

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (J7)

УДК 629.463.027.27-048.35

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЛЬМОВОГО ОБЛАДНАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ ПНЕВМАТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Доктори техн. наук В. Г. Равлюк, А. О. Ловська, асп. Я. В. Дерев'янчук,
студ. Н. Л. Стасів

IMPROVING THE RELIABILITY OF PASSENGER RAILCAR BRAKE EQUIPMENT DIAGNOSTICS BASED ON PNEUMATIC PROCESS PARAMETER ANALYSIS

Dr. Sc. (Tech.) V. G. Ravlyuk, Dr. Sc. (Tech.) A. O. Lovska,
PhD Student Ya. V. Derevianchuk, Student N. L. Stasiv

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362536>



Анотація. У статті розглянуто питання підвищення достовірності діагностування гальмового обладнання пасажирських вагонів з урахуванням експлуатаційних факторів. Реалізовано діагностичну систему, у межах якої забезпечено контроль параметрів пневматичних процесів та організовано передавання даних у режимі реального часу. Експериментальними дослідженнями, проведеними на вибірці з 316 гальмових вузлів, виявлено відхилення, зокрема перевищення тиску до 0,53 МПа. Запропонованим підходом забезпечено підвищення достовірності діагностування з 50,3 до 60,3 %, а з урахуванням вагових коефіцієнтів – із 32,7 до 45,1 %.

Ключові слова: автогальма, вагон, безпека руху, діагностика, достовірність, залізничний транспорт, моніторинг, повітророзподільник, рухомий склад, транспортна інженерія.

Abstract. The paper addresses the problem of improving the reliability of diagnostics of braking equipment in passenger railcars, taking into account current requirements for operational safety and rolling stock efficiency. It has been established that existing monitoring systems are primarily focused on detecting already developed failures and have limited capability to identify early deviations in the operating parameters of brake components. This reduces the effectiveness of maintenance procedures and complicates the process of making well-grounded operational decisions.

A diagnostic system for passenger car braking equipment has been developed and implemented, providing monitoring of pneumatic process parameters, including pressure in the brake cylinder and brake pipe, recording of braking time characteristics, and real-time transmission of diagnostic data using modern information technologies. Experimental studies were conducted on a sample of 316 brake units, including air distributors No. 292 and electro-pneumatic distributors No. 305, which ensured the acquisition of representative data on the performance of braking systems under various operating conditions.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Равлюк В. Г., Ловська А. О., Дерев'янчук Я. В., Стасів Н. Л., 2026.

The results of the study revealed deviations in the operation of braking equipment, in particular, an increase in brake cylinder pressure up to 0.53 MPa during two-stage braking. Such deviations may indicate improper adjustment, leading to accelerated wear of components and reduced reliability of the braking system.

An approach to assessing diagnostic reliability is proposed, based on the analysis of the structure of decision-making with consideration of its consistency with the actual technical condition of the object and the application of weighting coefficients reflecting the criticality of errors. Taking into account the impact of different types of erroneous decisions on the overall effectiveness of diagnostic control allows for a more substantiated evaluation of system performance and improves its adaptability to real operating conditions.

The obtained results demonstrate an increase in the diagnostic reliability indicator from 50.3 to 60.3%, and from 32.7 to 45.1% when weighted coefficients are applied, confirming the effectiveness of the proposed approach for use in passenger railcar operation.

Keywords: automatic brakes, railcar, operational safety, diagnostics, reliability, railway transport, monitoring, air distributor, rolling stock, transport engineering.

Вступ. У сучасних умовах функціонування залізничного транспорту питання гарантування безпеки руху та надійності роботи рухомого складу набувають особливої актуальності [1-5]. Важливу роль у цьому відіграє технічний стан гальмового обладнання пасажирських вагонів, оскільки саме від його справності залежить ефективність гальмування і загальна безпека експлуатації поїзда.

Практика експлуатації показує, що більшість існуючих систем контролю технічного стану гальмових вузлів орієнтовані переважно на виявлення вже наявних відмов. Водночас їхні можливості фіксувати початкові відхилення параметрів функціонування залишаються обмеженими. Це ускладнює своєчасне виявлення потенційно небезпечних станів і знижує ефективність організації технічного обслуговування.

Одним із важливих аспектів у цьому контексті є достовірність діагностування, яка визначає відповідність отриманих результатів фактичному технічному стану об'єкта. Недостатня достовірність призводить до помилкових рішень під час експлуатації, що може спричиняти як зайві витрати на обслуговування, так і підвищення ризику виникнення транспортних подій.

У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалення підходів щодо діагностування гальмового обладнання пасажирських вагонів, зокрема на основі аналізу параметрів пневматичних процесів, які найбільш повно відображають особливості його функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних умовах експлуатації пасажирського рухомого складу особливого значення набувають питання забезпечення надійності та ефективності роботи гальмових систем. У зв'язку з цим значна кількість наукових досліджень присвячена аналізу процесів, що відбуваються у пневматичних елементах гальмового обладнання, а також розробленню математичних моделей і методів діагностування технічного стану систем у процесі експлуатації.

У роботі [6] досліджено особливості застосування протитюзних пристроїв з електропневматичними клапанами та обґрунтовано доцільність використання систем контролю технічного стану гальмового обладнання. Запропоновані рішення спрямовані на підвищення рівня безпеки руху та ефективності роботи гальмової системи. Разом із тим основну увагу в дослідженні приділено функціонуванню протитюзних пристроїв, тоді як питання автоматизованого

діагностування несправностей повітророзподільників і оцінювання достовірності результатів контролю практично не розглянуті.

У дослідженні [7] запропоновано комплексний підхід щодо оцінювання ефективності гальмових систем пасажирських і вантажних вагонів, який поєднує результати експериментальних досліджень і математичного моделювання. Розроблені моделі дають змогу визначати гальмовий шлях з урахуванням умов експлуатації та ряду зовнішніх факторів. Водночас аналіз технічного стану окремих елементів гальмового обладнання, зокрема повітророзподільників, у роботі висвітлено недостатньо, що обмежує можливості використання підходу для діагностування.

Теоретичні питання створення нових типів гальмових систем із покращеними експлуатаційними характеристиками розглянуто в роботі [8]. Автори приділяють увагу впливу конструктивних параметрів на надійність роботи вузлів і їхню вартість. Проте питання застосування бортових інформаційно-діагностичних систем і контролю технічного стану обладнання в режимі реального часу залишилися поза межами детального аналізу.

У статті [9] запропоновано паралельну обчислювальну схему моделювання процесів у пневматичних гальмових системах, що допомагає підвищити швидкість розрахунків без суттєвого зниження точності результатів. Незважаючи на ефективність запропонованого підходу для моделювання процесів, питання оперативного діагностування технічного стану гальмового обладнання в умовах реальної експлуатації у роботі не розглянуто.

