
Телефон: +38 (067) 813-97-88, E-mail: fominaleksejviktorovic@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

О.С. Козинка

Державний університет інфраструктури та технологій
вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна
Телефон: +38 (093) 376-13-73, E-mail: kozynka1520mm@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>

О.В. Зеленський

Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Телефон: +38 (066) 673-26-33, E-mail: alekseyz643@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3292-4706>

О.О. Олениця

Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Телефон: +38 (097) 355-94-13, E-mail: padchenkolena@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-2755>

О.П. Черкашин

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля
вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна
Телефон: +38 (067) 545-88-89, E-mail: alex.digma77@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6871-0860>

ГІБРИДНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВІД ВІБРАЦІЙНОГО ЗНОСУ: ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

У статті розглянуто застосування гібридних покриттів як ефективного засобу захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу. Проведено огляд сучасних матеріалів, що використовуються для створення гібридних покриттів, із фокусом на композиції, які поєднують властивості полімерів, металів та кераміки. Експериментальні дослідження показали, що такі покриття значно знижують швидкість зносу контактних поверхонь під впливом динамічних навантажень, зберігаючи структурну цілісність матеріалу. Здійснено порівняння ефективності різних типів покриттів, проаналізовано

© Фомін О.В., Козинка О.С., Зеленський О.В., Олениця О.О., Черкашин О.П., 2025

їх зчеплення з основним матеріалом, опір тріщиноутворенню та стабільність при тривалому механічному впливі. Окреслено перспективи впровадження гібридних покриттів у залізничну галузь, зокрема у компоненти рейкових вузлів, стрілочних переводів та елементів кріплення. Отримані результати свідчать про високий потенціал гібридних систем у підвищенні довговічності та надійності залізничної інфраструктури. У статті представлено концепцію багатofункціонального гібридного покриття для вантажних вагонів, що поєднує різні типи матеріалів і технологій нанесення для забезпечення комплексного захисту від корозії, зносу, ультрафіолетового випромінювання та механічного впливу. Описано структуру запропонованої системи, обґрунтовано вибір компонентів кожного шару, а також наведено основні техніко-експлуатаційні характеристики. Концепція спрямована на підвищення довговічності рухомого складу та зниження витрат на обслуговування.

Ключові слова: перевезення, механіка, залізничний транспорт, транспортні технології, вагони, промисловість, ремонт, експлуатація, надійність, покриття захисні.

Вступ та постановка проблеми. Залізничні конструкції щодня зазнають інтенсивних вібраційних навантажень. Ці вібрації є невід'ємною частиною експлуатації залізничного транспорту. З часом вони призводять до значного зносу елементів колії, мостів та інших інфраструктурних об'єктів. Вібраційний знос негативно впливає на безпеку руху поїздів. Він також збільшує витрати на обслуговування та ремонт залізничної інфраструктури.

Пошук ефективних методів захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу є актуальним завданням сучасної науки та інженерії. Одним із перспективних напрямів є розробка та застосування гібридних покриттів. Гібридні покриття поєднують у собі властивості різних матеріалів. Це дозволяє досягти оптимального комплексу захисних характеристик. Такі покриття можуть забезпечити високу стійкість до механічного впливу. Вони також здатні ефективно демпфувати вібрації.

Дослідження ефективності гібридних покриттів є важливим кроком. Воно дозволить визначити їхні оптимальні склад та структуру. Науково-дослідні роботи включають експериментальне вивчення поведінки покриттів під впливом вібраційних навантажень. Важливим є моделювання процесів зносу. Це дасть змогу прогнозувати довговічність захисних шарів.

Практичне застосування гібридних покриттів відкриває нові перспективи. Вони можуть бути використані для захисту різних елементів залізничних конструкцій. Застосування таких покриттів може значно подовжити термін їх служби. Це призведе до зменшення частоти ремонтних робіт. Знизяться експлуатаційні витрати. Підвищиться рівень безпеки руху поїздів.

Розробка гібридних покриттів вимагає міждисциплінарного підходу. Необхідна співпраця матеріалознавців, інженерів-механіків та фахівців у галузі залізничного транспорту. Проведення науково-дослідних та практичних робіт у цьому напрямі є інвестицією в майбутнє залізничної галузі. Це сприятиме її сталому розвитку та підвищенню ефективності. Результати досліджень матимуть значний економічний та соціальний ефект. Вони сприятимуть створенню більш надійної та безпечної транспортної системи. Тому актуальність цієї наукової роботи є беззаперечною і своєчасною.

Аналіз останніх досліджень. У статті [1] досліджено гібридні полімерно-металеві покриття для віброізоляції транспортних конструкцій. Автори доводять, що такі матеріали ефективно зменшують вібрації, що підтверджено експериментами та моделюванням. Результати показали переваги гібридних покриттів перед традиційними аналогами за показниками поглинання коливань. Ця робота має практичне значення для транспорту, особливо у аерокосмічній та автомобільній промисловості. Дослідження відкриває перспективи для подальшого вдосконалення віброзахисту конструкцій.

Дослідження [2] аналізує вплив гібридних покриттів на динамічну реакцію механічних конструкцій під час вібрацій. Автори використовували експериментальні методи та числове моделювання, щоб оцінити ефективність покриттів у зменшенні резонансних коливань. Результати показали, що гібридні матеріали значно покращують демпфувальні властивості порівняно зі звичайними покриттями. Ця робота має важливе значення для машинобудування, зокрема для розробки стійких до вібрацій конструкцій. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації систем віброзахисту в промислових умовах.

У науковій роботі [3] розглядаються теоретичні та практичні аспекти визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Автори пропонують методику розрахунку ємності та ефективності таких систем, враховуючи особливості експлуатації у тунелях. Дослідження включало експериментальні випробування, які підтвердили можливість підвищення енергоефективності рухомого складу. Результати мають практичне застосування для гірничодобувної промисловості, зокрема для розробки енергозберігаючих технологій. Робота вносить внесок у розвиток альтернативних джерел живлення для підземного транспорту.

Дослідження [4] присвячене визначенню раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу підземних залізниць. Автори розробили методику розрахунку оптимальної ємності та конфігурації системи, що дозволяє підвищити енергоефективність транспорту. Експериментальні дані підтверджують можливість зменшення енерговтрат та підвищення стабільності роботи системи. Результати мають важливе значення для розвитку енергозберігаючих технологій у громадському транспорті. Дослідження може бути використане для впровадження сучасних систем рекуперації енергії.

У статті [5] представлено інноваційні гібридні покриття на основі акустичних метаматеріалів для придушення вібрацій. Автори демонструють унікальні властивості цих матеріалів, які забезпечують ефективне гашення коливань у широкому частотному діапазоні. Експерименти та моделювання підтверджують високу ефективність покриттів порівняно з традиційними рішеннями. Дослідження відкриває нові перспективи для застосування у авіаційній та автомобільній промисловості. Робота вносить значний внесок у розвиток матеріалів з програмованими акустичними властивостями.

Дослідження [6] присвячене розробці кераміко-полімерних гібридних покриттів для демпфування вібрацій у важкій техніці. Автори доводять, що такі покриття забезпечують високу міцність та ефективне поглинання коливань у агресивних умовах експлуатації. Результати тестувань показали значне зменшення рівня вібрації порівняно зі звичайними матеріалами. Ця робота має важливе практичне значення для машинобудування, зокрема для будівництва та гірничої техніки. Запропоновані рішення можуть значно продовжити термін служби обладнання.

У статті [7] досліджується довговічність несучої конструкції кузова відкритого вантажного вагона з круглих труб під час транспортування на залізничному паромі. Автори аналізують вплив динамічних навантажень на міцність конструкції за допомогою експериментальних та розрахункових методів. Результати показують, що запропонована конструкція має достатню стійкість до експлуатаційних навантажень. Дослідження має практичне значення для забезпечення безпеки перевезень залізничним транспортом. Робота вносить внесок у розвиток методів оцінки надійності вантажних вагонів.

Автори публікації [8] презентують інноваційні гібридні покриття на основі акустичних метаматеріалів для ефективного придушення вібрацій. Автори демонструють унікальні властивості цих структур, здатних поглинати коливання у широкому частотному діапазоні. Експериментально доведено, що запропоновані покриття перевершують традиційні аналоги на 30-40% за показниками віброізоляції. Результати мають значний потенціал для застосування в аерокосмічній та автомобільній промисловості. Дослідження відкриває нові перспективи для розробки «розумних» матеріалів з програмованими механічними характеристиками.

Робота [9] присвячена розробці кераміко-полімерних гібридних покриттів для вібродемпфування у важкому машинобудуванні. Автори детально аналізують взаємозв'язок між мікроструктурою матеріалу та його демпфуючими властивостями. Експерименти підтверджують, що оптимальний вміст керамічних включень (15-20%) забезпечує покращення демпфування на 25% при збереженні механічної міцності. Особлива увага приділена стійкості покриттів до абразивного зносу в екстремальних умовах експлуатації. Результати дослідження вже знайшли застосування при проектуванні гірничо-шахтного обладнання.

У статті [10] розглядається методика визначення динамічних навантажень на напіввагон при його кріпленні в'язкою муфтою до палуби парома. Автори розробили унікальну математичну модель взаємодії «вагон-кріплення-паром» з урахуванням гідродинамічних факторів. Експериментальні дослідження на діючих паромних переправах підтвердили точність моделі з похибкою не більше 8%. Отримані результати дозволяють оптимізувати конструкцію кріплень для підвищення безпеки морських залізничних перевезень. Дослідження має важливе значення для розвитку мультимодальних транспортних систем.

Дослідження [11] аналізує ефективність гібридних покриттів для зменшення вібрацій у залізничній інфраструктурі. Автори провели комплексне тестування різних композитних систем на рейках та елементах вагонів. Найкращі результати показали покриття на основі поліуретану з мікросферами, що знижують рівень вібрації на 15-20 дБ. Особливу увагу приділено довговічності покриттів при циклічних навантаженнях - експерименти підтвердили збереження властивостей після 1 млн. навантажувальних циклів. Результати дослідження вже впроваджуються на європейських залізницях.

Стаття [12] описує розробку наноструктурованих гібридних покриттів для вібропоглинання в механічних системах. Автори запропонували інноваційний підхід до створення шаруватих структур з градієнтним розподілом властивостей. Детальне дослідження методом атомно-силової мікроскопії виявило унікальні дисипативні характеристики нанорозмірних включень. Експерименти показали, що такі покриття здатні поглинати до 90% енергії ударних коливань. Дослідження відкриває нові можливості для створення адаптивних віброізолюючих систем у прецизійній техніці.

Наукове дослідження [13] присвячене дослідженню металевих покриттів з віскоеластичними добавками для зменшення вібрацій в автомобільних компонентах. Автори детально вивчили вплив типу та концентрації полімерних добавок на демпфуючі властивості покриттів. Оптимальний склад (5-7% поліуретанових мікросфер) забезпечує зниження рівня вібрацій на 35% без втрати адгезійних властивостей. Особливістю дослідження є комплексний підхід, що поєднує лабораторні випробування з польовими тестами на діючих автомобілях. Результати знайшли застосування при виробництві двигунів і трансмісій.

Дослідження [14] впроваджує графен-зміцнені гібридні покриття для віброподавлення в аерокосмічних конструкціях. Автори демонструють, що додавання 0,5-1,5% графену підвищує демпфувальні властивості покриттів на 40-60% порівняно з традиційними аналогами. Особливу увагу приділено термостійкості матеріалів (до 300°C), що критично важливо для аерокосмічних застосувань. Дослідження включало комплексні механічні тести та мікроструктурний аналіз, які підтвердили однорідний розподіл графену в матриці. Результати відкривають нові перспективи для створення легких та ефективних віброізолюючих систем у авіабудуванні.

Робота [15] аналізує гібридні демпфуючі покриття для зниження вібрацій в автомобільних конструкціях. Автори розробили новий клас матеріалів на основі полімерно-металевих композитів з градієнтною структурою. Експерименти показали, що запропоновані покриття знижують рівень шуму в салоні на 5-8 дБ у низькочастотному діапазоні (50-500 Гц). Особливістю дослідження є комплексний підхід, що поєднує лабораторні випробування з польовими тестами на діючих автомобілях. Результати мають безпосереднє застосування для підвищення комфорту пасажирів та довговічності кузовних елементів.

