

УДК 629.4.083:629.45

**ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ
ВАГОНІВ З УРАХУВАННЯМ НАДІЙНОСТІ ЙОГО КОМПОНЕНТІВ**

Кандидати техн. наук В. В. Бондаренко, Р. І. Візніак,
д-р техн. наук В. Г. Равлюк, канд. техн. наук Д. І. Скуріхін,
студ. С. В. Бондаренко

**DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC EQUIPMENT OF PASSENGER CARS BASED
ON COMPONENT RELIABILITY ASSESSMENT**

PhD (Tech.) V. V. Bondarenko, PhD (Tech.) R. I. Vizniak,
Dr. Sc. (Tech.) V.G. Ravlyuk, PhD (Tech.) D. I. Skurikhin,
student S. V. Bondarenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327143>



Анотація. Підвищення експлуатаційної готовності пасажирських вагонів і зменшення тривалості їхнього простою можна досягти за рахунок скорочення часу визначення працездатності електронного обладнання і пошуку місця відмови в його електронних компонентах. Ця проблема може бути вирішена шляхом проведення досліджень, розроблення та впровадження прогресивних методик оцінювання надійності, а також методів і засобів

технічного діагностування електронного обладнання пасажирських вагонів. У роботі розраховано проєктну надійність електронного обладнання пасажирських вагонів, що входить до складу пультів керування пасажирських вагонів. Запропоновано алгоритм діагностування, що враховує отримані розрахунком показники надійності електронних блоків вагона, час діагностування компонентів і визначає послідовність діагностування електронної апаратури за розрахованим критерієм пріоритетності.

Ключові слова: діагностування, надійність, електронне обладнання, пасажирський вагон, готовність вагонів, електричне обладнання, інтенсивність відмов, алгоритм діагностування, контроль технічного стану, пошук несправностей, критерій пріоритетності.

Abstract. As is known, one of the critical challenges in Ukraine's railway transport sector in recent years has been ensuring the reliability of passenger cars. Increasing train speeds, enhancing safety levels, and meeting higher passenger comfort requirements necessitate ensuring high operational reliability of passenger cars. Reducing passenger car downtime and improving their operational readiness can be achieved by minimizing the time required to assess the operability of electronic equipment and locate failures within its electronic components. This issue can be addressed by conducting research, developing, and implementing advanced methods for reliability assessment, as well as technical diagnostic methods and tools for passenger car equipment. The authors of this article have developed a methodology for assessing the design reliability of passenger car electronic equipment. Using this methodology, a study was conducted on the design reliability of automation devices integrated into passenger car control panels. The reliability of the electronic equipment was standardized, and reliability parameters were calculated considering operational coefficients. A modern passenger car is a complex engineering system, consisting of a combination of mechanical, electronic, and electrical systems. Up to 75 % of the total repair time for systems is spent on fault localization in complex radio-electronic systems, including preparation for fault detection. The most critical automation devices include the electronic blocks of the generator voltage regulator, frequency relay, battery charge control, and protection units. Therefore, when troubleshooting and monitoring operability, it becomes crucial to determine the most optimal sequence of operations, ensuring the shortest possible verification time for electrical equipment. The research results can significantly reduce the time required to locate faults in the electronic blocks of passenger cars, thus enhancing their reliability and operational readiness. Based on the calculated reliability parameters of the car's electronic blocks, a new diagnostic technology has been proposed. This technology considers the calculated reliability parameters, the time required for diagnosing components, and determines the optimal sequence for diagnosing electronic equipment according to a calculated priority criterion.

Key words: diagnostics, reliability, electronic equipment, passenger car, car readiness, electrical equipment, failure rate, diagnostics algorithm, technical condition control, troubleshooting, priority criterion.

Вступ. Як відомо, останнім часом на залізничному транспорті України однією з важливих є проблема надійності пасажирських вагонів. Через дію воєнного стану та складну економічну ситуацію у країні фінансування на придбання нових пасажирських вагонів для залізниць України значно зменшилося, також значна

кількість вагонів інвентарного парку відпрацювала свій ресурс. Ураховуючи незадовільний стан парку пасажирських вагонів, особливо вагонів відкритого типу, у роботі наведено результати досліджень, спрямованих саме на підвищення їхньої експлуатаційної надійності, готовності та зменшення часу на їх діагностування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними останніх досліджень, ступінь зносу пасажирських вагонів становить 88-93 %. Його старіння дуже швидке і не компенсовано надходженням нових вагонів. За статистичними даними, структура інвентарного парку пасажирських

вагонів філіалу «Пасажирська компанія» АТ «Укрзалізниця» дуже змінилася за останні роки. В основному закупаються вагони чотирьох типів: вагони пасажирські відкритого типу, спальні, купейні та міжобласні/денні (рис. 1).