У роботі [10] проаналізовано сучасні підходи щодо моделювання пневматичних гальмових систем, зокрема емпіричних, гідродинамічних і гібридних моделей. Визначено основні переваги та обмеження кожного з підходів. Разом із тим недостатньо уваги приділено застосуванню

таких моделей для оцінювання технічного стану гальмового обладнання саме пасажирських вагонів, що ускладнює їх використання у практичних умовах експлуатації.

Метод виявлення початкових несправностей гальмових систем із використанням алгоритму Variable Control Limit наведено в роботі [11]. Отримані результати свідчать про можливість підвищення точності діагностування за рахунок раннього виявлення відхилень параметрів функціонування системи. Водночас дослідження орієнтоване переважно на електропоїзди та не враховує особливості роботи гальмового обладнання пасажирських вагонів локомотивної тяги.

У дослідженні [12] запропоновано гібридну модель моніторингу стану пневматичних гальм вантажних поїздів у режимі реального часу, яка забезпечує прогнозування параметрів тиску з достатньо високою точністю. Однак наведений підхід розроблений переважно для вантажного рухомого складу та не враховує специфіку функціонування гальмових систем пасажирських вагонів і особливості оцінювання достовірності діагностичних рішень.

Аналіз наукових джерел показав, що більшість сучасних досліджень спрямована на вдосконалення моделей пневматичних процесів і розроблення методів контролю переважно для вантажного рухомого складу. При цьому питання оцінювання технічного стану гальмового обладнання пасажирських вагонів, зокрема повітророзподільників, а також підвищення достовірності результатів діагностування в умовах експлуатації залишаються недостатньо дослідженими, що обумовлює необхідність подальшого розвитку відповідних методів і засобів контролю.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення достовірності діагностування гальмового обладнання пасажирських вагонів через удосконалення підходу щодо

оцінювання результатів діагностичного контролю.

З огляду на сформульовану мету дослідження визначено такі завдання:

– проаналізувати сучасні системи контролю та діагностування гальмового обладнання пасажирських вагонів і визначити їхні основні недоліки;

– розробити діагностичну систему гальм пасажирських вагонів для випробування вузлів і оцінювання їхніх параметрів;

– розробити підхід щодо оцінювання достовірності діагностування та кількісно оцінити ефективність запропонованої системи на основі експериментальних даних.

Наукова новизна полягає в удосконаленні підходу щодо оцінювання достовірності діагностування, який враховує структуру ухвалених рішень і різну критичність можливих помилок, що дає змогу більш об'єктивно оцінювати технічний стан гальмових вузлів пасажирських вагонів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання в інформаційно-діагностичних системах пасажирських вагонів для підвищення ефективності технічного обслуговування та зниження ймовірності виникнення транспортних подій.

Основна частина дослідження. Для контролю автоматичних гальм рухомого складу розроблено стаціонарні (зовнішні) і бортові системи, що забезпечують контроль окремих елементів і основних параметрів гальмових систем рухомого складу. Для визначення сучасного рівня розвитку бортових систем контролю доцільно розглянути реалізацію таких систем на прикладі високошвидкісного рухомого складу.

У США, Канаді, Австралії, ПАР, Китаї впроваджують пневматичні гальма з електронним керуванням. Застосування електроннопневматичних гальм на залізницях Quebec Cartier Mining (QCM, Канада) і Spoornet (ПАР) дає змогу скоротити на 5-15 % витрати пального, збільшити на 20 % пропускну спроможність залізниці, покращити керування поїзда, підвищити швидкість, покращити безпеку руху, зменшити повздовжні зусилля, що покращує збереження вантажів, зменшити знос механічної частини гальм (гальмових колодок на 25-35 %) [13-15]. Ця система електроннопневматичних гальм складається з обладнання на локомотиві та обладнання на вагоні з повітророзподільником EP-60 (рис. 1).

Для перевірки контролю стану гальм на залізницях застосовують спеціальні системи контролю.

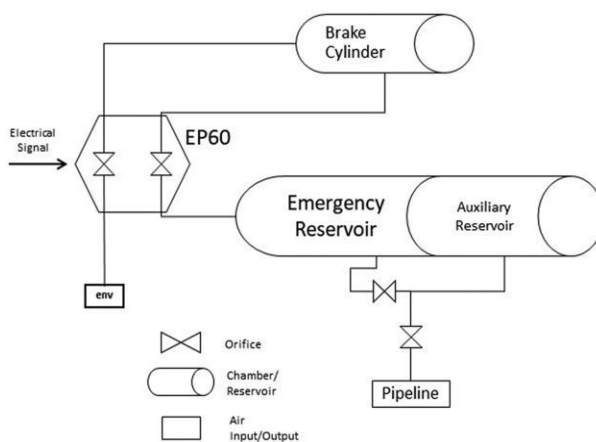


Рис. 1. Повітророзподільник EP-60 і схема його роботи

У сучасних умовах цифровізації залізничного транспорту активно впроваджують інтелектуальні системи технічної діагностики гальмового обладнання, що поєднують пневматичні, електронні та цифрові компоненти контролю. Такі системи допомагають проводити моніторинг параметрів тиску, витоків повітря, температури та зносу гальмових колодок у реальному часі.

Завдяки використанню мікропроцесорних сенсорних модулів і систем обробки даних на основі машинного навчання забезпечено автоматичне виявлення несправностей і прогнозування терміну служби вузлів гальмової системи.

Зокрема, у дослідженнях італійських науковців запропоновано гібридну модель моніторингу стану пневматичних гальм вантажних поїздів з урахуванням динаміки потоку повітря.

Модель повітряного гальма, подана в цій роботі, є складовою спільної дослідницької ініціативи з Mercitalia Intermodal (Мілан, Італія), спрямованої на створення алгоритмів діагностики гальмових систем вантажних поїздів у режимі реального часу для впровадження в бездротову бортову систему моніторингу. Графічна анотація на рис. 2 окреслює методологічний підхід, прийнятий для досягнення цієї діагностичної мети. Головним аспектом цього підходу є реалізація моделі повітряного гальма з використанням програмного забезпечення Matlab R2021b для точного оцінювання тиску в гальмовому циліндрі (ГЦ). Будь-які розбіжності між розрахунковим та експериментально контрольованим тиском у ГЦ можуть служити індикаторами потенційних несправностей у компонентах повітряного гальма [12].

