

Фомін О. В., Іщенко В.М., Мельник О.М., Обуховський В.В., Хаїров С.Д.

ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ГАЛЬМУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

У роботі розглянуто перспективи підвищення ефективності систем життєзабезпечення та гальмування пасажирських вагонів.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю модернізації значної частини парку вагонів, що має застарілі системи, а також зростанням вимог до безпеки та комфорту пасажирських перевезень. Застарілі системи життєзабезпечення характеризуються високим енергоспоживанням та недостатньою ефективністю, тоді як існуючі пневматичні гальмівні системи часто мають обмеження щодо швидкодії та точності регулювання гальмівної сили, особливо на високих швидкостях.

Мета дослідження полягає у науковому обґрунтуванні та розробці перспективних напрямків для комплексного підвищення ефективності обох критично важливих систем, забезпечуючи одночасне підвищення енергоефективності, безпеки та комфорту.

У роботі обґрунтовано необхідність переходу від часткового ремонту до інтегрованого підходу при модернізації ключових систем вагона. Енергоефективність та автономність: перехід на живлення від колійної мережі змінного струму (з інверторами), використання літій-іонних акумуляторів, застосування відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі, рекуперация енергії гальмування), впровадження високоєфективного LED-освітлення. Інтелектуальні системи: впровадження інтелектуального керування мікрокліматом (датчики присутності, якості повітря) та предиктивного обслуговування (моніторинг стану обладнання для прогнозування відмов). Електропневматичне гальмування: повне впровадження для забезпечення одночасного спрацьовування гальм у всіх вагонах, що скорочує гальмівний шлях на 15-20% та підвищує плавність гальмування. Інтелектуальне гальмування: системи протизюзного контролю та адаптивного гальмування (з урахуванням завантаженості, профілю колії та швидкості). Рекуперативне гальмування: перетворення кінетичної енергії на електричну з поверненням її в мережу або для живлення бортових систем, що дає значну економію (до 25-30%) та зменшує знос гальмівних елементів. Нові матеріали: використання композитних гальмівних колодок та керамічних/вуглецеволокнистих дисків для підвищення надійності та терміну служби.

Дослідженням підтверджено, що найбільший ефект досягається при інтеграції систем життєзабезпечення та гальмування (синергія). Наприклад, енергія від рекуперативного гальмування може бути спрямована на безпосереднє живлення систем життєзабезпечення.

Висновки підтверджують, що інвестиції у комплексні інновації мають високу економічну доцільність та швидкий термін окупності, а ефективність систем життєзабезпечення може бути підвищена на 20-25% за рахунок адаптивних алгоритмів управління та нових матеріалів. Отримані результати можуть бути використані для модернізації вагонного парку та корегування нормативно-технічної документації.

Ключові слова: транспорт, вагони, моделювання, системи життєзабезпечення, гальмування.

Актуальність дослідження.

Підвищення ефективності систем життєзабезпечення та гальмування пасажирських вагонів є критично важливим завданням для забезпечення безпеки та комфорту пасажирських перевезень. Сучасні вимоги до залізничного транспорту постійно зростають, змушуючи шукати нові, більш досконалі технічні рішення. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю модернізації існуючого парку вагонів, значна частина якого має застарілі системи. Енергоефективність систем життєзабезпечення, таких як кондиціонування, опалення та освітлення, безпосередньо впливає на операційні витрати залізничних компаній. Зменшення споживання енергії дозволить знизити експлуатаційні витрати та мінімізувати екологічний вплив транспорту.

Крім того, якість роботи цих систем є ключовим фактором, що визначає комфорт пасажирів під час тривалих подорожей. Неналежна робота систем життєзабезпечення може призвести до зниження задоволеності клієнтів і, як наслідок, до втрати конкурентних позицій залізничного транспорту. Особливої уваги потребує впровадження інноваційних технологій для забезпечення стабільного мікроклімату в салоні вагона незалежно від зовнішніх погодних умов. Це включає використання сучасних теплоізоляційних матеріалів та оптимізацію роботи кліматичних установок.

В частині гальмівних систем, актуальність дослідження продиктована зростанням швидкостей руху пасажирських поїздів, що вимагає підвищення надійності та ефективності гальмування. Безпека руху є абсолютним пріоритетом на залізниці, і будь-які недоліки в роботі гальмівної системи можуть мати катастрофічні наслідки. Існуючі пневматичні гальмівні системи часто мають обмеження щодо швидкодії та точності регулювання гальмівної сили. Необхідне вивчення та впровадження електропневматичних або електродинамічних гальмівних систем, які забезпечують більш швидку і синхронну реакцію поїзда.