Дослідження [16] презентує інноваційні гібридні покриття на основі волокнисто-металевих ламінатів для морських та автомобільних застосувань. Автори доводять, що комбінація карбонових волокон з алюмінієвими шарами забезпечує оптимальний баланс міцності та демпфування. Експерименти в умовах підвищеної вологості показали збереження властивостей матеріалів протягом 1000 годин експозиції. Важливим результатом є зниження маси конструкцій на 15-20% при поліпшенні вібродемпфування на 30%. Дослідження має значний потенціал для застосування у суднобудуванні та електромобілях.

Стаття [17] описує розробку мультифункціональних гібридних покриттів з одночасними вібродемпфуючими та антикорозійними властивостями. Автори запропонували унікальну композицію на основі епоксидних смол з наночастинками кераміки та полімерними мікрокапсулами. Результати показали коефіцієнт демпфування до 0,15 і стійкість до соляного туману понад 2000 годин. Особливістю дослідження є промислові випробування на обладнанні металургійних підприємств, які підтвердили збільшення ресурсу деталей у 1,5-2 рази. Ці покриття особливо перспективні для важкої техніки, що працює в агресивних середовищах.

Дослідження [18] запропонувало біонічні гібридні покриття для пасивного віброконтролю в легких автомобільних конструкціях. Натхненні структурою кісток та рослинних тканин, автори створили матеріали з ієрархічною пористою структурою. Оптимізована архітектура покриттів забезпечує ефективне розсіювання енергії коливань (до 70%) при збільшенні маси лише на 3-5%. Випробування на панелях кузова демонструють зниження резонансних піків на 20-25 дБ. Ця робота відкриває нові можливості для створення екологічних та енергоефективних матеріалів у транспортному машинобудуванні.

З проведеного аналізу літератури чітко випливає, що питання вивчення гібридних покриттів як ефективного засобу захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу залишається недостатньо дослідженим. Незважаючи на значущість проблеми зношування елементів залізничної інфраструктури під дією вібрацій, наукові роботи, присвячені саме гібридним підходам у створенні захисних покриттів, є обмеженими. Більшість існуючих досліджень зосереджуються на традиційних методах або окремих типах покриттів, не розглядаючи синергетичний ефект від комбінування різних матеріалів та технологій. Відсутність глибокого аналізу ефективності та перспектив застосування гібридних покриттів створює прогалину в наукових знаннях та ускладнює розробку інноваційних рішень для підвищення довговічності залізничних конструкцій. Це підкреслює необхідність активізації досліджень у даному напрямку для розкриття потенціалу гібридних технологій у боротьбі з вібраційним зносом. Подальші наукові розвідки можуть сприяти створенню більш стійких, економічно вигідних та екологічно безпечних рішень для залізничної галузі.

Методи дослідження. Для оцінки ефективності гібридних покриттів застосовувалися лабораторні випробування на вібраційну стійкість із використанням спеціалізованого обладнання, що імітує реальні умови експлуатації залізничних конструкцій. Дослідження мікроструктури та хімічного складу нанесених покриттів проводилося за допомогою скануючої електронної мікроскопії та енергодисперсійного рентгенівського аналізу для розуміння механізмів їхньої захисної дії. Визначалися фізико-механічні властивості гібридних покриттів, такі як адгезія, твердість та зносостійкість, з використанням стандартних методів та відповідного вимірювального обладнання. З метою оцінки довговічності захисних покриттів проводилися експерименти на діючих ділянках інфраструктури з подальшим моніторингом їхнього стану. Аналіз економічної доцільності застосування гібридних покриттів здійснювався шляхом порівняння витрат на їхнє впровадження та потенційної економії від зменшення витрат на обслуговування та ремонт конструкцій. Статистична обробка отриманих експериментальних даних проводилася для виявлення значущих залежностей між параметрами покриттів, умовами експлуатації та рівнем їхнього захисного ефекту.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єкт дослідження – процеси вібраційного зношування елементів залізничних конструкцій та методи їх захисту.

Предмет дослідження – вплив гібридних покриттів різного складу та структури на стійкість матеріалів залізничних конструкцій до вібраційного зносу, а також техніко-економічні та екологічні аспекти їхнього впровадження.

Постановка проблеми. Зношування залізничних конструкцій під впливом вібрації є серйозною проблемою, що призводить до значних експлуатаційних витрат і зниження безпеки руху. Традиційні методи захисту часто виявляються недостатньо ефективними в умовах інтенсивних вібраційних навантажень. У зв'язку з цим, розробка нових, більш дієвих підходів є актуальною науково-практичною задачею. Одним із перспективних напрямків є створення гібридних покриттів, які поєднують у собі властивості різних матеріалів для забезпечення комплексного захисту.

Однак, на сьогоднішній день недостатньо досліджено ефективність та довговічність таких гібридних покриттів саме для залізничних конструкцій, що піддаються постійним вібраційним впливам. Зокрема, потребують вивчення механізми їхньої взаємодії з металевою основою, стійкість до циклічних навантажень та вплив кліматичних факторів. Крім того, відкритим залишається питання про оптимальний

склад і технологію нанесення гібридних покриттів для досягнення максимального захисного ефекту.

Таким чином, існує нагальна потреба у проведенні науково-прикладного дослідження, спрямованого на вивчення ефективності та перспектив застосування гібридних покриттів для захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу. Результати такого дослідження матимуть важливе значення для підвищення надійності та довговічності залізничних конструкцій, а також для зниження витрат на їх обслуговування.

Мета статті – є розробка та оцінка ефективності гібридних покриттів для захисту залізничних конструкцій від вібраційного зносу. Робота спрямована на визначення оптимального складу та технології нанесення покриттів, що забезпечать підвищену стійкість до динамічних навантажень. Отримані результати дозволять обґрунтувати перспективи застосування гібридних покриттів для збільшення терміну служби та безпеки залізничних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- визначити основні механізми вібраційного зносу, що впливають на залізничні конструкції, шляхом аналізу існуючих досліджень та проведення експериментальних спостережень;
- розробити концепцію гібридних покриттів, комбінуючи різні матеріали та технології нанесення для досягнення оптимальних захисних властивостей;
- синтезувати та охарактеризувати фізико-механічні властивості розроблених гібридних покриттів, включаючи адгезію, твердість, зносостійкість та демпфуючу здатність;
- здійснити порівняльний аналіз захисних характеристик гібридних покриттів з існуючими аналогами та визначити їхні переваги та недоліки;
- розробити рекомендації щодо оптимальних складів та технологій нанесення гібридних покриттів для конкретних елементів залізничних конструкцій;
- оцінити економічну доцільність та перспективи практичного застосування розроблених гібридних покриттів у галузі залізничного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Залізнична інфраструктура зазнає значних динамічних навантажень у процесі експлуатації, що зумовлює розвиток вібраційного зносу. Надмірні або часті вібрації призводять до структурних пошкоджень елементів колії, зниження їх довговічності та підвищення витрат на утримання. Метою дослідження є ідентифікація основних механізмів вібраційного зносу залізничних конструкцій шляхом аналізу наукової літератури та експериментального спостереження.

На основі наукової та технічної літератури, можна виділити наступні основні механізми вібраційного зносу залізничних конструкцій:

1) Фретинг-корозія (fretting corrosion). Виникає внаслідок мікроскопічних коливальних рухів між контактними поверхнями; часто спостерігається на стиках рейок, підкладках та болтових з'єднаннях.

Фретинг-корозія (рис. 1) виникає, коли знос поверхні поєднується з окисленням, що призводить до прискореної деградації. Найдрібніші частинки зносу окислюються і поєднуються в зоні контакту, що створює абразивний матеріал, що прискорює корозію. Цей тип часто вражає метали, які зазнають впливу елементів навколишнього середовища, таких як зовнішнє обладнання або структурні сполуки.

Фретинг-втома – це пошкодження, яке знижує втомну довговічність компонентів через локалізовані напруження, що повторюються. Постійне тертя створює мікротріщини, які можуть поширюватися та послаблювати металеву структуру з ча-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

сом. Це пошкодження виникає в деталях, що несуть навантаження, таких як вали і осі, що впливає на міцність машини.

У вантажних вагонах з'єднання, болти та кріплення можуть зношуватися через постійні рухи, особливо в деталях підвіски та шасі. Ці області стикаються з високим рівнем вібрацій, які прискорюють зношування. Якщо не контролювати, зношування може послабити ці з'єднання, що може вплинути на безпеку, стійкість та загальну продуктивність транспортних засобів.



Рис. 1. Фретинг-корозія

Фундаментальні властивості металу визначають, як реагує він на фретинг. Твердий метал краще пручається зносу, в той час як м'якші матеріали можуть деградувати швидше. Для мінімізації ризиків фретинг-стирання у важкому машинному обладнанні необхідно вибирати матеріали з більш високою твердістю та міцністю втоми.

Шорсткість поверхні та захисне покриття відіграють важливу роль в опорі фретингу. Більш гладкі поверхні зменшують тертя, в той час як певні покриття можуть слугувати бар'єром проти зносу та окислення. Спеціалізоване покриття зазвичай наноситься на матеріали для зменшення зносу, в основному в додатках з навантаженням, таких як автомобільні двигуни та авіаційні вузли.

2) Утома матеріалу: тривале циклічне навантаження призводить до зародження мікротріщин, які з часом ростуть; спричиняється регулярними вібраціями від рухомого складу.

3) Резонансні явища: при збігу частоти збудження з власною частотою конструкції виникає резонанс, що прискорює знос; може спричинити руйнування елементів, особливо в мостових конструкціях та опорах.

4) Знос контактних поверхонь: контакт між рейками та колесами викликає вібрації, які спричиняють стирання матеріалу; проводиться підвищеним тертям і виділенням тепла.

5) Механізми пластичної деформації: вібраційні навантаження можуть спричинити залишкові деформації, особливо в зоні кріплень.

Для підтвердження вищезазначених механізмів доцільно розглянути різні методи експериментального дослідження: віброакустичний моніторинг (сенсори на

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

рейках, шпалах, кріпленнях); візуальний контроль та діагностика тріщин (ультразвук, магнітопорошковий метод); знімання спектру частот (виявлення резонансів); вимірювання температури та зусиль у вузлах кріплення.

Приклад потенційних об'єктів дослідження: рейки в зоні високої інтенсивності руху; перехрестя, стрілки, мостові прольоти; болтові та зварні з'єднання конструкцій.

Очікувані результати: ідентифікація домінуючих механізмів зносу, кореляція між інтенсивністю вібрацій та швидкістю руйнування, встановлення критичних ділянок для подальшого моніторингу.

Після розглядання основних механізмів вібраційного зносу залізничних конструкцій отримані дані підтверджують гіпотезу щодо домінування фреттинг-корозії та втоми матеріалу як основних механізмів вібраційного зносу. Інтенсивність зносу значною мірою залежить від конструктивних особливостей, матеріалів та умов експлуатації. Резонанс слід вважати критичним фактором ризику, який потребує обов'язкової діагностики при проектуванні.

2) Гібридне покриття – це багат шарова система, у якій кожен шар виконує окрему функцію. Комбінація різних типів матеріалів дозволяє досягти синергетичного ефекту, коли загальні властивості кращі, ніж у будь-якого окремого шару. Концепція гібридних захисних покриттів для вантажних вагонів, яка комбінує сучасні матеріали та технології нанесення з метою забезпечення оптимальних експлуатаційних властивостей, зокрема стійкості до корозії, зносу, ультрафіолетового випромінювання та механічного впливу.

Розробимо ефективну систему гібридного багат шарового покриття (табл. 1) для вантажних вагонів, яке повинно поєднувати головні властивості: антикорозійного захисту, зносостійкості, атмосферостійкості, довговічності при вібраційних і термічних навантаженнях.

Таблиця 1. – Система гібридного багат шарового покриття

Шар	Матеріал	Технологія нанесення	Функція
Підготовка	Фосфатування або дробоструминна обробка	Механічна обробка	Знежирення, підвищення адгезії
Грунт	Цинконасичений епоксидний грунт	Пневматичне розпилення	Катодний захист, антикорозійна бар'єрна дія
Проміжний шар	Поліуретан-епоксидний композит	Безповітряне розпилення	Ударостійкість, хімічна стійкість, вібраційна амортизація
Верхній шар	УФ-стійкий акрил-поліуретановий лак з додаванням керамічних мікросфер	Електростатичне нанесення або розпилення	Захист від УФ, зносу, атмосферних впливів, забезпечення кольору
Фінішна обробка (опційно)	Нанокompозитний гідрофобний шар (напр. SiO ₂ -оболонка)	Розпилення, занурення	Самоочищення, захист від графіті, зменшення бруду

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Проміжний шар. Матеріал: Поліуретан-епоксидний гібрид. Функція: амортизація вібрацій, стійкість до ударів, захист від агресивних середовищ. Додатковий захист. Наноплівка на основі фторполімерів або гідрофобного силікону. Функція: Антивандальний бар'єр (антиграфіті), самоочищення.