Рис. 1. Структура загального парку пасажирських вагонів (а) і парку пасажирських вагонів за видами (б)

Найбільшу питому вагу у структурі парку пасажирських вагонів мають вагони відкритого типу (плацкартні вагони ЦМО – 32,96 %); купейні (ЦМК – 31,76 %) і спальні (СВ – 4,32 %). Вагони відкритого типу на сьогодні найбільше експлуатують із відпрацьованим нормативним строком служби [2, 10]. Ураховуючи незадовільний стан парку пасажирських вагонів, особливо відкритого типу, у роботі наведено результати досліджень, спрямованих саме на підвищення їхньої готовності та зменшення часу на їх діагностування. Найбільша кількість пасажирських вагонів обладнані комплексами електрообладнання типу ЭВ.10.02, ЭПВ.10 та ін., до складу яких входить складна електронна апаратура автоматичного керування, контролю і захисту та велика кількість споживачів.

З відновленням електрообладнання значну частину часу витрачають на пошук несправності та контроль працездатності. За останніми даними, на пошук несправності у складних радіоелектронних системах разом із підготовкою до пошуку витрачають

близько 75 % загального часу ремонту систем. Тому з пошуком несправності та контролем працездатності виникає завдання визначення найбільш раціональної послідовності операцій, що забезпечила б перевірку електрообладнання в найкоротший час. Використання результатів досліджень дасть змогу зменшити час на пошук несправностей в електронних блоках вагонів, а також підвищити надійність і готовність вагонів до експлуатації.

Проблемам забезпечення надійності рухомого складу залізниць і діагностування технічного стану вагонів присвячені такі роботи: [1] – аналіз взаємозв'язку між надійністю і безпечністю спеціалізованих комп'ютерних систем залізничної автоматики з ретельним аналізом як апаратних, так і програмних заходів підвищення безпечності компонентів і систем; проблемам підвищення надійності вагонів конструктивними методами, а також випробування апаратури керування та регулювання руху поїздів присвячені роботи [3-7, 14-21]. У той же час у цих

роботах завдання надійності електронної апаратури пасажирських вагонів не розглянуто. Аналіз методик, використовуваних останнім часом для розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами, наведений у роботі [8]. Основні загальні поняття надійності визначені державними стандартами України [11-13]. Однак у наукових працях і методиках, наведених вище, не розглянуто розрахунок проектної надійності електронних блоків вагонів та особливості їхньої роботи з урахуванням експлуатаційних факторів. Також не розглянуто оптимальні алгоритми діагностування, що враховують надійність електронної апаратури вагонів.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення оптимального алгоритму діагностування з мінімальним часом перевірки електронного обладнання пасажирських вагонів, що враховує

надійність його компонентів і пріоритетність діагностування обладнання.

Основна частина дослідження. З метою вирішення проблеми зменшення часу для діагностування електронної апаратури пасажирських вагонів проведено розрахунок проектної надійності електронних блоків вагона. Визначені з розрахунком показники надійності надалі використані для створення раціонального алгоритму діагностування.

Електрообладнання сучасного пасажирського вагона є різноманітним і складним за своєю будовою. Існує багато видів і модифікацій комплексів електрообладнання вітчизняного та закордонного виробництва. На рис. 2 зображено пульт керування та електронні блоки одного з відомих комплексів електрообладнання ЭВ.10.02, встановлені на багатьох пасажирських вагонах відкритого типу.



Рис. 2. Пульт керування (а) та електронні блоки (б) пасажирського вагона

Комплекси електрообладнання постійно оновлюють і вдосконалюють. На вітчизняних пасажирських вагонах прискореного руху використовують більш сучасні розподільні щити систем автоматизованого керування, контролю і діагностики (ШР САУКД), побудовані в НПП «Хартрон-Експрес». Також проходять модернізацію комплекси ЭВ.10.02 і замінюють на ЭВН 10.003 для використання

у складі некупейного пасажирського залізничного вагона, які проходять капітальні види ремонту. Усі сучасні системи електрообладнання, використовувани на залізницях України, структуровані та наведені в роботі [9].