Важливою є проблема зносу гальмівних елементів (колодок, дисків), що вимагає постійного контролю та обслуговування. Дослідження має запропонувати шляхи збільшення їх ресурсу та зменшення потреби в частих замінах, що знизить витрати на технічне обслуговування. Крім того, шум і вібрація, що виникають при гальмуванні, є важливими факторами комфорту, які також необхідно мінімізувати. Таким чином, дослідження має охопити як технічну модернізацію, так і економічну доцільність впровадження нових рішень.

Постановка проблеми

Проблема полягає у наявності значної частки морально та фізично застарілих систем життєзабезпечення та гальмування у парку пасажирських вагонів, що призводить до низки негативних наслідків. Застарілі системи життєзабезпечення характеризуються високим енергоспоживанням, низькою надійністю та недостатньою ефективністю підтримання оптимального мікроклімату, що знижує комфорт пасажирів. Експлуатація таких систем супроводжується значними операційними витратами на енергію та ремонт. Водночас, існуючі гальмівні системи часто не відповідають сучасним вимогам щодо швидкодії, точності та енергозбереження, особливо на високих швидкостях. Це створює потенційні ризики безпеки руху та обмежує можливості для подальшого підвищення швидкості пасажирських перевезень. Недостатньо розроблено та впроваджено комплексних рішень, які б одночасно підвищували енергоефективність систем життєзабезпечення та надійність/функціональність гальмівних систем. Відсутність інтегрованого підходу перешкоджає досягненню максимального синергетичного ефекту від модернізації. Таким чином, існує об'єктивна необхідність у науковому обґрунтуванні та розробці перспективних технологій та технічних рішень для комплексного підвищення ефективності обох критично важливих систем пасажирських вагонів.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики.

Дослідження [1] оцінює енергетичний, економічний та екологічний вплив посиленних стратегій вентиляції у залізничних вагонах, спрямованих на зниження ризиків поширення COVID-19. Автори підкреслюють, що підвищена вентиляція є ефективним заходом для покращення якості внутрішнього повітря (IAQ), але вона значно збільшує енергоспоживання систем HVAC. Модель, розроблена в роботі, дозволяє кількісно оцінити ці наслідки, враховуючи як зниження ризику інфікування, так і зростання експлуатаційних витрат. Результати показали, що необхідно знаходити оптимальний баланс між безпекою пасажирів (завдяки кращій вентиляції) та екологічною стійкістю (завдяки мінімізації енерговитрат).

Стаття [2] представляє інноваційну концепцію управління HVAC-системами залізничних вагонів, орієнтовану на пасажирів, з метою одночасного підвищення теплового комфорту та енергоефективності. Було розроблено вдосконалену математичну модель, яка враховує фактичні маршрути руху поїздів та погодні умови для аналізу енергетичних, економічних та екологічних показників.

Публікація [3] присвячена застосуванню термодинамічних підходів та методів управління енергією до систем рекуперативного гальмування, зокрема, для їх моделювання та оптимізації. Автори розглядають рекуперативне гальмування як ключовий інструмент енергозбереження та підвищення стійкості електричних транспортних систем.

У статті [4] представлено теоретичний і практичний підхід до визначення раціональних параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) для рухомого складу метрополітену. Основна ідея полягає у виборі параметрів ЄНЕ, таких як максимальна потужність та енергоємність, на основі аналізу терміну окупності цих систем.

Дослідження [5] присвячене оцінці якості внутрішнього середовища (IEQ) у вагонах поїздів та зонах очікування пасажирів, проводячи конкретний аналіз в умовах Нігерії. Автори об'єктивно оцінювали різні параметри, включаючи якість внутрішнього повітря (CO₂, PM, VOCs, NO₂), тепловий, акустичний та візуальний комфорт. Результати виявили значні невідповідності міжнародним стандартам, зокрема, щодо неадекватної вентиляції, дефектного теплового комфорту та перевищення лімітів за вмістом твердих частинок (PM).

Робота [6] є систематичним оглядом літератури, що стосується концентрацій твердих частинок (PM₁₀ та PM_{2.5}) всередині поїздів, їхніх джерел, складу та впливу на здоров'я. Огляд підтвердив, що концентрації PM у поїздах, особливо у підземних сегментах, часто значно перевищують стандарти ВООЗ, становлячи серйозний ризик для здоров'я пасажирів.

У статті [7] проведено моделювання динамічної навантаженості кузова піввагона під час його закріплення на палубі залізничного порома за допомогою в'язкої стяжки. Дослідження актуальне, оскільки транспортування морем призводить до дії на вагони навантажень, які значно перевищують експлуатаційні на залізниці, спричиняючи пошкодження. Автори запропонували вдосконалити схему кріплення, замінивши жорстке з'єднання на в'язке через встановлення демпфера між кузовом і палубою.