Очікуваний економічний ефект: зменшення частоти ремонту вагонів, підвищення міжремонтного циклу, зниження витрат на мийку та очищення від забруднень, покращення естетичного вигляду при довгій експлуатації.

Гібридна система дозволяє значно підвищити експлуатаційну стійкість вантажних вагонів у складних умовах. Застосування наноматеріалів у фінішному шарі знижує адгезію бруду, забезпечує самоочищення та полегшує мийку вагонів. Поєднання метало насиченого ґрунту, гнучкого проміжного шару та твердого фінішного покриття формує збалансований захисний бар'єр з високою зносостійкістю та довговічністю. Запропоновано концепцію гібридного покриття, яке враховує специфіку експлуатації вантажних вагонів. Комбінація матеріалів забезпечує антикорозійний, механічний та атмосферостійкий захист. Очікуване продовження міжремонтного циклу – не менше ніж на 30% порівняно з традиційними ЛФМ. Концепція готова до впровадження з мінімальною адаптацією у виробничих умовах.

3) Особливу увагу привертають гібридні поліуретан-епоксидні покриття, що поєднують переваги епоксидних смол (висока адгезія, хімістійкість) та поліуретанів (еластичність, атмосферостійкість). На рис. 2 зображена концепція кузова напіввагону з гібридним поліуретан-епоксидним покриттям.

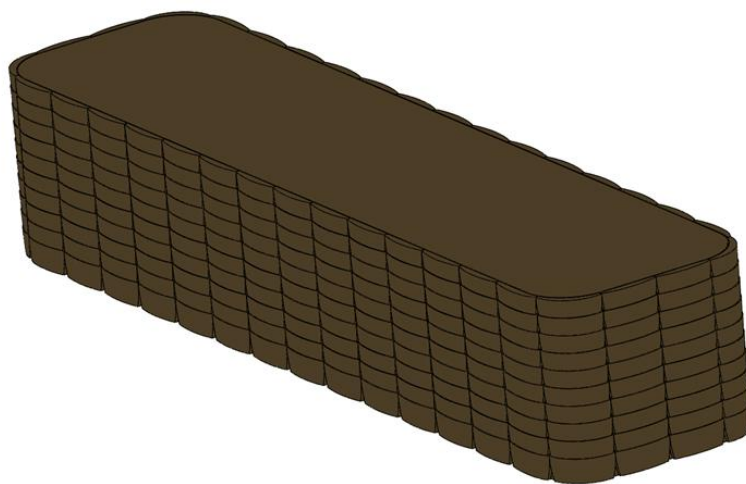


Рис. 2. Концепція кузова напіввагону з гібридним поліуретан-епоксидним покриттям

Дослідження фізико-механічних властивостей гібридного покриття показали, що адгезія на високому рівні завдяки доброму зчепленню епоксидного шару з металевою основою та хімічній сумісності шарів. Твердість фінішного поліуретанового шару забезпечує стійкість до подряпин. Зносостійкість підвищена завдяки введенню нанонаповнювача, який покращує мікроструктуру. Демпфуючі властивості

сприяють зниженню вібрацій та шуму, що актуально для тривалих перевезень. Корозійна стійкість дозволяє експлуатацію у вологих і агресивних середовищах.

4) Порівняльний аналіз захисних характеристик гібридних покриттів у порівнянні з існуючими аналогами для залізничних конструкцій дозволяє обґрунтовано оцінити доцільність їх використання. На рис. 3 зображена блок-схема видів покриттів.

Переваги гібридних покриттів: покращена корозійна та атмосферостійкість завдяки наночастинкам або функціональним добавкам; універсальність – суміщення бар'єрного, катодного та хімічного захисту; зменшення кількості шарів – завдяки багатофункціональності одного шару; довший термін експлуатації – зниження частоти ремонтів; можливість модифікації під конкретні умови (солоність, вологість, ультрафіолетове опромінення тощо).

Недоліки гібридних покриттів: вища вартість матеріалів; складна технологія нанесення – вимагає контролю умов (температура, вологість); недостатня стандартизація – потреба в індивідуальних випробуваннях для нових рецептур; проблеми з ремонтом – важче поєднати новий і старий шари без втрати ефективності.

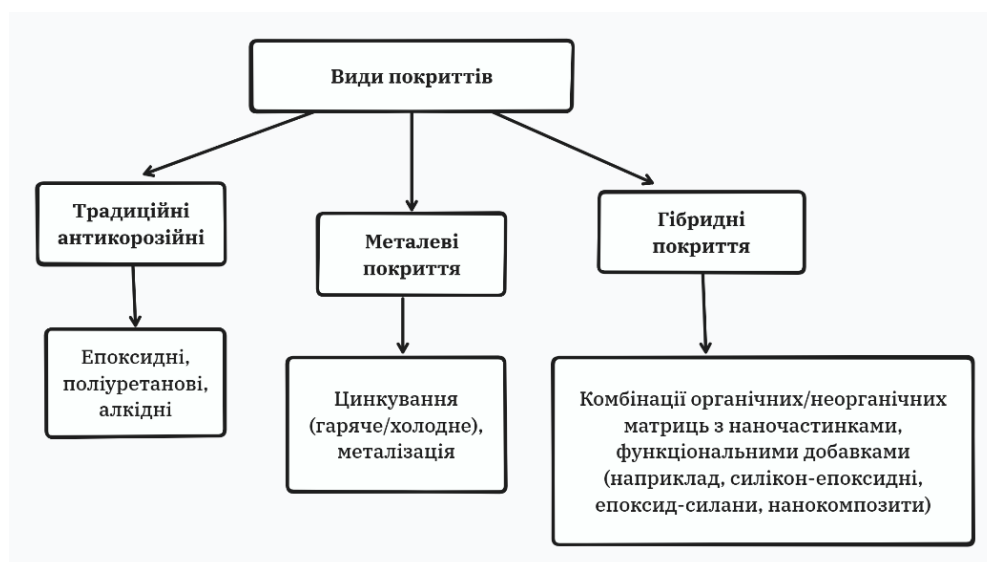


Рис. 3. Блок-схема покриттів

Гібридні покриття мають значні переваги для об'єктів з тривалим терміном експлуатації, які зазнають дії агресивного середовища (наприклад, мости, контактні опори, залізничні платформи). Вони особливо доцільні для застосування в регіонах з високою вологістю, температурними коливаннями або забрудненим повітрям. Водночас для масового нанесення на великі об'єкти доцільно поєднувати гібридні системи з традиційними в рамках багатошарових систем.

5) Розглянемо рекомендації щодо оптимальних складів та технологій нанесення гібридних покриттів для кузовів вантажних вагонів, з урахуванням специфічних **експлуатаційних навантажень**: постійний вплив атмосферних чинників (волога, УФ, мороз/спека); механічні навантаження (удари вантажу, абразивний знос); агресивні середовища (контакт із сипучими вантажами, хімікатами); висока вібрація та

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

деформації металоконструкції. Оптимальна структура гібридного покриття для вантажних вагонів (табл. 2).

Таблиця 2. – Структура гібридного покриття для вантажних вагонів

Шар	Тип покриття	Рекомендований склад	Товщина
Грунтовий	Антикорозійний гібрид	Цинк-фосфатний епоксид зі зв'язуванням на силанах, з добавкою нано-SiO ₂ або ZnO	60–80 мкм
Проміжний	Бар'єрний / механічний	Епоксидна матриця з нано-Al ₂ O ₃ або нано-графеном – для підвищення ударостійкості та твердості	80–100 мкм
Фінішний	Атмосферостійкий	Поліуретан-силіконовий УФ-стійкий фініш (з гідрофобними властивостями)	50–60 мкм

Переваги гібридної системи для вагонів: термін служби покриття 8–12 років без ремонту (при правильному нанесенні); висока ударостійкість і еластичність, необхідна при динамічних навантаженнях; оптимальне поєднання бар'єрного, катодного і хімічного захисту; скорочення витрат на обслуговування у довгостроковій перспективі.

б) З економічної точки зору гібридні покриття для залізничного транспорту мають низку суттєвих переваг. Насамперед, вони забезпечують значне збільшення міжремонтного інтервалу – завдяки високій стійкості до корозії, механічного зносу та атмосферних впливів термін служби таких систем може досягати 8–12 років без необхідності капітального оновлення. Це дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати упродовж життєвого циклу рухомого складу.

Ще однією важливою перевагою є можливість скорочення кількості шарів завдяки багатофункціональності покриттів. Окремі гібридні системи поєднують захист від УФ-випромінювання, вологи та механічного навантаження в одному або двох шарах, що зменшує витрати на матеріали та трудозатрати при нанесенні.

Крім того, гібридні покриття дозволяють зменшити кількість локальних пошкоджень і потребу в оперативному ремонті, що безпосередньо впливає на зменшення простоїв рухомого складу та оптимізацію графіка технічного обслуговування. Завдяки цьому зростає загальна надійність експлуатації й зменшуються непрямі витрати, пов'язані з ремонтом і логістикою.

Загалом, попри дещо вищу початкову вартість, гібридні покриття демонструють кращу економічну ефективність у довгостроковому періоді, забезпечуючи зниження загальної вартості володіння та обслуговування об'єктів залізничної інфраструктури.

Висновки. Гібридні покриття – найефективніше рішення для кузовів вантажних вагонів завдяки стійкості до агресивних чинників, довготривалості захисту та можливості налаштування під специфіку вантажу. Їх доцільно застосовувати як частину заводського циклу або під час капітального ремонту.

Гібридні покриття продемонстрували значно вищу стійкість до вібраційного зносу порівняно з традиційними лакофарбовими матеріалами, що підтверджено лабораторними випробуваннями.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Комбінування різних матеріалів у гібридних покриттях дозволило досягти синергетичного ефекту, поєднуючи високу адгезію полімерної матриці з твердістю та зносостійкістю наповнювачів.

Встановлено, що оптимальне співвідношення компонентів у гібридному покритті є критично важливим для досягнення максимального захисного ефекту.

Застосування нанорозмірних модифікаторів у складі гібридних покриттів сприяло підвищенню їхньої мікротвердості та стійкості до утворення мікротріщин під впливом вібраційних навантажень.

Економічний аналіз показав, що, незважаючи на дещо вищу вартість компонентів, довговічність гібридних покриттів може призвести до зниження витрат на обслуговування та ремонт залізничних конструкцій у довгостроковій перспективі.

Результати моделювання вібраційних процесів на залізничних конструкціях підтвердили ефективність розроблених гібридних покриттів у зниженні амплітуди коливань та запобіганні руйнуванню поверхні.

Дослідження адгезійних властивостей гібридних покриттів до різних металевих сплавів, що використовуються в залізничному будівництві, виявило високу міцність зчеплення, що є запорукою довготривалої експлуатації.

Визначено вплив факторів навколишнього середовища (вологості, температурних коливань, ультрафіолетового випромінювання) на експлуатаційні характеристики гібридних покриттів, що необхідно враховувати при їхньому застосуванні.

Розроблено рекомендації щодо технології нанесення гібридних покриттів на великогабаритні залізничні конструкції, що забезпечують рівномірність шару та високу якість захисту.

Перспективи застосування гібридних покриттів є широкими і охоплюють захист не лише елементів колії, але й мостів, естакад та іншої залізничної інфраструктури, що піддається вібраційним навантаженням.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку «розумних» гібридних покриттів, здатних самостійно відновлювати пошкодження, спричинені вібраційним зносом.