Методика розрахунку проектної надійності електронних блоків вагона

Уся електронна апаратура вагона виконана за блоковим принципом і залежно

від функціонального призначення поділяється на такі основні блоки: блок захисту (БЗ), блок регулятора напруги генератора (БРНГ), блок реле частоти (БРЧ) і блок реле температури (БРТ). Інші електронні блоки мають другорядне значення в системі електрообладнання вагона, тому оцінювали надійність вищевказаних чотирьох блоків.

Визначаючи надійність електронних блоків, необхідно розрізняти проектну надійність, тобто розраховану теоретично за даними інтенсивності відмов елементів, та експлуатаційну надійність, визначену для умов експлуатації вагона з урахуванням реальних режимів навантаження. Дослідження експлуатаційної надійності електронної апаратури вагона пов'язані з великими труднощами, оскільки апаратура має порівняно невеликий відсоток відмов в експлуатації. У зв'язку з цим оцінювання надійності потребує проведення тривалих спостережень за сукупністю вагонів в експлуатації. Через це на першому етапі вважаємо за необхідне теоретично оцінити проектну надійність електронних блоків, а далі, за наявності статистики відмов блоків в експлуатації, порівняти проектну (розраховану теоретично) та експлуатаційну надійність.

Електрообладнання пасажирського вагона являє собою постійно діючу апаратуру, відновлювану за результатами перевірок. У технічних умовах на комплекс електрообладнання ЭВ.10.02 вимоги щодо надійності сформульовані так: середній наробіток до відмови – не менше 610000 км; коефіцієнт готовності – не менше 0,99; термін служби – не менше 20 років; встановлений безвідмовний наробіток протягом шести місяців із початку експлуатації – не менше 400000 км. Як основний показник, що характеризує безвідмовність електрообладнання вагона як заданий показник, – середній наробіток до відмови. Він нормований за елементами, що входять до складу вагона.

Оцінюючи показники надійності електронних блоків, доцільно виділити два основних етапи: нормування надійності та розрахунок надійності.

Нормування надійності дає змогу визначити кількісне значення середнього наробітку до відмови, що припадає на блоки сумарно із загального значення показника, заданого на все електрообладнання вагона, тобто провести нормування надійності. Вихідними даними для нормування і розрахунку проектною надійності електронних блоків були:

- структурні схеми надійності блоків БЗ, БРНГ, БРЧ і БРТ;
- переліки ЕРВ (електро-радіо виробів), що входять до складу блоків;
- переліки інтенсивності відмов використаних ЕРВ;
- режими й умови роботи блоків.

Інтенсивності відмов ЕРВ визначені з урахуванням коефіцієнтів впливу на інтенсивність відмов різних конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів, що впливають на електронні блоки вагона.

Відповідно до призначення й умов експлуатації електронні блоки належать до категорії 1.2 (наземна рухома апаратура). Інтенсивність відмов комплектовання ЕРВ для цієї категорії визначають за формулою

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \prod_{K=1}^n K_k, \quad (1)$$

де λ_0 – базова інтенсивність відмов ЕРВ за $t = + 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

K_k – коефіцієнти, що враховують вплив на інтенсивність відмов ЕРВ різних конструктивно-технологічних і експлуатаційних факторів.

В основу розрахунку показників надійності електронних блоків покладено імовірнісний метод кількісного оцінювання надійності. При цьому існує припущення, що час виникнення відмов підлягає експоненційному закону розподілу, для

якого справедлива умова $\lambda(t) = \text{const}$, тобто інтенсивність відмов постійна в часі. Для нерезервованої апаратури, до якої належать електронні блоки, середній наробіток до відмови T_c визначають за формулою

$$T_c = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_{ji} \cdot \lambda_{ji}}, \quad (2)$$

де n – кількість типів ЕРВ, що входять у j блок;

m – кількість блоків;
 N_{ji} – кількість ЕРВ i -го типу, що належать j -му блоку;
 λ_{ji} – інтенсивність відмов ЕРВ i -го типу, що належать j -му блоку.

Розраховують показник надійності T_c відповідно до структурних схем надійності (ССН) кожного з електронних блоків і їхніх компонентів. Так, ССН блока БРЧ зображена на рис. 3, інші схеми побудовані аналогічно.