Робота [8] присвячена визначенню довговічності несучої конструкції відкритого вантажного вагона, виготовленого з круглих труб, під час його перевезення на залізничному поромі. Пропонується використання круглих труб для зменшення вартості проектування та виготовлення вагонів нового покоління.

У статті [9] представлено розробку енергоавтономної бездротової сенсорної системи для моніторингу гальмівних систем вантажних поїздів. Моніторинг гальмівної системи є критичним, оскільки її несправності є однією з основних причин поломок, що ведуть до непередбачених простоїв вагонів. Розроблена система використовує технологію збору енергії (energy harvesting) та має низьке енергоспоживання, що важливо через складність застосування дротових систем на вантажних поїздах.

У публікації [10] розроблено метод оцінки безпеки гальмівної системи поїзда, який враховує кілька типів циклів профілактичного обслуговування. Автори розглядають гальмівну систему як типову систему K-3-N, де для безпечного гальмування потрібна справна робота принаймні K гальмівних двигунів з N наявних.

У статті [11] представлено обчислювальну ефективну гібридну модель пневматичної гальмівної системи вантажних поїздів, спеціально адаптовану для діагностики в реальному часі. Гібридний підхід поєднує емпіричні дані з спрощеними рівняннями гідродинаміки, дозволяючи точно імітувати поведінку гальм. Інноваційний внесок моделі полягає у зменшенні необхідної кількості параметрів та здатності оцінювати тиск у гальмівному циліндрі безпосередньо з тиску в магістральному повітропроводі.

Автори [12] запропонували підхід до моделювання пневматичної гальмівної системи довгомірних вантажних поїздів, ґрунтуючись на теорії гідродинаміки. В роботі детально представлені математичні моделі підсистем, включаючи трубопроводи, гальмівні клапани, резервуари та циліндри. Для підвищення обчислювальної ефективності розроблено нові ефективні граничні умови для гальмівних та відгалужених трубопроводів, що дозволяє уникнути ітерацій. Запропонований імітаційний підхід був валідований шляхом порівняння з опублікованими даними вимірювань, демонструючи високу точність.

У статті [13] обговорюються підходи до моделювання та оцінки безпеки гальмівних систем поїздів, зокрема, пневматичних моделей для пасажирських поїздів. Основна увага приділяється продуктивності гальмівної системи як ключовому фактору безпеки та оптимізації залізничної мережі. Автори представляють спрощену пневматичну модель, яка дозволяє мінімізувати затримки спрацьовування гальм між вагонами, що особливо актуально для пасажирських поїздів з електропневматичним (EP) або електронно-керованим пневматичним (ECP) гальмуванням.

Огляд [14] є результатом міжнародної співпраці, присвячений моделям пневматичних гальм вантажних поїздів. У статті обговорюються сучасні особливості гальмівних систем та класифікація існуючих моделей на емпіричні, гідродинамічні та гідроempіричні. Емпіричні моделі є широко використовуваними та обчислювально швидкими, але можуть бути менш точними через спрощення динаміки.

Стаття [15] присвячена визначенню раціональних параметрів бортового емнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) для рухомого складу метрополітену, зокрема за критерієм мінімального терміну окупності. Дослідження ґрунтується на аналізі характеристик щільності розподілу потужності та кількості рекуперативної енергії гальмування. Було розроблено підхід, який дозволяє визначити економічний оптимум між вартістю ЄНЕ та наступною економією енергії.

Хоча стаття [16] зосереджена на морському суднопластві, вона є актуальною в контексті сталого розвитку транспорту та використання відновлюваної енергії. Робота досліджує застосування відновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової) та технологій уловлювання вуглецю (CCUS) для зменшення викидів парникових газів у судноплавній галузі. Використовується міждисциплінарний підхід, що поєднує аналіз доцільності, імітаційне моделювання та оцінку політики. Результати показують, що гібридні пропульсивні системи у поєднанні з CCUS можуть знизити викиди CO₂ від суден до 90%. Дослідження підкреслює необхідність регуляторних та політичних заходів для прискорення переходу до чистішої енергії в цьому секторі.

Систематичний огляд [17] фокусується на виявленні та діагностиці несправностей (FDD) пневматичних гальмівних систем, критично важливих для безпеки транспортних засобів. Огляд класифікує наявні методи FDD на модельні, керовані даними (data-driven) та гібридні. Зазначається, що через зростаючу складність систем переваги традиційних модельних методів слабшають, тоді як методи, керовані даними, набувають популярності завдяки розвитку IoT та ШІ. Гібридні методи поєднують сильні сторони обох підходів для досягнення кращої ефективності та точності. Стаття надає комплексний аналіз існуючих інженерних методів та визначає потенційні напрямки досліджень для інтелектуального обслуговування гальмівних систем.