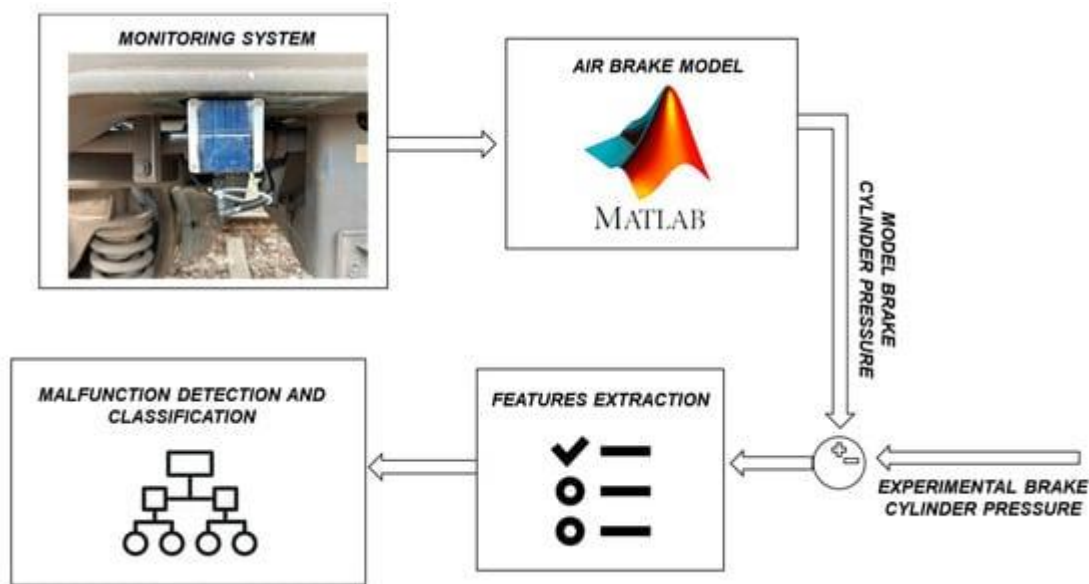


Рис. 2. Графічний виклад прийнятого методологічного підходу

Це допомагає оцінити технічний стан у процесі руху поїзда без необхідності зупинки складу.

Паралельно відбувається інтеграція систем контролю гальм із централізованими автоматизованими системами керування

поїздами (CBTC, ERTMS/ETCS), що підвищує рівень безпеки руху. Такі рішення впроваджують у сучасних високошвидкісних поїздах Siemens Velaro, Alstom Avelia, Hitachi AT400 та ін., де стан гальмових систем контролюють в

автоматичному режимі з візуалізацією даних на пульті машиніста.

У сучасних умовах цифровізації залізничного транспорту особливо актуальними є інтелектуальні системи діагностики гальмового обладнання, що поєднують пневматичні, електронні та цифрові компоненти. Такі системи забезпечують моніторинг тиску, витоків повітря, температури і ступеня зносу гальмових елементів у режимі реального часу.

Незважаючи на високий рівень розвитку існуючих систем контролю гальм, вони мають низку суттєвих недоліків. Зокрема, більшість із них орієнтована переважно на реєстрацію вже наявних відмов, а не на їх раннє прогнозування, що обмежує можливості превентивного технічного обслуговування. Для більшості систем характерна складність інтеграції в існуючий парк рухомого складу, особливо за умов різнотипності вагонів і відсутності уніфікованих інтерфейсів обміну даними. Також слід зазначити обмеженість функціоналу щодо оперативного передавання діагностичної інформації в реальному часі та недостатню інформативність для ухвалення рішень навченим персоналом.

З урахуванням виявлених недоліків існуючих систем контролю гальмового обладнання та з метою підвищення ефективності діагностування було розроблено новий підхід щодо розроблення діагностичної системи гальм пасажирських вагонів (ДСГВ) [16]. Основною ідеєю запропонованого рішення є поєднання засобів вимірювання основних параметрів гальмової системи з інтелектуальною обробкою даних і можливістю їх передавання в режимі реального часу. Такий підхід дає змогу не лише фіксувати поточний стан гальм, але і своєчасно виявляти передумови виникнення відмов. Це обумовлює необхідність розроблення нових підходів щодо діагностування гальмового обладнання пасажирських вагонів.

ДСГВ для контролю гальмових вузлів пасажирських вагонів реалізує функцію світлової індикації стану гальмового обладнання, що допомагає оперативно оцінювати його поточний режим роботи. Зокрема, зелений сигнал відповідає попущеному стану гальм, жовтий – частковому гальмуванню, червоний – повному гальмуванню, тоді як білий або синій сигнал інформує про перевищення допустимого тиску в системі та інші несправності. Така система індикації забезпечує наочність і швидкість сприйняття інформації навченим персоналом.

Передають діагностичну інформацію як дротовими, так і бездротовими каналами зв'язку із застосуванням сучасних телекомунікаційних технологій, зокрема GPS/GSM/GPRS і *Wi-Fi*, із подальшим накопиченням і зберіганням даних на сервері. Це створює умови для централізованого моніторингу стану гальмових систем і подальшого аналізу отриманих даних.

Застосування ДСГВ забезпечує такі переваги:

- діагностування електропневматичних гальмових систем у режимі реального часу;
- автоматичне виявлення та ідентифікацію відхилень і несправностей;
- формування та передавання сигналів тривоги з виходом параметрів за допустимі межі;
- своєчасне інформування експлуатаційного персоналу про поточний стан гальмового обладнання;
- накопичення та облік циклів роботи гальмових систем для подальшого прогнозування їхнього ресурсу і технічного стану.

Аналіз функціональних можливостей показує, що ДСГВ має важливе значення для підвищення безпеки руху. Зокрема, у випадку формального («Фіктивного») випробування гальм система забезпечує отримання об'єктивної інформації про їхній

реальний стан із відображенням даних на дисплеї машиніста і збереженням в архіві.

ДСГВ є універсальною та може бути встановлена на пасажирських вагонах різних типів і років побудови. З економічної точки зору, застосування ДСГВ забезпечує своєчасне виявлення несправностей і передавання інформації до пунктів технічного обслуговування або формування

поїздів, що дає змогу підвищити ефективність організації ремонтних робіт.

ДСГВ створена на базі гальмової випробувальної лабораторії кафедри «Інженерія вагонів та якість продукції» Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ), що допомагає моделювати роботу гальм пасажирських і вантажних вагонів (рис. 3).