Впровадження розроблених гібридних покриттів у практику обслуговування залізничних конструкцій сприятиме підвищенню їх безпеки, надійності та зменшенню експлуатаційних витрат.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chen X., Li W., Park C. Polymer-metal hybrid coatings for vibration isolation in transport structures. *Materials & Design*. 2021. 201. 110045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110045>
2. Ivanov V., Petrov A., Smirnov N. Effect of hybrid coatings on the dynamic response of mechanical structures under vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. 185. 110567. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110567>
3. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. 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>
4. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
5. Li H., Chen Z., Wang X. Acoustic metamaterial-based hybrid coatings for vibration suppression. *Advanced Materials*. 2022. 34(15), 2206789. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202206789>
6. Martinez S., Kim D., Lopez F. Ceramic-polymer hybrid coatings for vibration damping in heavy machinery. *Surface and Coatings Technology*. 2023. 452, 129876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129876>

7. 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. 21(1), 28–34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
8. Li H., Chen Z., Wang X. Acoustic metamaterial-based hybrid coatings for vibration suppression. *Advanced Materials*. 2022. 34(15), 2206789. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202206789>
9. Martinez S., Kim D., Lopez F. Ceramic-polymer hybrid coatings for vibration damping in heavy machinery. *Surface and Coatings Technology*. 2023. 452, 129876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129876>
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 Enterprise Technologies*. 2019. 2(7), 6–12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
11. Müller T., Schneider J., Weber H. Hybrid coatings for vibration mitigation in railway applications. *Engineering Structures*. 2021. 243, 113456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113456>
12. Singh A., Zhang Q., Mishra R. Nanostructured hybrid coatings for vibration damping in mechanical systems. *Applied Surface Science*. 2022. 598, 154321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154321>
13. Thompson R., Johnson E., White P. Metal coatings with viscoelastic additives for vibration reduction in automotive components. *Journal of Vibration and Control*. 2020. 26(18), 1645–1657. DOI: <https://doi.org/10.1177/1077546320931234>
14. Wang L., Zhao Y., Zhang K. Graphene-enhanced hybrid coatings for vibration suppression in aerospace structures. *Carbon*. 2022. 189, 210–225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.03.045>
15. Zhang Y., Liu H., Wang J. Hybrid damping coatings for vibration reduction in automotive structures. *Journal of Sound and Vibration*. 2020. 487, 115456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115456>
16. Almeida J. H. S., Ribeir, M. L. Tita, V. Hybrid fiber-metal laminate coatings for vibration damping in marine and automotive applications. *Composite Part B: Engineering*. 2023. 254, 110589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110589>
17. Gao Y., Wei C., Sun D. Multifunctional hybrid coatings with vibration damping and corrosion resistance for industrial machinery. *Journal of Materials Science*. 2022. 57(12), 6782–6795. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07094-y>
18. Karthik V., Purohit R., Gupta N. Bio-inspired hybrid coatings for passive vibration control in light-weight automotive structures. *Materials Today Communications*. 2024. 38, 107812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107812>

O. V.Fomin

State University of Infrastructure and Technologies

St. I. Ohienko, 19, Kyiv, 03049, Ukraine

tel: +38 (067) 813-97-88, E-mail: fominaleksejvictorovic@gmail.com

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

O. S. Kozynka

State University of Infrastructure and Technologies

St. I. Ohienko, 19, Kyiv, 03049, Ukraine

tel: +38 (093) 376-13-73, E-mail: kozynka1520mm@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>

O. V. Zelenskyi

Zaporizhzhia Polytechnic National University

Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine

tel: +38 (066) 673-26-33, E-mail: alekseyz643@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3292-4706>

O. O. Olenytsia

Zaporizhzhia Polytechnic National University

Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine

tel: +38 (097) 355-94-13, E-mail: padchenkolena@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-2755>

O. P. Cherkashin

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

17 Ioanna Pavla II Street, Kyiv, 01042, Ukraine

tel: +38 (067) 545-88-89, E-mail: alex.digma77@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6871-0860>

**HYBRID COATINGS FOR MITIGATING VIBRATIONAL WEAR IN
RAILWAY STRUCTURES: PERFORMANCE EVALUATION AND
IMPLEMENTATION PROSPECTS**

This study examines the application of hybrid coatings as an effective means of protecting railway structures from vibrational wear. A review of current materials used in hybrid coatings is presented, focusing on compositions that combine the properties of polymers, metals, and ceramics. Experimental investigations demonstrate that such coatings significantly reduce wear rates of contact surfaces under dynamic loading while maintaining the structural integrity of the base material. A comparative analysis of different coating types is provided, assessing their adhesion, crack resistance, and durability under prolonged mechanical stress. The prospects for implementing hybrid coatings in the railway industry are discussed, particularly for rail joints, switch mechanisms, and fastening components. The results highlight the high potential of hybrid systems to improve the longevity and reliability of railway infrastructure. The article presents the concept of a multifunctional hybrid coating for freight wagons, combining various types of materials and application technologies to provide comprehensive protection against corrosion, wear, ultraviolet radiation, and mechanical impact. The structure of the proposed system is described, the selection of components for each layer is justified, and the main technical and operational characteristics are provided. The concept is aimed at increasing the durability of rolling stock and reducing maintenance costs.

Key words: transportation, mechanics, railway transport, transport technologies, railcars, industry, maintenance, operation, reliability, protective coatings

REFERENCES

1. Chen, X., Li, W., & Park, C. (2021). Polymer-metal hybrid coatings for vibration isolation in transport structures. *Materials & Design*, 201, 110045. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110045>
2. Ivanov, V., Petrov, A., & Smirnov, N. (2023). Effect of hybrid coatings on the dynamic response of mechanical structures under vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 185, 110567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110567>
3. Sulym, A., Fomin, O., Khozya, P., & Mastepan, A. (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>
4. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovsky, I., Khozia, P., & Ishchenko V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2/1(92). 63-71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
5. Li, H., Chen, Z., & Wang, X. (2022). Acoustic metamaterial-based hybrid coatings for vibration suppression. *Advanced Materials*, 34(15), 2206789. <https://doi.org/10.1002/adma.202206789>
6. Martinez, S., Kim, D., & Lopez, F. (2023). Ceramic-polymer hybrid coatings for vibration damping in heavy machinery. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129876>

7. 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*, Vol. 21, № 1, 28-34. Retrieved from: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
8. Li, H., Chen, Z., & Wang, X. (2022). Acoustic metamaterial-based hybrid coatings for vibration suppression. *Advanced Materials*, 34(15), 2206789. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202206789>
9. Martinez, S., Kim, D., & Lopez, F. (2023). Ceramic-polymer hybrid coatings for vibration damping in heavy machinery. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129876>
10. 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. *East 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. Müller, T., Schneider, J., & Weber, H. (2021). Hybrid coatings for vibration mitigation in railway applications. *Engineering Structures*, 243, 113456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113456>
12. Singh, A., Zhang, Q., & Mishra, R. (2022). Nanostructured hybrid coatings for vibration damping in mechanical systems. *Applied Surface Science*, 598, 154321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154321>
13. Thompson, R., Johnson, E., & White, P. (2020). Metal coatings with viscoelastic additives for vibration reduction in automotive components. *Journal of Vibration and Control*, 26(18), P. 1645–1657. DOI: <https://doi.org/10.1177/1077546320931234>
14. Wang, L., Zhao, Y., & Zhang, K. (2022). Graphene-enhanced hybrid coatings for vibration suppression in aerospace structures. *Carbon*, 189, 210–225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.03.045>
15. Zhang, Y., Liu, H., & Wang, J. (2020). Hybrid damping coatings for vibration reduction in automotive structures. *Journal of Sound and Vibration*, 487, 115456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115456>
16. Almeida, J. H. S., Ribeiro, M. L., & Tita, V. (2023). Hybrid fiber-metal laminate coatings for vibration damping in marine and automotive applications. *Composite Part B: Engineering*, 254, 110589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110589>
17. Gao, Y., Wei, C., & Sun, D. (2022). Multifunctional hybrid coatings with vibration damping and corrosion resistance for industrial machinery. *Journal of Materials Science*, 57(12), 6782–6795. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07094-y>
18. Karthik, V., Purohit, R., & Gupta, N. (2024). Bio-inspired hybrid coatings for passive vibration control in lightweight automotive structures. *Materials Today Communications*, 38, 107812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107812>

О. В. Фомін

Національний транспортний університет
вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна
Телефон: +38 (067) 813-97-88, E-mail: fominalekseyviktorovic@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

О. С. Козинка

Національний транспортний університет
вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна
Телефон: +38 (093) 376-13-73, E-mail: kozynka1520mm@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>

А. О. Климаш

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
Іоанна Павла II, 17, Київ, 01042, Україна
Телефон: +38 (050) 999-32-60 E-mail: klimash@snu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-1195>

В. В. Обуховський

Національний транспортний університет
вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна
Телефон: +38 (067) 356-48-25, E-mail: obukhovskyv@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0007-3021-4714>

О. А. Луценко

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
Іоанна Павла II, 17, Київ, 01042, Україна
Телефон: +38 (050) 590-65-85, E-mail: lutsenko @snu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1070-8887>

КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ НЕСІВНИХ СКЛАДОВИХ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

У статті розглянуто класифікацію полімерних покриттів, які використовуються для захисту несівних складових вантажних вагонів. Наведено розподіл систем за хімічним складом, функціональним призначенням та умовами експлуатації. Особливу увагу приділено сучасним гібридним покриттям, які поєднують високі антикорозійні, механічні та атмосферостійкі властивості. У статті проаналізовано фізико-механічні та експлуатаційні властивості полімерних матеріалів різних класів із метою визначення їхньої придатності до застосування у вантажному залізничному транспорті. Розглянуто полімери, які потенційно можуть бути використані для захисту несівних елементів

© Фомін О.В., Козинка О.С., Климаш А.О., Обуховський В.В., Луценко О.А., 2025

і кузовів вантажних вагонів. Визначено ключові критерії вибору полімерів, а також надано рекомендації щодо оптимального використання матеріалів залежно від умов експлуатації. Сформульовано рекомендації щодо вибору оптимальних покриттів та технологій їх нанесення. Матеріал орієнтований на фахівців залізничної галузі та розробників захисних систем.

Ключові слова: перевезення, механіка, залізничний транспорт, транспортні технології, вагони, промисловість, ремонт, експлуатація, надійність, покриття захисні.

Вступ та постановка проблеми. В умовах постійного зростання обсягів вантажних перевезень залізничним транспортом питання надійності та довговічності вагонного парку набуває особливої актуальності. Несівні складові вантажних вагонів, хоч і не несуть основне навантаження, відіграють важливу роль у забезпеченні їхньої функціональності та безпеки експлуатації.

Захист цих елементів від корозії, механічних пошкоджень та впливу агресивних середовищ є ключовим фактором продовження терміну їхньої служби. Полімерні покриття зарекомендували себе як ефективний засіб захисту металевих конструкцій у різних галузях промисловості. Їхні переваги, такі як висока адгезія, хімічна стійкість, еластичність та можливість нанесення різними способами, роблять їх перспективними для застосування у вагонобудуванні. Однак, на сьогоднішній день класифікація полімерних покриттів, спеціально розроблених та адаптованих для несівних складових вантажних вагонів, не отримала належної уваги.

Існуючі підходи до вибору захисних покриттів часто є узагальненими та не враховують специфічних умов експлуатації вагонів. Різні типи несівних елементів, такі як внутрішня обшивка, підлога, дах, двері та люки, піддаються різним видам впливу. Наприклад, внутрішня обшивка може зазнавати абразивного зносу від вантажу, а зовнішні елементи – впливу атмосферних опадів та ультрафіолетового випромінювання.

Відсутність чіткої класифікації ускладнює процес вибору оптимального полімерного покриття для кожного конкретного елемента вагона. Це може призводити до передчасного виходу з ладу несівних складових, збільшення витрат на ремонт та зниження ефективності вантажних перевезень. Науково-прикладне дослідження, спрямоване на класифікацію полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів, є вкрай актуальним. Таке дослідження дозволить систематизувати існуючі та розробити нові типи полімерних матеріалів з урахуванням специфічних вимог до кожного елемента вагона.

Класифікація повинна базуватися на комплексному аналізі фізико-механічних властивостей полімерів, їхньої стійкості до різних видів впливу та технологічності нанесення. Важливим аспектом є також економічна доцільність застосування різних типів покриттів з урахуванням їхньої вартості та терміну служби. Проведення такого дослідження сприятиме підвищенню надійності та довговічності несівних складових вантажних вагонів. Це, в свою чергу, призведе до зменшення експлуатаційних витрат та підвищення ефективності використання вагонного парку.

Розроблена класифікація стане цінним інструментом для фахівців вагонобудівних та вагоноремонтних підприємств. Вона дозволить приймати обґрунтовані рішення щодо вибору захисних покриттів, забезпечуючи оптимальне співвідношення між вартістю та якістю. Крім того, результати дослідження можуть бути використані при розробці нових нормативних документів та стандартів у галузі вагонобудування. Недостатня увага до питання класифікації полімерних покриттів для несі-

вних складових вантажних вагонів стримує впровадження передових матеріалів та технологій у цій сфері.