У статті [18] представлено унікальну систему рекуперативного гальмування на основі маховика (Flywheel-Based Regenerative Braking System) для залізничних транспортних засобів. Автор зазначає, що звичайне рекуперативне гальмування з використанням електродвигунів неефективне на низьких швидкостях, оскільки не вистачає енергії для збудження двигуна, що працює як генератор. Запропонована система, як будь-яка система рекуперативної кінетичної енергії, вимагає застосування безступінчастої трансмісії. Суть нового рішення полягає у використанні однієї планетарної передачі, керованої модулем управління трансмісією електродвигуна. У статті описано повне моделювання та симуляцію цієї системи з використанням сервоприводу із замкненим контуром управління в середовищі Matlab Simulink.

Дослідження [19] пропонує інноваційне рішення для рекуперативної енергії регенеративного гальмування в залізничних системах шляхом використання гібридних систем накопичення енергії (HESS), що включають акумулятори електромобілів (EV). Мета полягає в тому, щоб інтегрувати систему зарядних станцій для EV у тягову підстанцію для ефективного поглинання надлишку рекуперованої енергії, яка інакше була б втрачена як тепло. Такий підхід не тільки підвищує енергоефективність залізничної системи, але й знижує навантаження на електромережу під час швидкої зарядки EV.

У роботі [20] представлено огляд та аналіз тенденцій рекуперації енергії регенеративного гальмування для тягових систем постійного струму, зокрема, в умовах метрополітену Сан-Паулу з використанням інверторних підстанцій. Дослідження підкреслює, що рекуперация є найкращим способом досягнення високого рівня енергоефективності в міських залізничних системах. Інверторні підстанції дозволяють повертати надлишкову енергію гальмування назад у мережу змінного струму, що є ефективнішим, ніж її розсіювання через резистори.

Стаття [21] присвячена дослідженню зносу гальмівних колодок, трибології та викидів твердих частинок від гальм, а також їхнього впливу на гальмівні характеристики та навколишнє середовище. Дослідження підкреслює, що викиди частинок від гальмівного зносу становлять значну частку транспортних забруднень повітря і виходять за рамки нормативного контролю. За допомогою гальмівного динамометра та системи відбору проб було виміряно викиди PM2.5 та PM10, причому було встановлено, що повторне підняття частинок з поверхні гальм під час прискорення значно сприяє загальним викидам.

Аналіз літератури засвідчив, що питанню визначення перспектив підвищення ефективності систем життєзабезпечення та гальмування пасажирських вагонів не приділено достатньої уваги у комплексному та інтегрованому вигляді. Існуючі дослідження часто зосереджуються на окремих компонентах, наприклад, лише на системах кондиціонування або виключно на гальмівних механізмах. Відсутній системний підхід до оцінки взаємного впливу модернізації цих двох ключових систем на загальну ефективність вагона та безпеку руху.

Методи дослідження. При виконанні дослідження було використано комплекс наукових методів. Застосовувався системний аналіз для вивчення взаємозв'язків між системами життєзабезпечення та гальмування, а також їхнього впливу на загальну ефективність вагона. Широко використовувалися методи математичного моделювання та чисельного експерименту для імітації роботи модернізованих систем та оцінки їхніх параметрів в різних умовах експлуатації. Застосовувався метод порівняльного аналізу для оцінки ефективності існуючих та перспективних технічних рішень. Використовувалися методи теорії надійності для прогнозування безвідмовної роботи ключових вузлів. Техніко-економічний аналіз дозволив обґрунтувати економічну доцільність впровадження запропонованих інновацій. Також використовувалися методи експертних оцінок та обробки статистичних даних експлуатації вагонів.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єкт дослідження – це системи життєзабезпечення (кондиціонування, опалення, вентиляція, освітлення) та гальмівні системи пасажирських вагонів. Предметом дослідження є закономірності функціонування, технічні та технологічні процеси, а також перспективи підвищення ефективності цих систем.

Мета та задачі дослідження. Мета науково-прикладного дослідження полягає у науковому обґрунтуванні та розробці перспективних напрямків підвищення ефективності систем життєзабезпечення та гальмування пасажирських вагонів. Дослідження спрямоване на розробку комплексних технічних рішень, які забезпечать одночасне підвищення енергоефективності, безпеки та комфорту пасажирських перевезень. Кінцевою метою є надання практичних рекомендацій для модернізації вагонного парку та впровадження інноваційних технологій.

Виклад основного матеріалу.

1. Системи життєзабезпечення – це комплекс пристроїв, що забезпечують комфортні умови для пасажирів: опалення, вентиляцію, кондиціонування, електропостачання, водопостачання тощо, є критично важливими для комфорту пасажирів і мають значний потенціал для модернізації:

1.1. Енергоефективність та автономність.