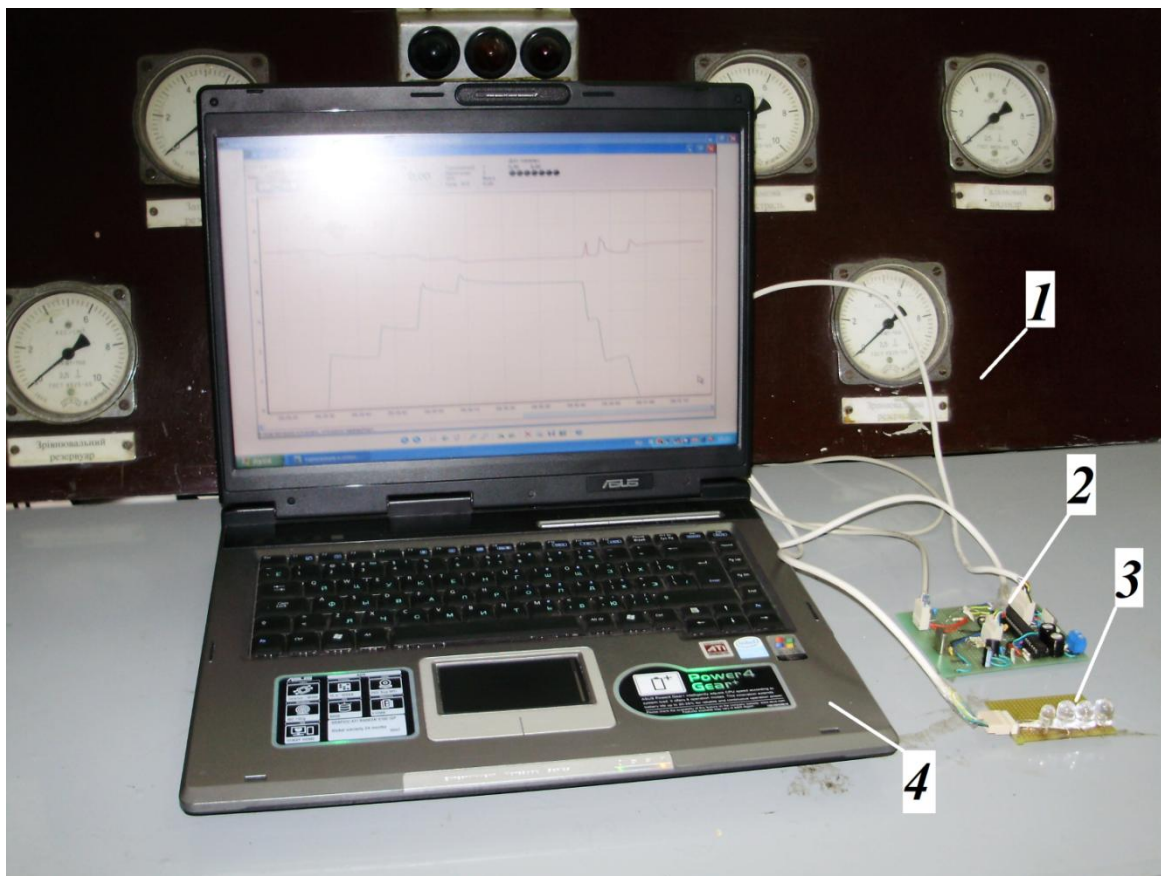


Рис. 3. Діагностична система гальм пасажирських вагонів на базі випробувальної лабораторії: 1 – стенд для випробовування повітророзподільників № 292 та електроповітророзподільників № 305; 2 – діагностичний пристрій; 3 – світлова індикація; 4 – ноутбук із програмним забезпеченням

Для проведення експериментальних досліджень гальмового обладнання пасажирських вагонів із експлуатаційних підрозділів АТ «Укрзалізниця» було відібрано по 20 зразків повітророзподільників № 292 та електроповітророзподільників № 305, що перебували в експлуатації.

Перед початком випробувань виконано вхідний контроль зразків, який включав зовнішній огляд, перевірку комплектності та оцінювання технічного стану основних вузлів і елементів. Це забезпечило репрезентативність вибірки та підвищило достовірність подальших результатів.

Експериментальні дослідження здійснювали із застосуванням спеціалізованого випробувального стенда, щоб відтворити режими роботи гальмового обладнання, наближені до експлуатаційних умов [17, 18].

Для забезпечення відтворюваності експериментальних досліджень і контролю параметрів роботи гальмового обладнання використано випробувальну установку,

функціональна схема якої наведена на рис. 4.

Установка забезпечує формування необхідних режимів роботи пневматичного гальма, включаючи заряджання гальмової магістралі, ступеневе гальмування, перекриття і попуск, а також дає змогу вимірювати тиск в основних контрольних точках системи (ГЦ, гальмова магістраль (ГМ), запасний резервуар (ЗР)).

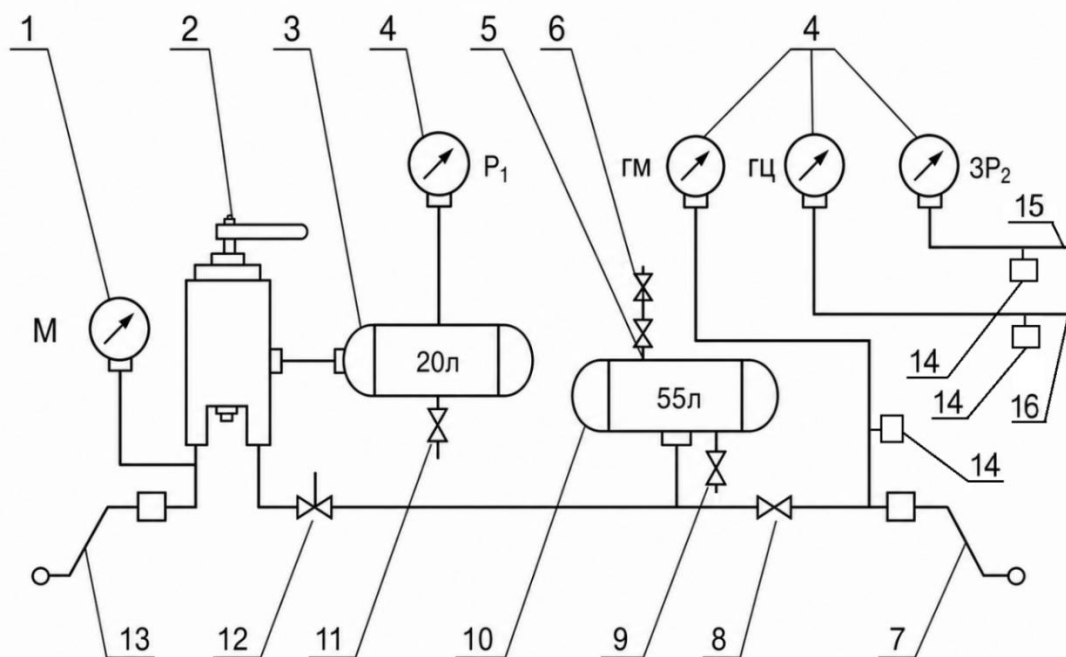


Рис. 4. Функціональна схема пересувного стенда для перевірки автогальма пасажирського вагона: 1 – манометр магістралі живлення; 2 – кран машиніста; 3 – зрівняльний резервуар крана машиніста об’ємом 20 л; 4 – манометри зрівняльного резервуара (P_1), ГМ, ГЦ, ЗР₂; 5, 8 – роз’єднувальний кран; 6 – дросельний отвір діаметром 2 мм; 7 – з’єднувальний рукав до ГМ вагона; 9, 11 – водоспускні крани; 10 – магістральний резервуар об’ємом 55 л; 12 – комбінований кран; 13 – з’єднувальний рукав живлення установки стисненим повітрям; 14 – датчики ДСГВ; 15 – манометр із датчиком, під’єднаний до ЗР; 16 – манометр із датчиком, під’єднаний до ГЦ

Кожен зразок встановлювали на стенд, після чого зчитували діагностичну інформацію з використанням вимірювально-реєструвальної апаратури. Реєстрували параметри в автоматизованому режимі, що забезпечувало високу точність і відтворюваність отриманих даних.