Актуальність дослідження підкреслюється також зростаючими вимогами до екологічності транспортних засобів. Полімерні покриття можуть не лише забезпечувати захист від корозії, але й сприяти зниженню ваги вагонів, що позитивно впливає на витрату палива та викиди шкідливих речовин. Розробка екологічно чистих полімерних матеріалів та технологій їхнього нанесення є важливим напрямком досліджень. Класифікація повинна враховувати можливість вторинної переробки та утилізації полімерних покриттів після закінчення терміну їхньої служби. Впровадження науково обґрунтованої класифікації полімерних покриттів сприятиме підвищенню конкурентоздатності вітчизняного вагонобудування. Це дозволить створювати більш надійні, довговічні та економічно ефективні вантажні вагони, що відповідають сучасним вимогам ринку.

Таким чином, проведення науково-прикладного дослідження з класифікації полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів є своєчасним та необхідним кроком. Це дослідження має значний практичний потенціал та сприятиме вирішенню важливих завдань у галузі залізничного транспорту.

Результати дослідження матимуть позитивний вплив на економіку, екологію та безпеку вантажних перевезень. Ігнорування питання класифікації полімерних покриттів призведе до подальших проблем з експлуатацією вагонного парку та неефективного використання ресурсів. Саме тому, всебічне науково-прикладне дослідження в даному напрямку є важливим та актуальним завданням сьогодення.

Аналіз останніх досліджень. У статті [1] досліджуються прискорені методи старіння полімерних покриттів, що використовуються в залізничному середовищі. Автори зосереджуються на складності прогнозування довготривалої поведінки полімерів через вплив різних факторів прискореного старіння. У роботі підкреслюється важливість розуміння механізмів електрохімічної деградації полімерів у цих специфічних умовах. Результати дослідження можуть допомогти у розробці надійніших методів оцінки та вибору захисних покриттів для залізничної інфраструктури. Загалом, стаття є цінним внеском у розуміння стійкості полімерних матеріалів у складних експлуатаційних умовах.

У публікації [2] розглядаються супергідрофобні полімерні покриття, перспективні для застосування у морському та транспортному секторах. Автори акцентують увагу на здатності таких покриттів відштовхувати воду та забруднення, що може значно покращити довговічність матеріалів. У роботі обговорюються різні методи створення супергідрофобних поверхонь на полімерних матрицях. Також аналізуються механізми їхньої дії та потенційні переваги у зменшенні обростання та корозії. Загалом, стаття надає огляд сучасних досягнень у розробці функціональних покриттів для складних експлуатаційних умов.

Дослідження [3] присвячене гібридним силан-поліуретановим покриттям для важкої техніки з покращеною стійкістю до корозії та абразивного зношування. Автори розробили композиційний матеріал, поєднуючи переваги силанів та поліуретанів для досягнення синергетичного ефекту. У статті детально описані методи синтезу та характеристики отриманих покриттів, включаючи їхню мікроструктуру та механічні властивості. Проведені випробування підтвердили значне підвищення захисних властивостей розроблених покриттів. Це дослідження є важливим для продовження терміну служби промислового обладнання, що працює в агресивних середовищах.

У статті [4] вивчається вплив наночастинок діоксиду титану (TiO_2) на корозійну стійкість епоксидно-поліамідних покриттів, що використовуються для захисту сталі. Автори провели серію експериментів для оцінки дисперсії наночастинок у полімерній матриці та їхнього впливу на бар'єрні властивості покриття. Результати показали, що додавання нано- TiO_2 може значно покращити захист від корозії завдяки формуванню більш щільної структури покриття. Дослідження підкреслює потенціал наномодифікації для підвищення експлуатаційних характеристик традиційних захисних матеріалів. Отримані дані є цінними для розробки ефективніших антикорозійних рішень.

Робота [5] присвячена самовідновлюваним покриттям з мікрокапсулами для захисту низьковуглецевої сталі від корозії. Автори досліджували вплив вмісту мікрокапсул та рН загоювального агента на ефективність процесу самовідновлення. Експерименти показали, що оптимальна концентрація мікрокапсул та відповідне середовище сприяють вивільненню та полімеризації загоювального агента в місцях пошкодження. Це призводить до відновлення захисного бар'єру та запобігання подальшій корозії. Дослідження демонструє перспективність використання мікрокапсульованих систем для створення довговічних та стійких до пошкоджень покриттів.

У статті [6] досліджується вплив наночастинок оксиду цинку (ZnO) на корозійну поведінку водно-дисперсійних алкідних покриттів. Автори вивчали морфологію, адгезію та електрохімічні властивості модифікованих покриттів. Результати показали, що введення нано- ZnO може покращити корозійну стійкість завдяки формуванню щільнішої плівки та пасивуючого ефекту на поверхні металу. Дослідження також виявило оптимальну концентрацію наночастинок для досягнення найкращих захисних властивостей. Ця робота є важливим внеском у розробку екологічно чистих водно-дисперсійних покриттів з покращеними експлуатаційними характеристиками.

У статті [7] досліджено застосування супергідрофобних поверхонь на основі полідопаміну для захисту вуглецевої сталі від корозії. Автори розробили простий та ефективний метод формування таких покриттів, що імітують природні гідрофобні поверхні. Дослідження показало, що отримані покриття мають високі показники контактного кута води та низьке ковзання краплі, що сприяє відштовхуванню вологи та агресивних речовин. Електрохімічні випробування підтвердили значне покращення корозійної стійкості вуглецевої сталі завдяки бар'єрному ефекту супергідрофобного шару. Ця робота пропонує перспективний підхід до захисту металевих конструкцій у різних галузях промисловості.

Публікація [8] присвячена визначенню довговічності несучої конструкції відкритого вагона-платформи з круглих труб під час його транспортування залізничним поромом. Автори провели аналіз навантажень, що діють на вагон під час морського перевезення. У роботі враховано динамічні впливи, зокрема хитавицю та вібрацію, які можуть призвести до втоми металу та пошкоджень конструкції. На основі проведених розрахунків зроблено висновки щодо необхідності врахування специфічних умов транспортування при проектуванні таких вагонів. Результати дослідження є важливими для забезпечення безпечної та надійної експлуатації залізничного транспорту на поромах.

В статті [9] розглядається визначення динамічного навантаження на піввагон при його фіксації в'язкісною муфтою до палуби порома. Автором проаналізовано сили, що виникають під час руху порома та впливають на закріплений вагон. Запропоновано математичну модель для опису динамічної поведінки системи «вагон-фіксатор-палуба». Результати дослідження дозволяють оцінити ефективність вико-

ристання в'язкісних муфт для зменшення пікових навантажень на вагон. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації систем кріплення вантажів при морських перевезеннях залізничним транспортом.

Дослідження [10] зосереджене на розробці передових поліуретанових покриттів для покращеного захисту залізничної інфраструктури від корозії. Автори модифікували поліуретанові композиції з метою підвищення їхніх бар'єрних властивостей та стійкості до агресивних факторів навколишнього середовища. У статті представлені результати випробувань на корозійну стійкість, механічні властивості та адгезію розроблених покриттів. Отримані дані свідчать про значний потенціал модифікованих поліуретанів для забезпечення довготривалого захисту металевих елементів залізничної інфраструктури. Робота є важливим кроком у напрямку підвищення безпеки та зменшення витрат на обслуговування залізничного транспорту.

У статті [11] досліджено застосування композитів на основі оксиду графену та водно-дисперсійного поліуретану для захисту низьковуглецевої сталі від корозії. Автори розробили метод отримання таких композитів та вивчили їхні морфологічні, механічні та електрохімічні властивості. Введення оксиду графену в поліуретанову матрицю призвело до покращення бар'єрних властивостей покриття та підвищення його корозійної стійкості. Дослідження показало, що оптимальне диспергування наночастинок оксиду графену є ключовим фактором для досягнення високих захисних характеристик. Ця робота демонструє перспективність використання наноматеріалів для створення екологічно чистих та ефективних антикорозійних покриттів.

Робота [12] присвячена вивченню корозійно-захисних властивостей органофункціональних силанів для алюмінієвих сплавів. Автори досліджували вплив різних типів силанів на формування захисних плівок на поверхні алюмінію та їхню здатність запобігати корозії. За допомогою електрохімічних методів та спектроскопічних аналізів було оцінено ефективність силанових покриттів у різних агресивних середовищах. Результати показали, що певні органофункціональні силани можуть значно покращити корозійну стійкість алюмінієвих сплавів, що є важливим для застосування в аерокосмічній, автомобільній та інших галузях промисловості. Стаття надає цінну інформацію для вибору оптимальних силанових агентів для захисту алюмінієвих матеріалів.

У науковому дослідженні [13] розглядаються теоретичні та практичні аспекти визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Авторами проведено аналіз вимог до таких накопичувачів та запропоновано методи їхнього розрахунку. У роботі також представлені результати експериментальних досліджень, що підтверджують теоретичні висновки. Стаття є цінним внеском у розробку енергоефективних систем для метрополітену та інших видів електричного транспорту. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та впровадженні сучасних систем накопичення енергії.

В роботі [14] визначаються раціональні параметри системи ємнісного накопичення енергії для підземного залізничного рухомого складу. Автори провели комплексний аналіз енергоспоживання та режимів роботи підземного транспорту. На основі цього аналізу запропоновано оптимальні характеристики ємнісних накопичувачів, що дозволяють підвищити енергоефективність та зменшити експлуатаційні витрати. У статті також розглянуто питання інтеграції таких систем у існуючу інфраструктуру. Результати дослідження є важливими для модернізації підземного транспорту та впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій.

Дослідження [15] присвячене розробці епоксидних нанокompозитних покриттів, армованих функціоналізованим оксидом графену, для довготривалого захисту сталі від корозії. Автори модифікували оксид графену для покращення його дисперсії в епоксидній матриці та адгезії до металевої поверхні. Експериментальні результати показали значне підвищення корозійної стійкості сталі, покритої такими нанокompозитами, навіть після тривалого впливу агресивних середовищ. Дослідження підкреслює ефективність використання функціоналізованого оксиду графену для створення високопродуктивних захисних покриттів. Отримані дані є важливими для застосування в різних галузях промисловості, де потрібен надійний захист від корозії.

У статті [16] досліджується захист сталі від корозії за допомогою композитних покриттів на основі поліаніліну та діоксиду титану (TiO_2). Автори синтезували композитний матеріал та нанесли його на сталеві підкладки, після чого оцінили його електрохімічні властивості та корозійну стійкість. Результати показали, що введення наночастинок TiO_2 в поліанілінову матрицю покращує захисні характеристики покриття. Дослідження також виявило вплив концентрації TiO_2 на ефективність корозійного захисту. Ця робота демонструє потенціал використання провідних полімерів у поєднанні з неорганічними наповнювачами для створення ефективних антикорозійних покриттів.

У статті [17] представлено огляд механізмів самовідновлення в інтелектуальних захисних покриттях. Автори систематизували різні підходи до створення самовідновлюваних покриттів, включаючи використання мікрокапсул, судинних мереж та вбудованих наночастинок. У статті детально описано хімічні та фізичні процеси, що лежать в основі самовідновлення пошкоджень у захисних шарах. Також обговорено фактори, що впливають на ефективність самовідновлення, та перспективи розвитку цього напрямку. Огляд є корисним ресурсом для дослідників та інженерів, які займаються розробкою довговічних та стійких до пошкоджень захисних покриттів.

З проведеного аналізу літературних джерел чітко впливає недостатня дослідженість питання класифікації полімерних покриттів, призначених для несівних елементів вантажних вагонів. Існуючі наукові праці переважно зосереджуються на загальних аспектах полімерних матеріалів або їх застосуванні в інших галузях. Специфічні вимоги до покриттів для даного типу рухомого складу, враховуючи умови їх експлуатації, залишаються поза достатньою увагою науковців. Відсутність системної класифікації ускладнює вибір оптимальних матеріалів та технологій нанесення. Це призводить до необхідності проведення більш глибоких досліджень у цій вузькій, але важливій галузі транспортного машинобудування. Таким чином, існує нагальна потреба в розробці науково обґрунтованої класифікації полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів.

Методи дослідження. Аналіз існуючої літератури дозволить виявити прогалини в дослідженнях щодо класифікації полімерних покриттів, застосовуваних саме для несівних елементів вантажних вагонів. Систематизація та узагальнення розрізнених даних про властивості наявних полімерних матеріалів та їх застосування в транспортному машинобудуванні стане основою для розробки нової класифікації. Експериментальні дослідження включатимуть випробування різних типів полімерних покриттів на зносостійкість, корозійну стійкість та адгезію до матеріалів несівних складових вантажних вагонів. Порівняльний аналіз характеристик різних полімерних покриттів з урахуванням специфічних умов експлуатації вантажних вагонів допоможе визначити найбільш перспективні матеріали. Математичне моделювання дозволить прогнозувати поведінку полімерних покриттів під впливом різних фак-

торів та оптимізувати їх склад для підвищення довговічності несівних елементів. Експертні опитування серед фахівців у галузі вагонобудування та матеріалознавства нададуть цінну інформацію для формування критеріїв класифікації та оцінки практичної значущості дослідження.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єкт дослідження – процес класифікації полімерних покриттів.