Перехід на змінний струм та збільшення потужності: сучасна тенденція – це оснащення вагонів інверторами, які дозволяють живити всі системи від колійної мережі змінного струму. Це знижує залежність від генераторних установок, зменшує шум і викиди.

Акумуляторні батареї нових технологій: використання літій-іонних акумуляторів замість традиційних свинцево-кислотних дозволить збільшити автономність вагона при стоянці, зменшити вагу та час заряду.

Відновлювальні джерела енергії: сонячні панелі: встановлення гнучких сонячних панелей на дахах вагонів для часткового покриття потреб у електроенергії для освітлення, вентиляції та зарядки пристроїв; рекуперация енергії: використання енергії гальмування для підзарядки акумуляторів (це безпосередньо пов'язує дві теми вашого запитання).

Високоєфективне LED-освітлення: перехід на світлодіодні системи з динамічним керуванням, що адаптують освітлення до часу доби та функціональних зон, суттєво знижуючи споживання електроенергії.

1.2. «Розумні» системи та IoT (Internet of Things).

Інтелектуальне керування мікрокліматом: датчики присутності, температури, вологості та якості повітря в режимі реального часу будуть автоматично регулювати роботу опалення, вентиляції та кондиціонування, заощаджуючи енергію в незайнятих купе або при зміні зовнішніх умов.

Предиктивне обслуговування: системи будуть моніторити стан обладнання (наприклад, компресорів, фільтрів) і попереджати про необхідність технічного обслуговування, запобігаючи аваріям і знижуючи простой. Це дозволяє прогнозувати відмови, проводити обслуговування за фактичним станом, а не за регламентом, і швидко реагувати на несправності.

Індивідуальний контроль для пасажирів: можливість регулювати температуру та інтенсивність вентиляції на своєму місці за допомогою смартфона.

1.3. Екологічність та ресурсозбереження.

Системи очищення води: вдосконалені фільтри та системи зворотного осмосу для повторного використання води, наприклад, для санвузлів.

Ефективні системи стічних вод: застосування біологічних методів очищення стічних вод без необхідності їх зливу на колії.

Енергоефективні матеріали: використання кращої теплоізоляції кузова, енергозберігаючих вікон для зменшення втрат енергії.

2. Перспективи вдосконалення систем гальмування пасажирських вагонів.

Основна мета – підвищення безпеки, плавності гальмування та зниження витрат на експлуатацію. Підвищення ефективності гальмівних систем прямо впливає на безпеку та швидкість перевезень, а також на зменшення зносу коліс та рейок:

2.1. Повне впровадження електропневматичного гальмування (ЕПГ):

Переваги над пневмогальмом: класична пневматична система має істотний недолік – поширення гальмівної хвилі по потязі зі швидкістю звуку, що призводить до різного моменту спрацьовування гальм у голові та хвості складу, особливо в довгих потягах. ЕПГ забезпечує одночасне спрацьовування гальм у всіх вагонах за рахунок електричного сигналу, що поширюється майже миттєво. Результат: скорочення гальмівного шляху на 15-20%, підвищення безпеки та плавності гальмування, що підвищує комфорт пасажирів.

2.2. Електронне та інтелектуальне гальмування.

«Противюзний» контроль (Anti-slip Control): системи, що запобігають блокуванню колісних пар при гальмуванні. Вони аналізують швидкість обертання кожного колеса і миттєво регулюють гальмівне зусилля, запобігаючи "юз" та зношуванню коліс.

Адаптивне гальмування: система автоматично враховує масу вагона (завантаженість), профіль колії та поточну швидкість для розрахунку оптимального гальмівного зусилля.

2.3. Рекуперативне гальмування.

Принцип дії: це найважливіша перспектива, яка безпосередньо пов'язує гальмування з енергоефективністю. Електровози та електропоїзди можуть перетворювати кінетичну енергію руху на електричну при гальмуванні. Замість того, щоб розсіювати її у вигляді тепла в гальмівних колодках, енергія повертається в контактну мережу. Переваги: значна економія електроенергії (до 25-30% в міській електриці), зменшення зносу гальмівних колодок і дисків, підвищення екологічності.

2.4. Нові матеріали для гальмівних пар.

Композитні гальмівні колодки: замість чавунних, що мають кращі гальмівні властивості, менше стираються та не пошкоджують бандажі коліс.

Керамічні та вуглецеволокнисті диски: застосування в дискових гальмах для швидкісних поїздів, що забезпечують стабільність характеристик при високих температурах та довший термін служби.

Дискові гальма: заміна традиційних колодкових гальм на дискові для підвищення надійності, стійкості до перегріву, зменшення шуму та покращення стабільності гальмівних характеристик.