Результати експериментальних досліджень показують, що після виконання двох ступенів гальмування електропневматичного гальма тиск у гальмовому циліндрі досягає значення 0,53 МПа. Отримане значення перевищує допустимі експлуатаційні межі для такого типу

обладнання, що може свідчити про наявність відхилень у роботі системи керування або регулювання. Зростання тиску зумовлює підвищення сили натиснення гальмових колодок до коліс і створює передумови для інтенсивного зносу фрикційних елементів, а також підвищує ризик заклинювання колісних пар, що негативно впливає на безпеку руху рухомого складу.

Під час досліджень також реєстрували часові параметри роботи електропневматичного гальма в режимах гальмування, перекриття і попуску. Визначали тривалість відповідних режимів на основі аналізу рівнів і часових

характеристик електричних сигналів у колі керування. Отримані часові параметри характеризують швидкодію гальмового обладнання та дають змогу виявити можливі затримки або нестабільність спрацювання окремих елементів системи.

Для оцінювання ефективності запропонованого підходу та візуалізації результатів діагностування проаналізовано експериментальні дані, отримані у процесі дослідження гальмового обладнання (рис. 5). Результати обробки подані у вигляді діаграми розподілу діагностичних рішень, що дає змогу оцінити співвідношення правильних і помилкових висновків.

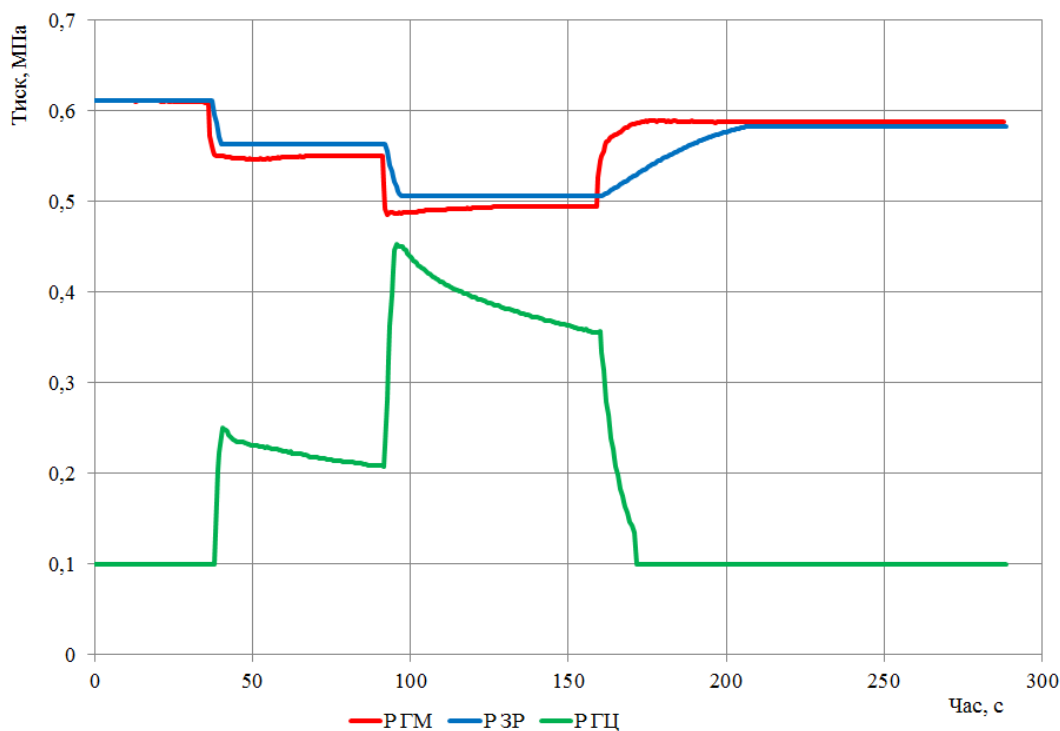


Рис. 5. Криві, які показують тиски в гальмових вузлах під час роботи пневматичних гальм

Встановлено, що використання запропонованої діагностичної системи допомагає зменшити кількість помилкових рішень і забезпечити більш рівномірний розподіл діагностичних результатів. Порівняння з базовим варіантом свідчить

про зростання частки правильних рішень, що безпосередньо впливає на підвищення достовірності діагностування.

Застосування ДСГВ в умовах експлуатації пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця» дає змогу підвищити

ефективність контролю технічного стану гальмового обладнання, однак потребує кількісного оцінювання стабільності та достовірності отриманих результатів діагностування. У зв'язку з цим виникає необхідність оцінювання достовірності функціонування засобів контролю.

Основним критерієм оцінювання ефективності функціонування ДСГВ є показник достовірності діагностування. Достовірність діагностування – це інтегральна характеристика якості функціонування ДСГВ, визначена ступенем відповідності встановленого технічного стану об'єкта його фактичному стану.

У більш широкому розумінні достовірність діагностування відображає надійність ухвалення рішень про подальшу експлуатацію елементів гальмового обладнання. Високий рівень достовірності дає змогу мінімізувати ризики як необґрунтованого виведення справних вузлів з експлуатації, так і допуску до роботи потенційно несправних елементів, що є критично важливим для гарантування безпеки руху пасажирських поїздів.

За прийнятою методикою [19], загальну кількість вузлів, що підлягали діагностуванню, умовно позначають як A . За результатами проведеного діагностування для кожного вузла сформована одна з двох рекомендацій:

- «Дозволити експлуатацію»;
- «Заборонити експлуатацію».

Кількість вузлів, допущених до подальшої експлуатації, позначають як B , тоді як кількість вузлів, для яких встановлено заборону експлуатації, – як C . Такий підхід дає змогу формалізувати процес ухвалення рішень і забезпечує можливість подальшого кількісного аналізу.

Після завершення діагностування можливі різні варіанти розвитку подій, які доцільно класифікувати залежно від ухваленого рішення та фактичного технічного стану вузла.

Вузли з рекомендацією «Заборонити експлуатацію», які фактично не допускають до роботи (позначають E):

- вузол розібраний і в процесі огляду підтверджено наявність несправності (E_1);
- вузол розібраний, але за результатами контролю виявився технічно справним (E_2), що свідчить про помилкову діагностику;

– вузол не розбирали, унаслідок чого його фактичний технічний стан залишився невизначеним (E_3).

Вузли з рекомендацією «Заборонити експлуатацію», але допущені до роботи без додаткового контролю (позначають D):

- вузол працює безвідмовно до наступного циклу діагностування (D_1);
- вузол виходить із ладу в процесі експлуатації (D_2), що може призвести до аварійних ситуацій або зниження безпеки руху.

