

О. В. Фомін

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

В. М. Іщенко

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

Н. С. Брайковська

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

Ю. В. Щербина

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Аналіз останніх досліджень.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Виклад основного матеріалу.

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

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

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

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

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

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

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

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

Основні методи, які використовуються ЦД для прогнозування:

1. Фізико-математичне моделювання зносу.

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

2. Методи машинного навчання (ML).

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

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

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

3. Гібридне моделювання.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

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

Використання цих методів дозволяє оператору отримати таку інформацію:

Таблиця 1.

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

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

А. Фізико-математичний блок.

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

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

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

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

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

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

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

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

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

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

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

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

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

4. Трибологічна підсистема (Модель зносу).

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

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

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

Б. Блок машинного навчання.

Цей блок слугує для корекції фізичної моделі та прогнозування подій.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ЛІТЕРАТУРА

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

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

O. V. Fomin

National Transport University

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

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

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

V. M. Ishchenko

National Transport University

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

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

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

N. S. Braikovska

National Transport University

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

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

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

Iu. V. Shcherbyna

National Transport University

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

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

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

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

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

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

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

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

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

REFERENCES

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

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