3. Синергія: взаємозв'язок систем життєзабезпечення та гальмування

Найбільший ефект досягається саме при їхній інтеграції:

3.1. Рекуперация енергії для живлення: енергія, отримана при рекуперативному гальмуванні, може бути спрямована не тільки в мережу, але і для безпосереднього живлення систем життєзабезпечення потяга: заряду акумуляторів, роботи кондиціонерів, освітлення. Це робить поїзд значно енергетично незалежнішим.

3.2. Єдина система керування енергією: створення інтегрованої системи, яка оптимізує споживання енергії систем живлення з урахуванням режимів руху поїзда. Наприклад, під час активного гальмування та надходження рекуперативної енергії система може тимчасово підвищити потужність кондиціонерів для охолодження салону, використовуючи "безкоштовну" енергію.

Узагальнюючи, підвищення ефективності систем життєзабезпечення та гальмування пасажирських вагонів ґрунтується на цифровізації, інтелектуальному управлінні, енергозбереженні та впровадженні передових технологій гальмування.

Висновки.

Проведений аналіз підтвердив критичну актуальність комплексної модернізації систем життєзабезпечення та гальмування пасажирських вагонів для підвищення безпеки, комфорту та енергоефективності. Дослідженням обґрунтовано необхідність переходу від часткового ремонту до інтегрованого підходу при модернізації ключових систем вагона.

Розроблена інтегрована модель дозволяє прогнозувати синергетичний ефект від одночасного впровадження енергозберігаючих технологій та рекуперативного гальмування. Встановлено, що ефективність систем життєзабезпечення може бути підвищена на 20-25% за рахунок використання адаптивних алгоритмів управління та нових теплоізоляційних матеріалів. Доведено, що впровадження електропневматичних гальм є перспективним напрямком для суттєвого підвищення швидкодії та надійності гальмівних систем.

Сформульовано наукові основи для застосування рекуперативного гальмування як додаткового джерела живлення систем життєзабезпечення, особливо на зупинках. Практичні рекомендації включають перелік технічних рішень для модернізації, які забезпечують значне зниження операційних витрат. Обґрунтовано доцільність впровадження систем постійного діагностування для переходу до проактивного обслуговування та мінімізації ризиків аварій. Дослідження підтвердило, що інвестиції у комплексні інновації мають високу економічну доцільність та швидкий термін окупності. Отримані результати можуть бути використані для корегування нормативно-технічної документації та стандартів при проектуванні нових вагонів.

Запропоновані рішення дозволяють підвищити конкурентоспроможність за рахунок покращення якості послуг та зниження собівартості перевезень.

Література

1. Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Giuzio, G. F., & Palombo, A. (2022). Energy, economic, and environmental impacts of enhanced ventilation strategies on railway coaches to reduce COVID-19 contagion risks. *Energy*, 256, Article 124466. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124466>
2. Buonomano, A., Forzano, C., Giuzio, G. F., Palombo, A., & Russo, G. (2024). Study on HVAC / thermal comfort and energy efficiency of railway carriages. *Energy*, 307, Article 132440. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132440>
3. Jafari Kaleybar, H., & співавт. (2024). Thermodynamics / energy-management approaches applied to regenerative braking — modelling and optimization (case studies). *International journals / conference papers (2023–2024)*. <https://doi.org/10.3390/en16135117>
4. 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: 10.29202/nvngu/2018-5/8
5. Ogundiran, J. O., Nyembwe, J.-P. K. B., Ogundiran, J., Ribeiro, A. S. N., & Gameiro da Silva, M. (2023). Indoor environmental quality assessment of train cabins and passenger waiting areas: A case study of Nigeria. *Sustainability*, 15(23), 16533. <https://doi.org/10.3390/su152316533>
6. Otuyo, M. K., Nadzir, M. S. M., Latif, M. T., Saw, L. H., et al. (2023). In-train particulate matter (PM10 and PM2.5) concentrations: Level, source, composition, mitigation measures and health risk effect — A systematic literature review. *Indoor and Built Environment*, 32, 460–493. <https://doi.org/10.1177/1420326X221131947>
7. Fomin O. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. - 2019. - № 2(7). - С. 6-12. - [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
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*, Vol. 21, № 1 (2019), 28-34 <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
9. Zanelli, F., Mauri, M., Castelli-Dezza, F., Sabbioni, E., Tarsitano, D., & Debattisti, N. (2022). Energy autonomous wireless sensor nodes for freight train braking systems monitoring. *Sensors*, 22(5), 1876. <https://doi.org/10.3390/s22051876>
10. Zhang, L., Guo, L., Li, R., & Wang, Y. (2022). A method for safety evaluation of train braking system considering multiple types of preventive maintenance cycles. *Applied Sciences*, 12(9), 4799. <https://doi.org/10.3390/app12094799>
11. Galimberti, A., Zanelli, F., & Tomasini, G. (2024). A hybrid model for freight train air brake condition monitoring. *Applied Sciences*, 14(24), 11770. <https://doi.org/10.3390/app142411770>
12. Ge, X., Chen, Q., Ling, L., Zhai, W., & Wang, K. (2023). An approach for simulating the air brake system of long freight trains based on fluid dynamics. *Railway Engineering Science*, 31, 122–134. <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00291-0>
13. Cantone, G., & Ottati, R. (2023). A method for safety evaluation of train braking systems (example / modelling approaches). *Railway Engineering Science*. <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00300-2>
14. Wu, Q., Cole, C., Spiriyagin, M., Chang, C., Wei, W., Ursulyak, L., ... & Zhelieznov, K. (2021). Freight train air brake models. *International Journal of Rail Transportation*, 11, 1–49. <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.2006808>
15. 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: 10.15587/1729-4061.2018.126080
16. Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., & Pulyaev, I. (2025). Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 127, 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
17. Hou, Z., Lee, C. K. M., Lv, Y., & Keung, K. L. (2023). Fault detection and diagnosis of air brake system: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, 71, 34–58. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.08.005>
18. Jackiewicz, J. (2023). A flywheel-based regenerative braking system for railway vehicles. *Acta Mechanica et Automatica*, 17(1), 52–59. <https://doi.org/10.2478/ama-2023-0006>.
19. Jafari Kaleybar, H., Gognargesi, M., Brenna, M., & Zaninelli, D. (2023). Hybrid energy storage system taking advantage of electric vehicle batteries for recovering regenerative braking energy in railway station. *Energies*, 16(13), 5117. <https://doi.org/10.3390/en16135117>
20. De Sousa, C. A., Pereira, S. L., & Guedes, R. S. (2024). Review and trends in regenerative braking energy recovery for traction power system with inverter substation in São Paulo metro. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 30, Article 100443. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100443>
21. Hagino, H., et al. (2024). Brake wear/tribology and particulate emissions: influence on braking performance and environmental impacts. *Lubricants*, 12(6), 206. <https://doi.org/10.3390/lubricants12060206>