Для кількісного оцінювання достовірності діагностування використано показник, що визначають як відношення кількості правильних діагностичних рішень до загальної кількості перевірок.

Оцінюють достовірність діагностування за аналітичною залежністю, яка враховує співвідношення правильних і помилкових рішень у загальній сукупності результатів:

$$H = \frac{E_1}{C} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Слід зазначити, що в базовому варіанті розрахунку не враховано результати для вузлів із рекомендацією «Дозволити експлуатацію» (B). При цьому значна частина таких вузлів (B_1) функціонує безвідмовно до наступного контролю, однак певна їхня частина (B_2) виходить із ладу, що свідчить про наявність помилок другого роду (пропущених відмов).

Сукупність можливих варіантів розвитку подій після діагностування зручно подати як структурну схему (рис. 6), що дає змогу систематизувати всі сценарії та оцінити їхній вплив на загальний показник достовірності.

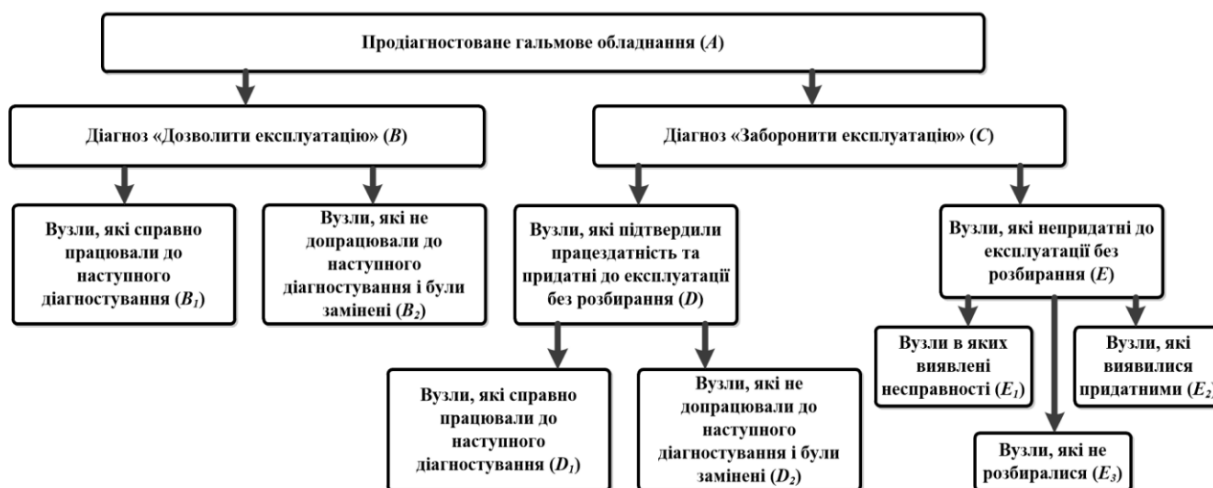


Рис. 6. Структурна схема подій після діагностування

Загальну достовірність діагностування визначають за формулою, яка враховує вагові коефіцієнти K_1 , K_2 , K_3 , що

характеризують рівень втрат або збитків у випадку ухвалення помилкових рішень. При цьому виконується умова нормування

$$H = \left(K_1 \frac{B_1}{B} + K_2 \frac{E_1}{E - E_3} + K_3 \frac{D_2}{D} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

де K_1 , K_2 , K_3 – коефіцієнти, що характеризують рівень втрат або збитків у випадку ухвалення помилкових рішень, причому $K_1 + K_2 + K_3 = 1$.

Значення зазначених коефіцієнтів K_1 , K_2 , K_3 залежать від типу рухомого складу та критичності відмов. Зокрема, для пасажирських вагонів наслідки відмов є більш значущими для безпеки перевезень, ніж для вантажного рухомого складу, що потрібно враховувати, вибираючи вагові коефіцієнти.

Оцінюючи достовірність діагностування, важливо враховувати не лише кількість правильних і помилкових рішень, а і характер їхнього впливу на безпеку експлуатації пасажирського рухомого складу. У практичних умовах найбільш критичними є помилки, пов'язані

з невиявленням несправностей гальмового обладнання, оскільки вони можуть призводити до погіршення гальмових характеристик вагона та підвищення ризику виникнення транспортних подій. З урахуванням цього в розрахункових залежностях використано вагові коефіцієнти K_1 і K_2 , які дають змогу врахувати різну значущість помилкових рішень під час оцінювання показника достовірності. Такий підхід забезпечує більш об'єктивне оцінювання ефективності діагностичного контролю та допомагає адаптувати результати розрахунків до реальних умов експлуатації пасажирських вагонів.

Із метою спрощення розрахунків у практичних умовах часто нехтують подіями D_2 , D , E_3 , оскільки їхня імовірність є

незначною. У такому випадку використовують спрощену формулу, яка забезпечує достатню точність оцінювання:

$$H = \left(K_1 \frac{B_1}{B} + K_2 \frac{E_1}{E} \right) \cdot 100\%. \quad (3)$$

За результатами випробувань, виконаних у лабораторії кафедри «Інженерія вагонів та якість продукції» УкрДУЗТ із застосуванням дослідного випробувального стенда і додатковим використанням розробленої ДСГВ, що забезпечило підвищення достовірності виявлення несправностей повітророзподільників, проведено експериментальні дослідження технічного стану гальмового обладнання.

У процесі досліджень було продіагностовано 316 гальмових вузлів (повітророзподільників № 292 та електроповітророзподільників № 305) пасажирських вагонів, що забезпечує достатній обсяг статистичної вибірки для подальшого аналізу.

Для підвищення точності та відтворюваності результатів вимірювань на кожному вузлі встановлювали датчики тиску в контрольних точках пневматичних циліндрів і гальмової магістралі, що дало змогу врахувати локальні відхилення параметрів і підвищити інформативність отриманих даних.

Розроблене діагностичне обладнання (ДСГВ) було апробовано та застосовано в умовах вагоноремонтних підприємств АТ «Укрзалізниця» для дослідження експлуатаційних характеристик гальмового обладнання пасажирських вагонів. Проведення досліджень у реальних виробничих умовах дало змогу отримати об'єктивні дані про технічний стан гальмових систем, а також оцінити ефективність використання діагностичних засобів.

Застосований підхід забезпечив можливість проведення комплексного

діагностичного контролю, у межах якого кожен комплект гальмового обладнання проходив повний цикл вимірювань із реєстрацією основних параметрів його функціонування. Отримані результати можуть бути використані для подальшого аналізу технічного стану гальмових систем, а також оцінювання їхніх надійності та працездатності в умовах експлуатації, що створює підґрунтя для кількісного обґрунтування достовірності проведених вимірювань. Зважаючи на це, доцільно розрахувати показник достовірності отриманих результатів із використанням відповідних статистичних підходів [19].