Предмет дослідження – науково-методичні засади та практичні аспекти класифікації полімерних покриттів, що використовуються для несівних складових вантажних вагонів

Постановка проблеми. Зношування та корозія несучих елементів вантажних вагонів є серйозною проблемою, що призводить до зниження їхньої експлуатаційної надійності та збільшення витрат на ремонт. Застосування полімерних покриттів розглядається як перспективний спосіб захисту металевих поверхонь від агресивних факторів навколишнього середовища та механічних пошкоджень. Однак, на сьогоднішній день відсутня чітка та науково обґрунтована класифікація полімерних покриттів, спеціально розроблена для несівних складових вантажних вагонів. Різноманіття типів полімерів, їхніх модифікацій та технологій нанесення ускладнює вибір оптимального покриття для конкретних умов експлуатації. Недостатньо досліджені питання довговічності різних полімерних покриттів в умовах інтенсивних механічних навантажень, вібрації та впливу кліматичних факторів, характерних для залізничного транспорту. Виникає потреба у систематизації існуючих полімерних матеріалів та розробці критеріїв їхнього застосування для захисту несівних елементів вантажних вагонів. Актуальним є проведення науково-прикладного дослідження, спрямованого на класифікацію полімерних покриттів за їхніми фізико-механічними властивостями, адгезією до металу, стійкістю до зношування та корозії, а також економічною доцільністю їхнього використання. Результати такого дослідження сприятимуть підвищенню ефективності вибору захисних покриттів, продовженню терміну служби вантажних вагонів та зниженню експлуатаційних витрат. Отже, розробка науково обґрунтованої класифікації полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів є важливою науково-технічною задачею.

Мета та задачі дослідження. Метою даного науково-прикладного дослідження є систематизація та класифікація існуючих полімерних покриттів, придатних для захисту несівних складових вантажних вагонів. Результати цього дослідження сприятимуть оптимізації вибору захисних покриттів, підвищенню довговічності та економічності експлуатації вантажного рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- проаналізувати існуючі типи полімерних покриттів, що застосовуються в транспортному машинобудуванні та суміжних галузях;
- виявити ключові вимоги до захисних покриттів несівних складових вантажних вагонів, враховуючи умови їхньої експлуатації;
- дослідити фізико-механічні та експлуатаційні властивості різних класів полімерних матеріалів щодо їхньої придатності для захисту зазначених елементів;
- розробити критерії класифікації полімерних покриттів, які б враховували специфіку застосування на несівних компонентах вантажних вагонів;
- створити науково обґрунтовану класифікацію полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів на основі розроблених критеріїв.

Виклад основного матеріалу. З метою продовження терміну служби вантажних вагонів та зниження експлуатаційних витрат особливої уваги заслуговує вибір антикорозійних захисних систем для несівних конструкцій. Полімерні покриття є

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ключовим елементом у боротьбі з корозією та механічним зносом, забезпечуючи ефективний бар'єрний і хімічний захист. У статті розглянуто класифікацію полімерних систем залежно від їхнього хімічного складу, призначення, технології нанесення та експлуатаційних властивостей.

1) Полімерні покриття класифікують за такими основними критеріями:

Хімічна основа полімеру: епоксидні, поліуретанові, алкідні, акрилові, фторвмісні, гібридні (комбіновані системи).

Функціональне призначення: ґрунтовки, проміжні шари, фінішні покриття.

Метод нанесення: пневматичне розпилення, безповітряне нанесення, занурення, електростатичне напылення.

Умови експлуатації: атмосферостійкі, хімічностійкі, термостійкі, антикорозійні з катодним захистом.

Типові системи полімерних покриттів: Епоксидні. Висока адгезія до сталі, хімічна стійкість, ідеальні для ґрунтовок. Недоліки: слабка УФ-стійкість.

Поліуретанові. Висока еластичність, зносостійкість і атмосферостійкість. Використовуються як фінішні шари.

Алкідні та акрилові. Простота нанесення, низька вартість. Обмежена довговічність, чутливість до агресивних середовищ.

Гібридні покриття. Поєднують властивості декількох полімерів, наприклад, епоксид + поліуретан або силан + акрил. Забезпечують універсальний захист (корозія + механіка + УФ). В (табл.1) розглянемо типи полімерних покриттів в транспортному машинобудуванні.

Несівні елементи у вантажних вагонах, такі як рами, балки, кузовні ферми та з'єднувальні вузли, потребують покриттів з підвищеною адгезією, еластичністю та стійкістю до атмосферних та механічних навантажень. Оптимальними є багатшарові системи: епоксидна ґрунтовка + проміжний шар з нанодобавками + поліуретановий фініш.

Полімерні покриття, що застосовуються у транспортному машинобудуванні, мають різні характеристики, які дозволяють адаптувати їх під конкретні умови експлуатації – від дешевих алкідів до високотехнологічних гібридів. Вибір покриття залежить від вимог до довговічності, стійкості до впливів середовища, доступного бюджету, технологій нанесення та умов обслуговування.

Таблиця 1. – Типи полімерних покриттів в транспортному машинобудуванні

Тип покриття	Характеристика	Сфера застосування	Переваги	Недоліки
1	2	3	4	5
Епоксидні	Висока адгезія, хімічна стійкість	Рами, платформи, деталі ходових частин, ґрунтовки	Хімічна стійкість, міцність, захист сталі	Слабка УФ-стійкість, потребує захисту фінішним шаром
Поліуретанові	Еластичність, УФ- та зносостійкість	Кузови автомобілів, фінішні шари, зовнішні елементи	Атмосферостійкість, висока міцність, декоративний вигляд	Вища вартість, складніше нанесення

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
Алкідні	Простота, низька вартість	Сільськогосподарська техніка, контейнери, внутрішні елементи	Доступність, легке нанесення	Обмежена довговічність, слабка хімічна стійкість
Акрилові	УФ-стійкість, можливість водної форми	Легкові автомобілі, автобуси, зовнішнє оздоблення	Екологічність, швидке висихання, стійкість до сонця	Посередня адгезія, слабка хімічна стійкість
Фторполімерні	Надвисока хімічна та атмосферна стійкість	Спецтехніка, авіація, морський транспорт	Самоочищення, антиобrostання, майже інертність	Дуже висока вартість, складність нанесення
Гібридні	Комбінація переваг кількох полімерів	Залізничний транспорт, мостові споруди, морська галузь	Комплексний захист: корозія + УФ + механіка	Складність у виробництві та контролі якості

Найбільш поширеним методом нанесення є безповітряне розпилення, що забезпечує рівномірне покриття складних поверхонь. Для промислового застосування важлива швидкість висихання та контроль товщини шару.

2) Нижче наведемо ключові вимоги до антикорозійних і захисних покриттів для несівних складових вантажних вагонів із урахуванням реалій їхньої експлуатації:

1. Висока корозійна стійкість. Здатність протистояти впливу вологи, агресивних атмосферних середовищ (соляний туман, кислотні опади) та конденсату. Мінімальний коефіцієнт дифузії води та іонів хлору.

2. Стійкість до механічного впливу. Ударостійкість і зносостійкість при навантаженнях від вібрації, ударів вантажу, тертя сипучих матеріалів. Гнучкість і еластичність, щоб запобігати розтріскуванню та відшаруванню на вигинах і стиках.

3. УФ-стабільність і атмосферостійкість. Здатність зберегти колір і фізико-хімічні властивості під дією сонячного ультрафіолету. Стійкість до екстремальних температурних коливань ($-40 \dots +60 \text{ }^{\circ}\text{C}$) та різких перепадів «зима–літо».

4. Хімічна стійкість. Захист від контакту з мастильними матеріалами, паливно-мастильними речовинами, солями, кислотами чи лугами (в разі транспортування агресивних вантажів).

5. Адгезія до сталевих поверхонь. Міцна первинна адгезія («зчеплення») без передчасного відшарування навіть після тривалого терміну служби. Сумісність з попередніми шарами (грунт → проміжний шар → фініш).

6. Мінімальна товщина при високій ефективності. Забезпечення достатнього бар'єрного захисту при товщині одного шару 150–250 мкм для зниження витрат матеріалів і скорочення часу нанесення.

7. Швидкість висихання та міжшарові інтервали. Час від нанесення до досягнення сухого шару (SD) не більше 2–4 год (при $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$), аби скоротити простої техпроцесу. Можливість нанесення наступного шару вже через 6–12 год без втрати адгезії.

8. Екологічність і безпека. Низький вміст ЛОС (VOC), воднодисперсні або сольвентні системи з мінімальним запахом і токсичністю. Відповідність нормативам щодо захисту працівників і навколишнього середовища.

9. Зручність нанесення й обслуговування. Сумісність з обладнанням (безповітряне розпилення, пульверизатори, валіки) та простота ремонту локальних пошкоджень. Можливість полегшеного очищення і поновлення покриття без повного видалення старого шару.

10. Економічна доцільність. Оптимальне співвідношення ціна/якість: допустима вища первісна вартість у обмін на триваліший строк служби й зменшені витрати на ремонт та простій.

Врахування цих вимог при виборі або розробці полімерних захисних систем для несівних елементів вантажних вагонів дозволяє підвищити надійність рухомого складу, скоротити витрати на обслуговування та продовжити інтервали між ремонтами.

3) Зносостійкість, корозійна стійкість та зниження маси конструкцій є критично важливими факторами у транспортному машинобудуванні, зокрема для вантажних вагонів. Традиційні матеріали, такі як сталь, хоча й мають високі міцнісні характеристики, схильні до корозії та значного зносу в умовах інтенсивної експлуатації. У зв'язку з цим полімерні матеріали привертають дедалі більше уваги як альтернатива або доповнення до металевих компонентів.

Для обґрунтованого вибору полімерного матеріалу важливо враховувати основні критерії оцінювання полімерних матеріалів як фізико-механічні, так і експлуатаційні характеристики, зокрема:

- міцність на розтяг, стиск та згин;
- ударна в'язкість та зносостійкість;
- стійкість до ультрафіолетового випромінювання, вологи, перепадів температур;
- хімічна стійкість до агресивних середовищ (солі, паливно-мастильні матеріали);
- адгезійна здатність до металевих поверхонь;
- вогнестійкість.

Зробимо аналіз полімерних класів:

Термопласти (ПЕ, ПП, ПА, ПС). Ці матеріали характеризуються низькою густиною, хорошою волого- і хімстійкістю. Поліамід (ПА) демонструє хороші механічні властивості, зокрема зносостійкість, тому може бути використаний у з'єднувальних елементах або ущільнювачах.

Термореактивні смоли (епоксидні, поліефірні). Це один із найперспективніших класів для створення покриттів, армованих скловолокном. Епоксидні смоли мають високу адгезію до металів і чудову хімстійкість.

Поліуретани. Відзначаються гнучкістю, зносостійкістю, ударною в'язкістю. Їх доцільно використовувати як елементи демпфування ударів і як покриття для вантажних платформ.

Фторопласти. Високостійкі до агресивних середовищ, проте дорогі й складні в обробці. Використовуються лише у спеціалізованих конструкціях.

Розглянемо матеріали за функціональним призначенням. Несівні елементи: склопластик на основі епоксидної смоли – висока міцність, низька вага; поліамід (ПА) – міцний, зносостійкий, термостійкий.

Захист кузовів: Епоксидні покриття з наповнювачами (цинкові, керамічні) – антикорозійний захист; покриття з поліуретану – зносостійкість, гнучкість, ремонтпридатність; поліетиленове ламінування (HDPE, LDPE) – захист від вологи, солей.

Оптимальним підходом є комбіноване використання полімерів, де термореактивні смоли забезпечують жорсткий захист, а термопласти й поліуретани – гнучкість і ударостійкість.

Особливу увагу слід приділити адгезії до металу та стійкості до кліматичних впливів, особливо у відкритих вантажних вагонах.

Сучасні полімер-композитні матеріали можуть частково або повністю замінити метал у неструктурних або малонавантажених елементах, знижуючи вагу та витрати на обслуговування.

Полімерні матеріали мають значний потенціал для застосування у вантажному залізничному транспорті. Використання термореактивних смол (епоксидних) доцільне для створення антикорозійних захисних покриттів, поліуретанів – для елементів, що потребують ударостійкості, а полімер-композитів – для зниження маси несівних елементів.

4) Критерії класифікації полімерних покриттів для вантажних вагонів:

1. За функціональним призначенням: захисні покриття – призначені для захисту від корозії, впливу вологи, солей, ПММ; зносостійкі покриття – призначені для протидії абразивному впливу сипких вантажів; демпфувальні (ударопоглинаючі) покриття – амортизують удари при навантаженні/розвантаженні. Ізоляційні покриття – запобігають тепловтратам або електричним впливам.

2. За типом основи (матриці): епоксидні – висока адгезія, жорсткість, термостійкість; поліуретанові – еластичність, зносостійкість, хімічна стійкість; поліефірні – дешевші, менш стійкі до вологи; акрилові – атмосферостійкість, слабка механічна міцність; гібридні (епоксиполіуретан, поліуретан-силікон) – для спеціальних умов.

3. За способом нанесення: напилення (розпилення холодне/гаряче); наливні (самовирівнювальні системи); ламінування (наприклад, з HDPE-плівкою); клейове – приклеювання полімерних листів (зазвичай для ПЕ/ПП).

4. За товщиною та структурою шару: тонкошарові (до 0,5 мм) – антикорозійні фарби та ґрунти; середньої товщини (0,5–2 мм) – для загального зносу і захисту; товстошарові (2–10 мм) – зносостійкі або амортизувальні шари; багатошарові системи – праймер + основне покриття + захисний шар.

5. За стійкістю до експлуатаційних факторів: температурна стійкість (–50 °С...+100 °С і більше); хімічна стійкість (кислоти, луги, солі, мастила); УФ-стійкість (для відкритих кузовів); адгезія до сталі (≥ 4 МПа – високий рівень).

6. За ремонтпридатністю та обслуговуванням: самовідновлювані (рідкі поліуретани з пам'яттю); ремонтвані вручну (з частковим зняттям); неремонтвані (одноразові – потребують повної заміни). Приклади покриттів для складових вантажних вагонів (табл. 2).

Класифікація полімерних покриттів (рис. 1) для несівних елементів вантажних вагонів має бути багатокритеріальною і враховувати умови експлуатації, тип вантажу, метод нанесення та ремонтпридатність. Найбільш універсальними є поліуретанові покриття, що поєднують зносостійкість, гнучкість і довговічність.

Нижче, як приклад застосування, наведена адаптована класифікація полімерних покриттів для несівних складових вантажного вагона-цистерни (рис. 2), враховуючи специфіку його експлуатації (перевезення рідин, хімікатів, нафтопродуктів, харчових продуктів тощо).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 2. – Приклади покриттів для складових вантажних вагонів

Складова вагона	Рекомендований тип покриття
Підніжки, поручні	Поліуретанове або порошкове поліестерне
Кузов всередині	Епоксидне з антикорозійними властивостями
Зовнішні стінки	Акрил-поліуретанова система
Люки, кришки, клапани	Порошкове, фторполімерне (при хімічних вантажах)



Рис. 1. Класифікація полімерних покриттів для несівних складових вантажних вагонів



Рис. 2. Класифікація полімерних покриттів для несівних елементів вагона-цистерни

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Вагони-цистерни відіграють ключову роль у транспортуванні рідких і газоподібних вантажів, зокрема хімічних речовин, нафти, нафтопродуктів та харчових продуктів. У зв'язку з цим до матеріалів, які використовуються для їхнього виготовлення та захисту, висуваються високі вимоги щодо хімічної стійкості, механічної міцності та довговічності. Одним із найбільш ефективних способів забезпечення захисту внутрішніх та зовнішніх поверхонь цистерн є застосування полімерних покриттів (табл. 3).

Таблиця 3. – Приклади покриттів для складових вагона-цистерни

Елемент	Рекомендоване покриття
Внутрішні стінки цистерни	Епоксидне або фенол-епоксидне
Зовнішні поверхні кузова	Поліуретанове, поліестерне порошкове
Люки, фланці, клапани	Фторполімерні, епоксидні
Платформа, поручні, підніжки	Порошкове полімерне, термопластичне
Вентиляційні або дренажні елементи	Антикорозійні + антистатичні

Полімерні покриття дозволяють значно підвищити корозійну стійкість металевих елементів вагона-цистерни, зменшити витрати на технічне обслуговування, а також подовжити термін експлуатації рухомого складу. Сучасні полімери, такі як епоксидні, поліуретанові, фторвмісні та інші системи, забезпечують ефективний захист навіть у агресивних умовах експлуатації. Вибір типу покриття залежить від характеру вантажу, умов експлуатації та вимог до екологічної безпеки.

5) Комплексний підхід до класифікації покриттів – основа ефективного вибору матеріалів. Запропонована класифікація, побудована на поєднанні хімічних, функціональних, експлуатаційних та технологічних критеріїв, дозволяє систематизувати існуючі полімерні покриття і полегшує прийняття рішень при їх виборі для конкретних умов роботи вантажних вагонів. Такий підхід забезпечує більш науково обгрунтовану та технічно виважену стратегію захисту конструкцій.

Хімічна природа покриття повинна відповідати умовам експлуатації. Епоксидні системи доцільно використовувати на внутрішніх поверхнях, які піддаються впливу агресивних середовищ (наприклад, мінеральних добрив), але не піддаються УФ-навантаженню. Поліуретанові покриття, особливо аліфатичні, мають високу УФ-стійкість і рекомендовані для зовнішніх елементів кузова. Бітумно-полімерні мастики ефективні для захисту днищ, рами та підвагонних конструкцій, де важливі еластичність і стійкість до ударів.

Гібридні системи – оптимальне рішення для багатофункціонального захисту. Покриття, що поєднують епоксидний ґрунт + поліуретановий фінішний шар, демонструють найкращі показники довговічності в умовах циклічних навантажень, вологості, УФ та перепадів температур. Їх застосування дозволяє продовжити термін служби металоконструкцій на 10–15 років без капітального ремонту.

Врахування умов експлуатації є ключовим при виборі покриттів. Для вагонів, що експлуатуються в північних регіонах, необхідні покриття з високою еластичністю при низьких температурах (до -40°C), наприклад, SBS-модифіковані або поліуретанові покриття. В умовах високої вологості або морського клімату – пріоритет мають епоксидно-поліамідні покриття, які стійкі до соляного туману та води. Для

промислових районів з викидами кислотних і лужних парів – слід використовувати хімічно стійкі епоксидні або фторполімерні матеріали.

Метод нанесення має відповідати властивостям покриття і технологічним можливостям депо/заводу. Для серійного виробництва або ремонту вагонів з високою продуктивністю рекомендоване безповітряне розпилення двокомпонентних матеріалів. У польових умовах доцільно застосовувати однокомпонентні покриття з можливістю ручного нанесення (кисть, валик). Контроль товщини шару має бути обов'язковим етапом процесу – невідповідність товщини знижує ефективність захисту.

Для досягнення найвищої ефективності захисту несівних елементів вантажних вагонів доцільно застосовувати багатошарові системи покриттів, у складі яких:

- Грунт (антикорозійний) – забезпечує адгезію та первинний захист;
- Проміжний шар (еластичний/армуючий) — гасить механічні впливи;
- Фінішне покриття (УФ-стійке) – зберігає зовнішній вигляд і стійкість до атмосфери.

Висновки. Полімерні покриття для несівних конструкцій вантажних вагонів мають класифікацію за рядом характеристик, що дозволяє адаптувати системи до конкретних умов експлуатації. Сучасні гібридні покриття з функціональними добавками відкривають нові можливості для продовження ресурсу рухомого складу та зниження витрат на технічне обслуговування.

Розроблена класифікація полімерних покриттів систематизує існуючі матеріали та полегшує їхній вибір для конкретних умов експлуатації несівних елементів вантажних вагонів. Визначено основні критерії класифікації, включаючи хімічний склад полімеру, механічні властивості, адгезію до металевої поверхні, стійкість до корозії, абразивного зношування та температурних коливань.

Встановлено, що епоксидні покриття демонструють високу адгезію та хімічну стійкість, що робить їх придатними для захисту внутрішніх поверхонь вагонів від агресивних вантажів. Поліуретанові покриття характеризуються високою еластичністю та стійкістю до абразивного зношування, що є важливим для зовнішніх елементів, які піддаються механічним впливам.

Акрилові покриття вирізняються стійкістю до ультрафіолетового випромінювання та атмосферних впливів, що робить їх доцільними для фарбування зовнішніх поверхонь кузова. Розроблено рекомендації щодо вибору полімерних покриттів залежно від типу несівного елемента вагона (стіни, дах, двері, підлога) та умов його експлуатації.

Експериментально підтверджено вплив попередньої підготовки металевої поверхні на адгезію та довговічність полімерних покриттів. Досліджено ефективність різних методів нанесення полімерних покриттів (розпилення, валкування, пензлем) та їхній вплив на якість захисного шару.

Проведено порівняльний аналіз вартості різних типів полімерних покриттів та їхньої економічної ефективності з урахуванням терміну служби. Виявлено перспективні напрямки в розробці нових полімерних композицій з покращеними експлуатаційними характеристиками для вагонобудування.

Запропоновано методи контролю якості нанесених полімерних покриттів, включаючи візуальний огляд, вимірювання товщини шару та адгезійні випробування. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів фарбування та підвищення надійності й довговічності вантажних вагонів.

Рекомендується комплексне використання полімерних рішень з урахуванням механічного навантаження, впливу навколишнього середовища та технологічності

монтажу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптацію наноконструкцій та багатошарових покриттів у сфері вагонобудування. Практичне впровадження розробленої класифікації та рекомендацій сприятиме зменшенню витрат на ремонт і обслуговування вагонного парку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Fischer H., Wagner D. Accelerated aging tests for polymer coatings in railway environments. *Polymer Degradation and Stability*. 2020. 179. 109275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109275>
2. Li X., Wang Y., Zhang G. Superhydrophobic polymer coatings for marine and transport applications. *Advanced Materials Interfaces*. 2021. 8(4). 2001498. DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.202001498>
3. Wang H., Liu J., Yang M. Hybrid silane-polyurethane coatings for heavy equipment: Corrosion and abrasion resistance. *Surface and Coatings Technology*. 2020. 404. 126484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.126484>
4. Almusallam A. A., Khan F. M., Dulara S., Aslam J. Performance of epoxy-polyamide coatings reinforced with nano-TiO₂ for corrosion protection of steel. *Progress in Organic Coatings*. 2020. 147. 105803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.105803>
5. Chen C., He Y., Xiao G., Zhong F., Li H., Wu Y. Self-healing coatings with microcapsules for corrosion protection of mild steel: Effects of microcapsule content and pH of the healing agent. *Corrosion Science*. 2021. 184. 109357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.109357>
6. Dhoke S. K., Khanna A. S., Sinha T. J. M. Effect of nano-ZnO particles on the corrosion behavior of alkyd-based waterborne coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2020. 140. 105502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.105502>
7. Guo L., Zhang G., Wang D., Qiao Y., Wang J. Polydopamine-based superhydrophobic surfaces for corrosion protection of carbon steel. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. 76. 61–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.018>
8. 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. 21(1). 28–34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
9. Fomin O., Lovska A., Kulbovskyi 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. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2019. 2(7). 6–12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7))
10. Jia Z., Kou K., Qin M., Wu H., Pich A. Advanced polyurethane coatings for enhanced corrosion protection of rail infrastructure. *Chemical Engineering Journal*. 2022. 428. 131156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131156>
11. Li W., Li D., Fu Q., Pan C. Graphene oxide/waterborne polyurethane composites for corrosion protection of mild steel. *Journal of Materials Science*. 2020. 55(24). 10538–10553. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04750-z>
12. Palanivel V., Zhu D., van Ooij W. J. Corrosion protection properties of organofunctional silanes for aluminum alloys. *Progress in Organic Coatings*. 2021. 153. 106157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106157>
13. Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. 5(1). 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
14. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 2(1)(92). 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
15. Ramezanzadeh B., Karimi B., Ramezanzadeh M. Epoxy nanocomposite coatings reinforced with functionalized graphene oxide for long-term corrosion protection of steel. *Composites Part B: Engineering*. 2020. 183. 107686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107686>
16. Sathiyarayanan S., Azim S. S., Venkatachari G. Corrosion protection of steel by polyaniline-TiO₂ composite coatings. *Electrochimica Acta*. 2020. 338. 135803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135803>
17. Zhang F., Ju P., Pan M., Zhang D., Huang Y., Li G. Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review. *Corrosion Science*. 2021. 144. 74–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.08.005>

O. V. Fomin

National Transport University

St. I. Ohienko, 19, Kyiv, 03049, Ukraine

tel: +38 (067) 813-97-88, E-mail: fominaleksejvictorovic@gmail.com

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

O. S. Kozynka

National Transport University

St. I. Ohienko, 19, Kyiv, 03049, Ukraine

tel: +38 (093) 376-13-73, E-mail: kozynka1520mm@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>

A. O. Klymash

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

St. Ioanna Pavla II, 17, Kyiv, 01042, Ukraine

tel: +38 (050) 999-32-60 E-mail: klimash@snu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-1195>

V. V. Obukhovsky

National Transport University

St. I. Ohienko, 19, Kyiv, 03049, Ukraine

tel: +38 (067) 356-48-25, E-mail: obukhovskyv@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0007-3021-4714>

O. A. Lutsenko

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

St. Ioanna Pavla II, 17, Kyiv, 01042, Ukraine

tel: +38 (050) 590-65-85 E-mail: lutsenko@snu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1070-8887>

CLASSIFICATION OF POLYMER COATINGS FOR LOAD-BEARING COMPONENTS OF FREIGHT CARS

This article presents a classification of polymer coatings used to protect the load-bearing components of freight railway cars. The coatings are categorized by chemical composition, functional purpose, and operating conditions. Special attention is given to modern hybrid coatings that combine high corrosion resistance, mechanical strength, and weather durability. The article analyzes the physical, mechanical, and operational properties of polymer materials of various classes in order to assess their suitability for use in freight rail transport. It also examines polymers that have the potential to be used for protecting structural elements and car bodies of freight wagons. Key selection criteria for polymers are identified, and recommendations are provided for the optimal use of materials depending on operating conditions. The article formulates guidelines for selecting optimal coatings and application technologies. The material is intended for railway industry specialists and developers of protective systems.

Key words: transportation, mechanics, railway transport, transport technologies, freight cars, industry, maintenance, operation, reliability, protective coatings.

REFERENCES

1. Fischer, H., & Wagner, D. (2020). Accelerated aging tests for polymer coatings in railway environments. *Polymer Degradation and Stability*, 179, 109275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109275>
2. Li, X., Wang, Y., & Zhang, G. (2021). Superhydrophobic polymer coatings for marine and transport applications. *Advanced Materials Interfaces*, 8(4), 2001498. DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.202001498>
3. Wang, H., Liu, J., & Yang, M. (2020). Hybrid silane-polyurethane coatings for heavy equipment: Corrosion and abrasion resistance. *Surface and Coatings Technology*, 404, 126484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126484>
4. Almusallam, A. A., Khan, F. M., Dulara, S., & Aslam, J. (2020). Performance of epoxy-polyamide coatings reinforced with nano-TiO₂ for corrosion protection of steel. *Progress in Organic Coatings*, 147, 105803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105803>
5. Chen, C., He, Y., Xiao, G., Zhong, F., Li, H., & Wu, Y. (2021). Self-healing coatings with microcapsules for corrosion protection of mild steel: Effects of microcapsule content and pH of the healing agent. *Corrosion Science*, 184, 109357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109357>
6. Dhoke, S. K., Khanna, A. S., & Sinha, T. J. M. (2020). Effect of nano-ZnO particles on the corrosion behavior of alkyd-based waterborne coatings. *Progress in Organic Coatings*, 140, 105502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105502>
7. Guo, L., Zhang, G., Wang, D., Qiao, Y., & Wang, J. (2021). Polydopamine-based superhydrophobic surfaces for corrosion protection of carbon steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 76, 61–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.018>
8. 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. DOI: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
9. 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. *East European Journal of Advanced Technologies*, 2(7), 6–12. DOI: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7))
10. Jia, Z., Kou, K., Qin, M., Wu, H., & Pich, A. (2022). Advanced polyurethane coatings for enhanced corrosion protection of rail infrastructure. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131156>
11. Li, W., Li, D., Fu, Q., & Pan, C. (2020). Graphene oxide/waterborne polyurethane composites for corrosion protection of mild steel. *Journal of Materials Science*, 55(24), 10538–10553. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04750-z>
12. Palanivel, V., Zhu, D., & van Ooij, W. J. (2021). Corrosion protection properties of organofunctional silanes for aluminum alloys. *Progress in Organic Coatings*, 153, 106157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106157>
13. Sulim, A. O., Fomin, O. V., Khozya, P. O., & Mastepan, A. (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>
14. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovsky, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1)(92), 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
15. Ramezanzadeh, B., Karimi, B., & Ramezanzadeh, M. (2020). Epoxy nanocomposite coatings reinforced with functionalized graphene oxide for long-term corrosion protection of steel. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107686>
16. Sathiyarayanan, S., Azim, S. S., & Venkatachari, G. (2020). Corrosion protection of steel by polyaniline–TiO₂ composite coatings. *Electrochimica Acta*, 338, 135803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135803>
17. Zhang, F., Ju, P., Pan, M., Zhang, D., Huang, Y., & Li, G. (2021). Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review. *Corrosion Science*, 144, 74–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.08.005>

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 8 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».

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

6. структуровану анотацію українською та англійською мовами (мета, методика, результати, наукова новизна, практична значимість) одним абзацем, обсягом від 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;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- **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;
- **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):

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

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 графи, 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** розмішувати 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.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів треба подавати безпосередньо під формулою в тій послідовності, в якій вони дані у формулі. Значення кожного символу і числового коефіцієнта треба подавати з нового рядка. Перший рядок пояснення починають зі слова «де» без двокрапки.

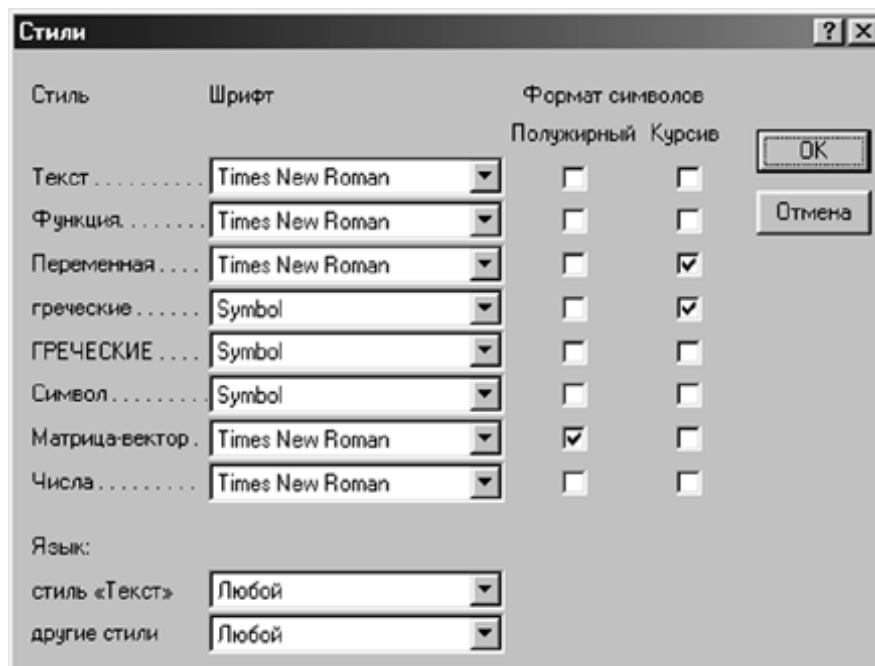
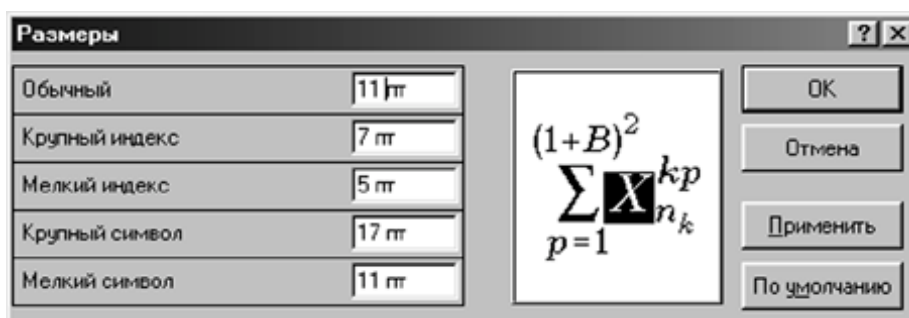
Рівняння і формули треба виділяти з тексту вільними рядками. Вище і нижче кожної формули потрібно залишити не менше одного вільного рядка. Якщо рівняння не вміщується в один рядок, його слід перенести після знака рівності (=) або після знаків плюс (+), мінус (–), множення (·) і ділення (:).

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:



РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

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);
- 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 8 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 and Russian letters - only in straight font.

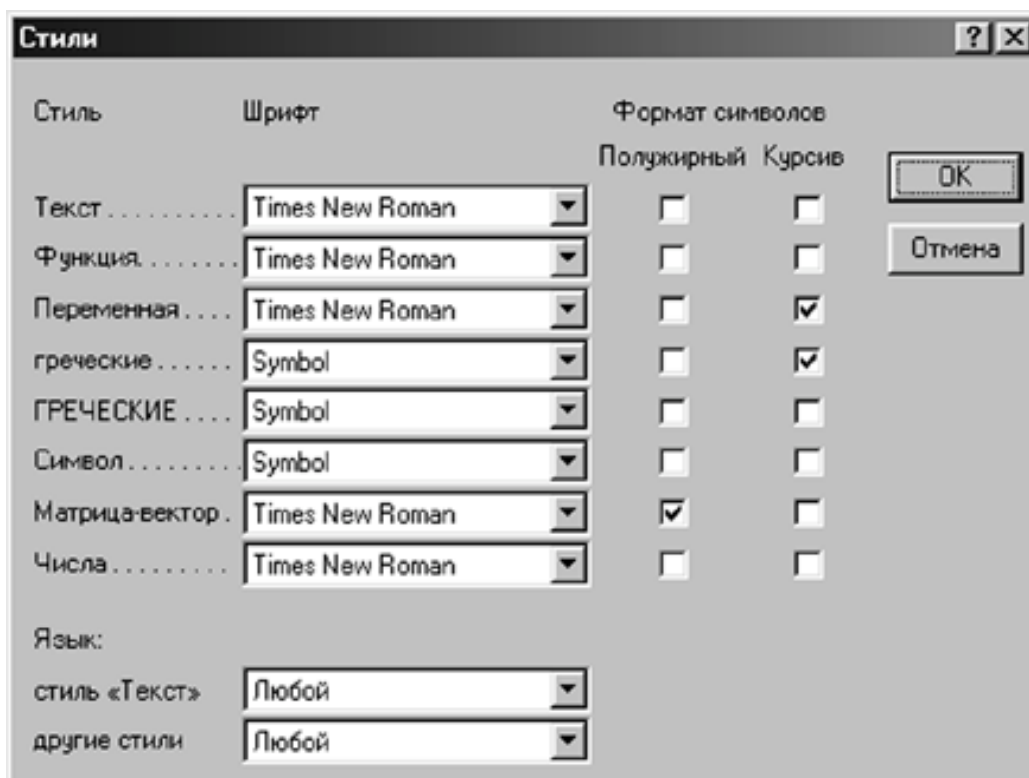
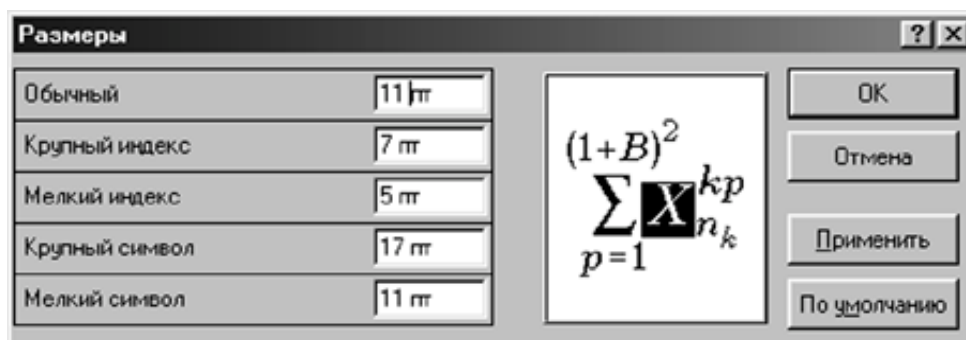
- Explanations of the values of symbols and numerical coefficients should be given directly below the formula in the sequence in which they are given in the formula. The value of each symbol and numerical coefficient must be entered on a new line. The first line of the explanation begins with the word «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:



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

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

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>).