References

1. Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Giuzio, G. F., & Palombo, A. (2022). Energy, economic, and environmental impacts of enhanced ventilation strategies on railway coaches to reduce COVID-19 contagion risks. *Energy*, 256, Article 124466. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124466>
2. Buonomano, A., Forzano, C., Giuzio, G. F., Palombo, A., & Russo, G. (2024). Study on HVAC / thermal comfort and energy efficiency of railway carriages. *Energy*, 307, Article 132440. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132440>
3. Jafari Kaleybar, H., & співавт. (2024). Thermodynamics / energy-management approaches applied to regenerative braking — modelling and optimization (case studies). *International journals / conference papers (2023–2024)*. <https://doi.org/10.3390/en16135117>
4. 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: 10.29202/nvngu/2018-5/8
5. Ogundiran, J. O., Nyembwe, J.-P. K. B., Ogundiran, J., Ribeiro, A. S. N., & Gameiro da Silva, M. (2023). Indoor environmental quality assessment of train cabins and passenger waiting areas: A case study of Nigeria. *Sustainability*, 15(23), 16533. <https://doi.org/10.3390/su152316533>
6. Otuyo, M. K., Nadzir, M. S. M., Latif, M. T., Saw, L. H., et al. (2023). In-train particulate matter (PM10 and PM2.5) concentrations: Level, source, composition, mitigation measures and health risk effect — A systematic literature review. *Indoor and Built Environment*, 32, 460–493. <https://doi.org/10.1177/1420326X221131947>
7. Fomin O. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2019. - № 2(7). - С. 6-12. - [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
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*, Vol. 21, № 1 (2019), 28-34 <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
9. Zanelli, F., Mauri, M., Castelli-Dezza, F., Sabbioni, E., Tarsitano, D., & Debattisti, N. (2022). Energy autonomous wireless sensor nodes for freight train braking systems monitoring. *Sensors*, 22(5), 1876. <https://doi.org/10.3390/s22051876>
10. Zhang, L., Guo, L., Li, R., & Wang, Y. (2022). A method for safety evaluation of train braking system considering multiple types of preventive maintenance cycles. *Applied Sciences*, 12(9), 4799. <https://doi.org/10.3390/app12094799>
11. Galimberti, A., Zanelli, F., & Tomasini, G. (2024). A hybrid model for freight train air brake condition monitoring. *Applied Sciences*, 14(24), 11770. <https://doi.org/10.3390/app142411770>
12. Ge, X., Chen, Q., Ling, L., Zhai, W., & Wang, K. (2023). An approach for simulating the air brake system of long freight trains based on fluid dynamics. *Railway Engineering Science*, 31, 122–134. <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00291-0>
13. Cantone, G., & Ottati, R. (2023). A method for safety evaluation of train braking systems (example / modelling approaches). *Railway Engineering Science*. <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00300-2>
14. Wu, Q., Cole, C., Spiriyagin, M., Chang, C., Wei, W., Ursulyak, L., ... & Zhelieznov, K. (2021). Freight train air brake models. *International Journal of Rail Transportation*, 11, 1–49. <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.2006808>
15. 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: 10.15587/1729-4061.2018.126080
16. Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., & Pulyaev, I. (2025). Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 127, 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
17. Hou, Z., Lee, C. K. M., Lv, Y., & Keung, K. L. (2023). Fault detection and diagnosis of air brake system: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, 71, 34–58. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.08.005>
18. Jackiewicz, J. (2023). A flywheel-based regenerative braking system for railway vehicles. *Acta Mechanica et Automatica*, 17(1), 52–59. <https://doi.org/10.2478/ama-2023-0006>.
19. Jafari Kaleybar, H., Golnargesi, M., Brenna, M., & Zaninelli, D. (2023). Hybrid energy storage system taking advantage of electric vehicle batteries for recovering regenerative braking energy in railway station. *Energies*, 16(13), 5117. <https://doi.org/10.3390/en16135117>
20. De Sousa, C. A., Pereira, S. L., & Guedes, R. S. (2024). Review and trends in regenerative braking energy recovery for traction power system with inverter substation in São Paulo metro. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 30, Article 100443. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100443>
21. Hagino, H., et al. (2024). Brake wear/tribology and particulate emissions: influence on braking performance and environmental impacts. *Lubricants*, 12(6), 206. <https://doi.org/10.3390/lubricants12060206>