Для визначення показника достовірності розглянуто два варіанти:

1) за результатами перевірок у випробувальній лабораторії на стенді для діагностування гальмового обладнання пасажирських вагонів наведено відповідні значення параметрів, що характеризують результати діагностування:

$$A = 316, E = 64, E_2 = 60, E_1 = E - E_2 = 4, B_2 = 14, B = A - E = 252, B_1 = B - B_2 = 238;$$

2) використання стенда разом із розробленими заходами підвищення ефективності діагностування гальмових вузлів. Спостерігають зменшення кількості помилкових рішень і підвищення точності визначення технічного стану вузлів:

$$A = 316, E = 18, E_2 = 14, E_1 = E - E_2 = 4, B_2 = 5, B = A - E = 298, B_1 = B - B_2 = 293.$$

Тоді, за формулою (3):

- для варіанта 1)

$$H_1 = \left(K_1 \frac{238}{252} + K_2 \frac{4}{64} \right) \cdot 100\%; \quad (4)$$

- варіанта 2)

$$H_2 = \left(K_1 \frac{293}{298} + K_2 \frac{4}{18} \right) \cdot 100\%, \quad (5)$$

Якщо $K_1 = K_2 = 0,5$:

- для варіанта 1)

$$H_1 = \left(0,5 \cdot \frac{238}{252} + 0,5 \cdot \frac{4}{64} \right) \cdot 100\% = 50,3\%; \quad (6)$$

- варіанта 2)

$$H_2 = \left(0,5 \cdot \frac{293}{298} + 0,5 \cdot \frac{4}{18} \right) \cdot 100\% = 60,3\%. \quad (7)$$

Розрахунок за формулою (1):

- варіант 1)

$$H_1 = \frac{4}{64} \cdot 100\% = 6,3\%; \quad (8)$$

- варіант 2)

$$H_2 = \frac{4}{18} \cdot 100\% = 22,2\%. \quad (9)$$

Розрахунки, виконані за формулами (3), (6)-(9), показали, що врахування додаткових факторів суттєво впливає на значення показника достовірності. Зокрема, різниця між результатами розрахунків становить до 44 і 38,1%, що свідчить про важливість комплексного підходу щодо оцінювання.

Аналіз наслідків помилкових рішень показує, що помилка типу «Дозволити

експлуатацію» є більш критичною, ніж помилка «Заборонити експлуатацію». У зв'язку з цим доцільно приймати значення коефіцієнтів $K_1 = 0,3$ і $K_2 = 0,7$, що відображає більшу вагу ризику пропущеної несправності.

Підставивши у формули (2), (3) нові значення коефіцієнтів K_1 та K_2 , -отримаємо:

- для варіанта 1)

$$H_1 = \left(0,3 \cdot \frac{238}{252} + 0,7 \cdot \frac{4}{64} \right) \cdot 100\% = 32,7\%;$$

- варіанта 2)

$$H_2 = \left(0,3 \cdot \frac{293}{298} + 0,7 \cdot \frac{4}{18} \right) \cdot 100\% = 45,1\%.$$

Підстановка уточнених коефіцієнтів у розрахункові залежності дала змогу встановити, що застосування розроблених заходів забезпечує підвищення достовірності діагностування гальмових вузлів приблизно на 12,4 % порівняно з базовим варіантом.

Висновки. 1. Аналіз сучасних підходів щодо контролю технічного стану гальмового обладнання пасажирських вагонів показав, що існуючі системи переважно орієнтовані на фіксацію вже сформованих несправностей і мають обмежені можливості щодо виявлення початкових відхилень параметрів функціонування. Встановлено, що недостатня інформативність контрольованих параметрів, складність адаптації діагностичних систем до різних умов експлуатації та обмежена оперативність обробки даних негативно впливають на ефективність технічного обслуговування і своєчасність ухвалення експлуатаційних рішень.

2. У результаті проведених експериментальних досліджень гальмового обладнання пасажирських вагонів отримано дані про параметри функціонування 316 гальмових вузлів у різних режимах роботи. Під час досліджень зафіксовано перевищення тиску в гальмовому циліндрі до 0,53 МПа для двоступеневого гальмування, що свідчить про наявність відхилень у роботі окремих елементів гальмової системи та може призводити до

підвищеного зносу обладнання. Запропонована діагностична система забезпечує безперервний моніторинг параметрів пневматичних процесів, підвищує інформативність контролю і створює умови для своєчасного виявлення потенційних несправностей у процесі експлуатації.

3. Удосконалено підхід щодо оцінювання достовірності діагностування гальмового обладнання пасажирських вагонів, який базований на врахуванні структури діагностичних рішень і критичності помилок під час визначення технічного стану об'єкта. Використання вагових коефіцієнтів дало змогу підвищити об'єктивність оцінювання результатів діагностичного контролю і адаптувати його до умов реальної експлуатації рухомого складу. Отримані результати показали збільшення показника достовірності з 50,3 до 60,3 %, а з урахуванням вагових коефіцієнтів – із 32,7 до 45,1 %, що підтверджує доцільність застосування запропонованого підходу для підвищення надійності функціонування гальмового обладнання пасажирських вагонів.

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

Список використаних джерел

1. Dižo, J., Harušinec, J., & Blatnický, M. (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713400010>
2. Dižo, J., & Blatnický, M. (2019). Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology*, 19, 197–203. <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/MT/19/2/197>
3. Dižo, J., Steišunas, S., & Blatnický, M. (2017). Vibration analysis of a coach with the wheel-flat due to suspension parameters changes. *Procedia Engineering*, 192, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.019>