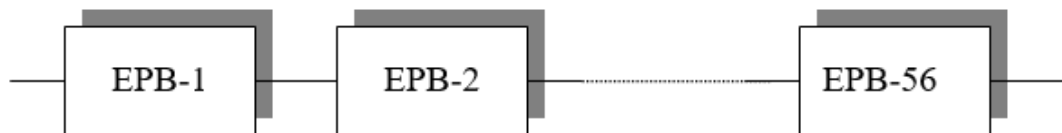


Рис. 3. Структурна схема надійності блока БРЧ

Діагностування електронних блоків вагона з урахуванням їхньої надійності

На підставі розрахунку інтенсивності відмов електронних блоків можна розробити алгоритм послідовності їх діагностування, який може бути корисним для технічного обслуговування та ремонту електрообладнання вагонів і зменшити час на відновлення вагонів в експлуатації.

Алгоритм 1. Для послідовної перевірки в порядку зменшення ймовірності відмови спочатку перевіряють елемент, імовірність відмови якого максимальна. Якщо він справний, то перевіряють наступний і так далі. У цьому випадку середня кількість і час перевірок значно скорочуються. Цей алгоритм часто інтуїтивно використовують техніки та механіки на практиці з пошуком відмов, але він потребує розрахункового оцінювання.

Ураховуючи розраховану надійність електронних блоків, діагностування та контроль має відбуватись у порядку збільшення їхньої надійності: БРЧ, БЗ, БРТ, БРНГ (від менш надійного блока до більш надійного).

Алгоритм 2. Можна вдосконалити вищезазначений алгоритм і зменшити час пошуку відмови, урахувавши не тільки ймовірність відмови, а й час на її пошук. Принцип дії алгоритму такий. Нехай маємо систему, яка складається з (N) елементів, один із яких має відмову, імовірності відмов (q_i) елементів і час перевірки (t_i) кожного елемента позначимо відповідно як $(q_1, t_1, q_2, t_2, \dots, q_N, t_N)$.

Якщо вибирають послідовність перевірок елементів послідовно, відповідно до їхньої нумерації, то математичне сподівання часу пошуку відмови буде

$$M_1 = q_1 t_1 + q_2 (t_1 + t_2) + q_3 (t_1 + t_2 + t_3) + \dots + q_N (t_1 + t_2 + \dots + t_N). \quad (3)$$

Якщо вибрано іншу послідовність перевірок, наприклад $(2, 1, 3, 4, \dots, N)$, то математичне сподівання часу пошуку відмови буде

$$M_2 = q_2 t_2 + q_1(t_1 + t_2) + q_3(t_1 + t_2 + t_3) + \dots + q_N(t_1 + t_2 + \dots + t_N). \quad (4)$$

Перша програма буде ефективнішою за другу, якщо $M_1 - M_2 < 0$, або

$$q_1 t_1 + q_2(t_1 + t_2) + \dots + q_N(t_1 + t_2 + \dots + t_N) < q_2 t_2 + q_1(t_1 + t_2) + \dots + q_N(t_1 + t_2 + \dots + t_N). \quad (5)$$

Отже, оптимальну послідовність перевірок має задовольняти нерівність

$$\frac{q_1}{t_1} > \frac{q_2}{t_2} > \frac{q_3}{t_3} > \dots > \frac{q_N}{t_N}. \quad (6)$$

Це означає, що елементи слід упорядкувати за зменшенням критерію пріоритетності K_i , який ураховує ймовірність відмови та час перевірки елемента:

$$K_i = \frac{q_i}{t_i}, \quad (7)$$

де q_i – ймовірність відмови i -го елемента;
 t_i – час перевірки i -го елемента.

Ураховуючи відому нам інтенсивність відмов електронних блоків, кількість необхідних перевірок і час на кожну перевірку, отримаємо критерій пріоритетності для i -го електронного блока вагона:

$$K_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{n_i} t_{ij}}, \quad (8)$$

де K_i – критерій пріоритетності для i -го електронного блока;

λ_i – інтенсивність відмови i -го блока;

n_i – кількість параметрів для перевірки в i -му блоці;

t_{ij} – час перевірки j -го параметра в i -му блоці.

Результати дослідження.

Розрахунками встановлено (на основі формул (1) і (2) і структурних схем надійності), що найменш надійним є блок БРЧ ($\lambda = 1,69071 \cdot 10^{-6}$ 1/год), далі в порядку збільшення надійності йдуть блоки БЗ ($\lambda = 1,39393 \cdot 10^{-6}$ 1/год), БРТ ($\lambda = 0,85222 \cdot 10^{-6}$ 1/год), БРНГ ($\lambda = 0,71097 \cdot 10^{-6}$ 1/год). Сумарна інтенсивність відмов усіх електронних блоків складає $4,6956 \cdot 10^{-6}$ 1/год. Розраховане значення середнього наробітку до відмови $T_c = 212965$ год і нормоване значення $T_c = 200000$ год практично рівні (із довірчою ймовірністю 0,9). Проведені розрахунки доводять коректність запропонованої методики розрахунку. Визначення надійності електронного обладнання вагонів дасть змогу оцінити його залишковий ресурс і впливати на надійність конструктивними або експлуатаційними методами, зокрема методами діагностики.

Оптимальна послідовність перевірки електронних блоків, отримана за результатом розрахунку критерію пріоритетності K_i у порядку його зменшення (за формулою (8)) така: БРЧ ($K_{БРЧ} = 3,97675 \times 10^{-8}$); БРНГ ($K_{БРНГ} = 1,4194 \times 10^{-8}$); БЗ ($K_{БЗ} = 1,02562 \times 10^{-8}$); БРТ ($K_{БРТ} = 8,522 \times 10^{-9}$) (рис. 4).

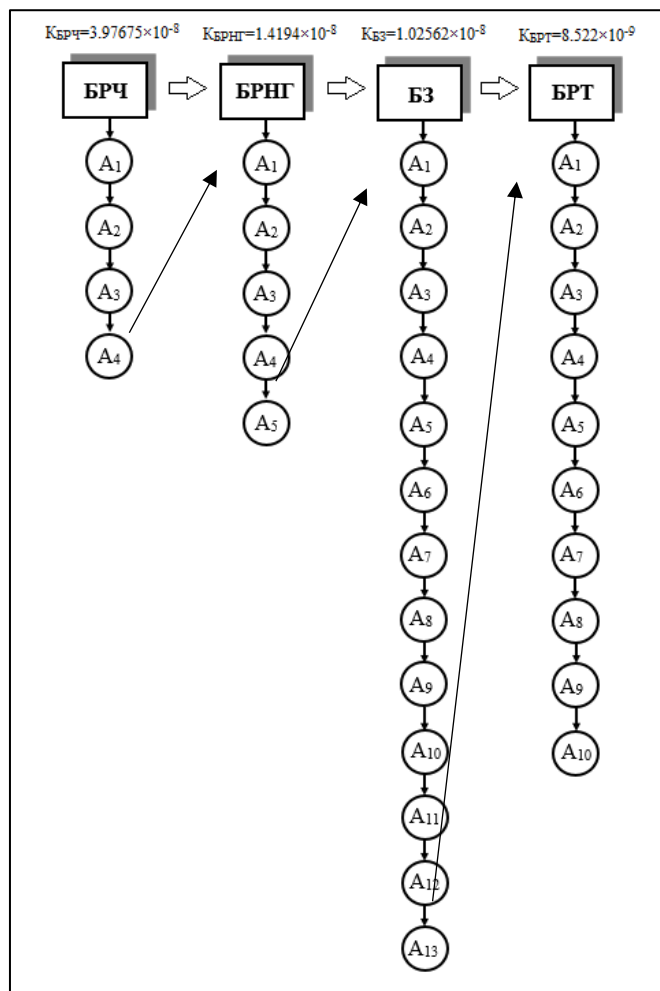


Рис. 4. Алгоритм діагностування електронних блоків вагона за критерієм пріоритетності

На рисунку БРЧ, БРНГ, БЗ, БРТ – електронні блоки, що підлягають діагностуванню; $A_1 \div A_{32}$ – перелік параметрів електронних блоків, що підлягають контролю за прийнятою методикою випробувань заводу-виробника. Електронний блок БРЧ із більшим значенням критерію пріоритетності слід перевіряти першим, оскільки це забезпечує мінімальне математичне сподівання часу перевірок, далі йдуть БРНГ, БЗ та БРТ. Отже, упорядковуючи блоки за спаданням критерію пріоритетності K_i , одержимо мінімальне математичне сподівання часу перевірок. Це дає змогу ефективно організувати діагностування, скоротивши середній час пошуку відмов, зменшити час відновлення комплексу електрообладнання

вагона та підвищити експлуатаційну готовність вагона в цілому.

Висновки. Розроблено методику розрахунку проєктної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів, у рамках якої проведено нормування надійності електронних блоків і розраховано параметри надійності з урахуванням експлуатаційних коефіцієнтів. На базі цієї методики запропоновано алгоритм діагностування електрообладнання вагона, який ураховує отримані розрахунком показники надійності електронних блоків вагона, час на діагностування компонентів і визначає послідовність діагностування електронної апаратури за розрахованим критерієм пріоритетності кожного блока.

Список використаних джерел

1. Мойсеєнко В. І., Бутенко В. М. Безпечність спеціалізованих комп'ютерних систем: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 112 с.
2. Лупітько Н. В., Сладких І. В. Дослідження сучасного стану інвентарного парку пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця». *Рейковий рухомий склад: зб. наук. праць*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ». 2020. Вип. 21. С. 28-43.
3. Проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів / В. І. Мойсеєнко, В. М. Бутенко, О. В. Головка, С. Г. Чуб. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 3. С. 31–38. ISSN: 2413-3833.
4. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V. The service life prediction for brake pads of freight wagons. *Communications. Scientific Letters of the University of Zilina*. 2024. Vol. 26 (2). P. B80 – B89. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.017>.
5. Development of a Procedure for Determining the Pre-Failure Condition of the Axle Boxes of Railway Rolling Stock / Martynov I., Gerlici J., Trufanova A., Petuhov V., Shovkun V., Kravchenko K. *Komunikácie - vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline*. 2022. 24(1). P. B87-B93. DOI: 10.26552/com.C.2022.1.B87-B93.
6. Пасажирські вагони. Діагностування. Залишковий ресурс. Надійність: монографія / Ю. Я. Водянніков, А. О. Сулим, П. О. Хозя та ін. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2023. 69 с.
7. Panchenko S., Vatulia G., Lovska A., Ravlyuk V., Elyazov I., Huseynov I. Influence of structural solutions of an improved brake cylinder of a freight car of railway transport on its load in operation. *EUREKA Phys. Eng.* 2022. 6. 45–55. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002638>.
8. Бутенко В. М., Головка О. В., Чуб С. Г. Аналіз методик розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2023. Вип. 204. С. 115-124.
9. Bondarenko V., Skurikhin D., Wojciechowski J. The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development. *Smart and Green Solutions for Transport Systems: 16th Scientific and Technical Conference «Transport Systems. Theory and Practice 2019» Selected Papers.-Katowice: Springer International Publishing*. 2020. P. 114-125. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35543-2_10.
10. Прес-служба «Укрзалізниця». 62 % пасажирських вагонів України не обладнані кондиціонерами. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center (дата звернення 01.11.2024).
11. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994.
12. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Київ: Держстандарт України, 1994.
13. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Київ: Держстандарт України, 1994.
14. Bondarenko V. V., Skurikhin D. I., Vizniak R. I., Ravlyuk V. H., Skurikhin V. I. Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 4. P. 30–36. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/7>.
15. Ravlyuk V., Ravliuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. TRANSBUD-2019. С. 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026>.
16. Ravlyuk V., Ravliuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Process features and parametric assessment of the emergence of the excessive wear for the brake pads of freight car bogies. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. TRANSBUD-2019. С. 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012025>.

17. Martynov I., Bondarenko V., Skurikhin D. Mathematical modeling of oscillations wheelset as the basis of the method of acoustic control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. № 7. P. 22-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.20088.

Бондаренко В'ячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Тел.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Візняк Руслан Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.

Равлюк Василь Григорович, д-р техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482. E-mail: ravvg@kart.edu.ua

Скуріхін Дмитро Ігорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3746-5157. E-mail: skurikhin@kart.edu.ua.

Бондаренко Сергій В'ячеславович, студент, Технологічно-гуманітарний університет ім. К. Пулавського (Радом, Польща). ORCID iD: 0009-0004-6938-4046. E-mail: serbon2007@gmail.com.

Bondarenko Viacheslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Tel.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Viznyak Ruslan, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.

Ravlyuk Vasyl, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, 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.

Skurikhin Dmytro, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3746-5157. E-mail: skurikhin@kart.edu.ua.

Bondarenko Serhii, student, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Poland. ORCID iD: 0009-0004-6938-4046. E-mail: serbon2007@gmail.com.

Статтю прийнято 10.02.2025 р.