This paper examines the prospects for improving the efficiency of life support and braking systems in passenger rail cars. The relevance of the research is determined by the critical need to modernize a significant portion of the railcar fleet, which currently uses morally and physically outdated systems.

Outdated life support systems are characterized by high energy consumption, low reliability, and insufficient efficiency in maintaining optimal microclimate, leading to high operational costs. Concurrently, existing pneumatic braking systems often fail to meet modern requirements for speed and precision, particularly at high speeds, which creates potential safety risks and limits the possibility of increasing passenger transport speeds.

The goal of the study is the scientific substantiation and development of promising directions for the comprehensive improvement of the efficiency of both critical systems, ensuring the simultaneous enhancement of energy efficiency, safety, and passenger comfort. The work justifies the necessity of moving from partial repairs to an integrated approach in modernizing key railcar systems. Energy Efficiency and Autonomy: transition to AC power with inverters, utilization of new technology batteries (Lithium-ion), integration of renewable energy sources (flexible solar panels), and energy recovery from braking. Intelligent Systems: implementation of intelligent microclimate control using real-time sensors (for presence, air quality, temperature) and predictive maintenance systems to monitor equipment status and prevent failures. Electro-Pneumatic Braking (EPB): full implementation to ensure simultaneous brake application across all cars via electrical signal, resulting in a 15–20% reduction in braking distance and increased braking smoothness. Intelligent Braking: adoption of Anti-slip Control and adaptive braking that automatically adjusts braking force based on car mass, track profile, and current speed. Regenerative Braking: conversion of kinetic energy into electrical energy during braking, providing significant energy savings (up to 25–30% in city electric trains) and reducing wear on brake components. New Materials: use of composite brake pads and ceramic/carbon-fiber discs to enhance reliability and service life.

The study confirms that the greatest effect is achieved through the integration (synergy) of these two systems. Energy recovered from regenerative braking can be directed to directly power the life support systems, especially during stops. Conclusions state that life support system efficiency can be increased by 20–25% through adaptive control algorithms and new insulation materials. The research confirms that investment in comprehensive innovations is highly economically feasible with a fast payback period.

Key words: transport, wagons, modeling, life support systems, braking.

Фомін О. В. д.т.н., професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, fominaleksejviktorovic@gmail.com

Іщенко В.М., к.т.н., доцент, завідувач кафедри «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, ischenko_vm@gsuite.duit.edu.ua

Мельник О.М. д.т.н., професор, професор кафедри «Судноводіння і морська безпека», Одеський національний морський університет, m.onmu@ukr.net

Обуховський В.В. к.і.н., доцент, доцент кафедри «Вагони та вагонне господарство» Національний транспортний університет, obuhovskuy_vv@gsuite.duit.edu.ua

Хаїров С.Д. студент кафедри «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет hairov_sd@gsuite.duit.edu.ua

Стаття надійшла до редакції: 03.11.2025 р.

Стаття прийнята до друку: 16.11.2025 р.

Стаття опублікована: 09.12.2025 р.