4. Сафронов, О. М. (2009). Дослідження дискової гальмівної системи пасажирського вагона. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології»*, 14, 51–67.
5. Сафронов, О. М. (2018). Застосування комп'ютерного моделювання для уточненої оцінки гальмівної ефективності вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»*, 32(2), 61–75.
6. Фомін, О. В., Туровець, Д. А. (2023). Використання протиюзних пристроїв з електропневматичним клапаном та систем контролю їх технічного стану на пасажирських вагонах внутрішнього сполучення. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, 1(38). <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-1.15>
7. Сафронов, О. М. (2025). *Розвиток методології досліджень характеристик та ефективності гальмівних систем пасажирських та вантажних вагонів* [Дис. д-ра техн. наук: 05.22.07], 348 с.
8. Etwell, M. W. J. (1990). Advances in rail wagon design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 204(1), 45–54. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1990_204_185_02
9. Wu, Q., Cole, C., Spiriyagin, M., et al. (2017). Railway air brake model and parallel computing scheme. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 12, 051017. <https://doi.org/10.1115/1.4036421>
10. Wu, Q., Cole, C., Spiriyagin, M., et al. (2023). Freight train air brake models. *International Journal of Rail Transportation*, 11, 1–49. <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.2006808>
11. Sang, J., Zhang, J., Guo, T., Zhou, D., Chen, M., & Tai, X. (2020). Detection of incipient faults in EMU braking system based on data domain description and variable control limit. *Neurocomputing*, 383, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.12.029>
12. Galimberti, A., Zanelli, F., & Tomasini, G. (2024). A hybrid model for freight train air brake condition monitoring. *Applied Sciences*, 14, 11770. <https://doi.org/10.3390/app142411770>
13. Hesse, H. (1991). Die Bremssteuerung beim ICE. *Der Eisenbahningenieur*, 12, 656–660.
14. Kawaguchi, K. (2005). Development of low cost long life antilock brake system for freight trains. *Railway Technology Avalanche*, 9, 5.
15. Eckert, J. J., Teodoro, Í. P., Lopes, M. V., Wu, Q., & Santos, A. A. (2024). Multi-objective optimization of electro-pneumatic braking process with fuzzy logic control for heavy haul railway applications. *Railway Sciences and Engineering*, 332–351. <https://doi.org/10.1080/23248378.2024.2338837>
16. Ravluyk, V., Derevianchuk, I., Afanasenko, I., & Ravluyk, N. (2016). Development of electronic diagnostic system for improving the diagnosis reliability of passenger car brakes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 9 (80), 35–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66007>
17. *Інструкція з ремонту гальмового обладнання вагонів: ЦВ–ЦЛ–0013*. (2004). Наказ Укрзалізниці від 25.01.2005 р. № 022-ЦЗ, 160 с.
18. *Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України: ЦТ–ЦВ–ЦЛ–0015*. (2004). Наказ Укрзалізниці від 28.10.1997 р. № 264-Ц, 146 с.
19. Равлюк, В. Г. (2014). *Удосконалення технології вібродіагностування буксових підшипників вантажних вагонів на проміжних ревізіях* [Дис. канд. техн. наук: 05.22.07], 206 с.

References

1. Dižo, J., Harušinec, J., & Blatnický, M. (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713400010>
2. Dižo, J., & Blatnický, M. (2019). Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology*, 19, 197–203. <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/MT/19/2/197>
3. Dižo, J., Steišunas, S., & Blatnický, M. (2017). Vibration analysis of a coach with the wheel-flat due to suspension parameters changes. *Procedia Engineering*, 192, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.019>
4. Safronov, O. M. (2009). Doslidzhennia dyskovoї halmivnoї systemy pasazhyrskoho vahona [Study of disc brake system of a passenger car]. *Collection of scientific papers of the State Economic and Technological University of Transport. Series "Transport Systems and Technologies"*, 14, 51–67. [in Ukrainian].
5. Safronov, O. M. (2018). Zastosuvannia kompiuternoho modeliuvannia dlia utochnenoi otsinky halmivnoї efektyvnosti vantazhnykh vahoniv [Application of computer modeling for refined evaluation of braking efficiency of freight wagons]. *Collection of scientific papers of the State Economic and Technological University of Transport. Series "Transport Systems and Technologies"*, 32(2), 61–75. [in Ukrainian].
6. Fomin, O. V., & Turovets, D. A. (2023). Vykorystannia protyuznykh prystroiv z elektropnevmatychnym klapanom ta system kontroliu yikh tekhnichnoho stanu na pasazhyrskykh vahonakh [Use of anti-skid devices with electro-pneumatic valve and monitoring systems]. *Podilskyi visnyk*, 1(38). [in Ukrainian].
7. Safronov, O. M. (2025). *Rozvytok metodolohii doslidzhen kharakterystyk ta efektyvnosti halmivnykh system vahoniv* [Development of methodology for studying braking systems]. [Doctoral dissertation], 348. [in Ukrainian].
8. Etwell, M. W. J. (1990). Advances in rail wagon design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 204(1), 45–54. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1990_204_185_02
9. Wu, Q., Cole, C., Spiryagin, M., et al. (2017). Railway air brake model and parallel computing scheme. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 12, 051017. <https://doi.org/10.1115/1.4036421>
10. Wu, Q., Cole, C., Spiryagin, M., et al. (2023). Freight train air brake models. *International Journal of Rail Transportation*, 11, 1–49. <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.2006808>
11. Sang, J., Zhang, J., Guo, T., Zhou, D., Chen, M., & Tai, X. (2020). Detection of incipient faults in EMU braking system based on data domain description and variable control limit. *Neurocomputing*, 383, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.12.029>
12. Galimberti, A., Zanelli, F., & Tomasini, G. (2024). A hybrid model for freight train air brake condition monitoring. *Applied Sciences*, 14, 11770. <https://doi.org/10.3390/app142411770>
13. Hesse, H. (1991). Die Bremssteuerung beim ICE. *Der Eisenbahningenieur*, 12, 656–660.
14. Kawaguchi, K. (2005). Development of low cost long life antilock brake system for freight trains. *Railway Technology Avalanche*, 9, 5.
15. Eckert, J. J., Teodoro, Í. P., Lopes, M. V., Wu, Q., & Santos, A. A. (2024). Multi-objective optimization of electro-pneumatic braking process with fuzzy logic control for heavy haul railway

applications. *Railway Sciences and Engineering*, 332–351. <https://doi.org/10.1080/23248378.2024.2338837>

16. Ravlyuk, V., Derevianchuk, I., Afanasenko, I., & Ravlyuk, N. (2016). Development of electronic diagnostic system for improving the diagnosis reliability of passenger car brakes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 9 (80), 35–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66007> [in English].

17. Instruksiia (2004). *Instruktsiia z remontu halmovoho obladdnannia vagoniv [Instruction for repair of brake equipment of wagons]*. Kyiv: Ukrzaliznytsia, 160. [in Ukrainian].

18. Instruksiia (2004). *Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu [Instruction for operation of railway brakes]*. Kyiv: Ukrzaliznytsia, 146. [in Ukrainian].

19. Ravliuk, V. H. (2014). *Udoskonalennia tekhnologii vibrodiahnostuvannia buksovykh pidshypnykiv [Improvement of vibration diagnostics technology]*. [PhD thesis]. Kharkiv, 206 p. [in Ukrainian].

Равлюк Василь Григорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482. E-mail: ravvg@kart.edu.ua.

Ловська Альона Олександрівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8604-1764. E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com.

Дерев'янчук Ярослав Володимирович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4932-2751. E-mail: derevyanchuk@kart.edu.ua.

Стасів Назар-Богдан Леонідович, студент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0007-3118-2352. E-mail: stasiv2025@kart.edu.ua.

Ravlyuk Vasyl, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482. E-mail: ravvg@kart.edu.ua.

Lovska Alyona, D.Sc. (Tech), professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8604-1764. E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com.

Derevianchuk Yaroslav, Postgraduate student, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4932-2751. E-mail: derevyanchuk@kart.edu.ua.

Stasiv Nazar-Bohdan, student of the Department of Railcar Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0007-3118-2352. E-mail: stasiv2025@kart.edu.ua.

Дата надходження статті 01.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY