

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.4.06:621.822.614

ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРОДІАГНОСТИКИ БУКСОВИХ ВУЗЛІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ ВІДМОВ

Асп. І. В. Піценко

APPLICATION OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF AXLE BOXES OF FREIGHT CARS TO REDUCE THE RISK OF FAILURES

Postgraduate I. V. Pitsenko



DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296815>

Анотація. Дослідження обґрунтовує застосування методу вібраційної діагностики вантажних вагонів для зменшення ризику відмов буксових вузлів. У статті зазначено, що використання вібраційної діагностики буксових вузлів вантажних вагонів призводить до зниження ризиків на залізничному транспорті у 2,5 рази. Розроблений метод визначення ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів має практичне значення для забезпечення оцінювання безпеки залізничного транспорту.

Експериментальні дослідження підтверджують зменшення ризику відмов буксових вузлів вантажних вагонів від 1,125 до 5,000 разів. Отриманий ефект використання вібраційної діагностики буксових вузлів вантажних вагонів також супроводжується економічними вигодами, оцінюваними від 13 до 44 тис. грн для відповідного експлуатаційного пробігу вантажного вагона.

Це дослідження розширює розуміння можливостей вібраційної діагностики як ефективного інструменту для забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті. Ураховуючи практичність методу та підтвердження його успішності через експериментальні дані, автор наводить засоби для підвищення безпеки та ефективності вантажних перевезень на залізниці.

Ключові слова: вібродіагностика, буксові вузли, вантажні вагони, зниження ризиків, відмови.

Abstract. The research presented in this study advocates for the adoption of vibration diagnostics as a method to mitigate the risk of axle box failures in freight cars, emphasizing its significant impact on enhancing the safety of railway transportation. The authors assert that employing vibration diagnostics for axle boxes in freight cars results in a noteworthy 2.5-fold reduction in risks within the realm of railway transport.

The practical implications of the developed diagnostic method extend to its capacity for assessing the safety of railway transport, offering a valuable tool for risk evaluation. Experimental studies conducted as part of this research further validate the effectiveness of the method, revealing a substantial decrease in the risk of axle box failures by a factor ranging from 1.125 to an impressive times. This empirical evidence solidifies the credibility and applicability of vibration diagnostics in averting potential failures in axle boxes.

From an economic standpoint, the implementation of vibration diagnostics for axle box units demonstrates a tangible impact, with cost savings ranging from 13 to 44 thousand UAH

corresponding to the operational mileage of a freight car. This underscores not only the safety benefits but also the economic advantages associated with the utilization of vibration diagnostics in the maintenance and operation of railway transport.

The findings of this research contribute to a more comprehensive understanding of the capabilities of vibration diagnostics as a powerful and effective tool in ensuring the safety of railway transportation. By highlighting the practical applicability of the method and supporting its success through empirical data, the authors advocate for its widespread adoption as a means to bolster the safety and efficiency of freight transportation by rail. In essence, this study provides a robust foundation for the integration of vibration diagnostics into routine maintenance practices, offering a proactive approach to minimizing risks and optimizing the performance of axle box units in freight cars.

Keywords: *vibration diagnostics, axle boxes, freight cars, risk reduction, failures.*

Вступ. На залізничний транспорт на внутрішньому ринку припадає велика частина транспортних послуг, пов'язаних з організацією та забезпеченням процесу перевезення вантажів і пасажирів. Одним із головних завдань залізничного транспорту, а також важливою складовою його ефективної роботи і розвитку є забезпечення безпеки руху, на яку безпосередньо впливає надійність елементів рухомого складу і технічних засобів усієї інфраструктури.

Успішне вирішення завдання забезпечення необхідного рівня безпеки руху на залізниці полягає в підтримуванні належного технічного стану і надійності вагонного парку, оскільки українські залізниці, найбільше за обсягом, виконують перевезення вантажів. Безпека руху при цьому може бути оцінена ризиками можливих відмов вантажних вагонів після виконання технічного обслуговування та ремонту. Тому забезпечення низьких значень ризиків у процесі експлуатації залізничного транспорту під час технічного обслуговування та ремонту може бути досягнуто належним процесом діагностування вантажних вагонів, оскільки вони складають найбільшу частину з усього рухомого складу при вантажних перевезеннях.

З відомої статистичної інформації про відмови елементів вантажних вагонів випливає, що найбільша частка кількості відмов припадає на буксові вузли.

Ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів вказують на можливість виникнення проблем (відмов) і надзвичайних ситуацій у роботі цих вузлів. Ці ризики можуть бути викликані інтенсивною експлуатацією, неякісним ремонтом, зносом матеріалів, впливом зовнішніх факторів тощо. Вони можуть призвести до непланових зупинок, аварій, а також збитків і небезпеки руху на залізничному транспорті. Такі ризики підкреслюють важливість систем діагностики, обслуговування та ефективного управління для попередження відмов, убезпечення та надійності вантажних вагонів.

Під час аналізу відмов буксових вузлів вантажних вагонів було встановлено, що майже всі відмови пов'язані з неякісно проведеним ремонтом чи технічним обслуговуванням, на які істотно впливає недодержання технології виконання, у т. ч. і людський фактор. Для зниження ризиків, що допускаються при ремонті і технічному обслуговуванні вантажних вагонів, можуть бути застосовані методи діагностування буксових вузлів з подальшим розрахуванням ризиків для оцінювання та прогнозування безпеки руху на залізничному транспорті.

Оскільки АТ «Українська залізниця» має на меті реформування та імплементацію вимог законодавства ЄС, то застосування процесу діагностування буксових вузлів вантажних вагонів для

зниження ризиків на залізничному транспорті є актуальною темою дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У кожній країні світу характерним є застосування окремого підходу до оцінювання безпеки руху поїздів на мережі залізниць. Проте в кожній країні світу існує єдина думка щодо оцінювання безпеки руху як на залізницях, так і інших видах транспорту. Отже, оцінювання безпеки руху описується ризиками – технічними, технологічними, організаційними, управлінськими тощо.

У роботі [1] наведено ідентифікацію ризиків, які виникають у транспортній системі, і на основі аналізу виявлених ризиків пропонується заходи щодо оптимального функціонування транспортної системи. Водночас не враховано неможливість заміни засобу ланцюжка транспортної системи.

Метод кількісного оцінювання ризиків у Нідерландах [2] для визначення безпеки руху при перевезенні орієнтований виключно на жертви зі смертельними наслідками.

Оскільки моніторинг залізничної інфраструктури є життєво важливим завданням для забезпечення безпеки руху залізничних перевезень, у роботі [3] для оцінювання ризику відмов рейок використовують імовірність їхніх відмов на основі відеоспостережень. Оцінювання ризику відмов наведено для завантаженої залізничної колії голландської залізничної мережі. Отримані результати ілюструють практичність і ефективність запропонованого підходу, але не враховують вплив інших засобів транспорту і елементів інфраструктури залізниць.

У китайській стратегії розвитку [4] застосовуються 24 потенційні критичні ризики в залізничній сфері, поділені на шість груп. Одним із методів визначення безпеки є анкетування, спрямоване на збір даних про ймовірності виникнення ризику і його вплив; цей же метод використаний у

роботі [5]. Інший метод для оцінювання критичних ризиків у залізничній сфері, наведений у роботі [4], заснований на нечіткому аналізі чутливості як критерію їхньої ідентифікації.

Управління ризиками на залізницях Австрії з методологічною управлінською основою наведено в роботі [6], де показано, що зниження ризиків при прийнятті рішень можливо на трьох рівнях, причому кожному рівню характерні багатогалузеві партнерства. Недоліком такої системи оцінювання є її громіздкість.

У рамках процесів прийняття рішень і прогнозування періодичних вимог до технічного обслуговування засобів транспорту при експлуатації залізниць Великобританії [7] прийнято, що вплив на безпеку руху можливий за допомогою концепції управління ризиками та активами. Практичного застосування розробок у роботі не наведено.

Для зниження ризиків у роботі [8] запропонована методика аналізу дерева часових помилок, за допомогою якого можуть бути визначені несправності засобів транспорту і час, необхідний на усунення несправностей і виконання технічного обслуговування для запобігання аварій. У цій роботі не враховано вплив людського фактора тощо.

Структура управління ризиками запропонована в роботі [9], яка служить для усунення причин аварій, що включає ідентифікацію небезпеки, аналіз ризику, оцінювання, обробку та контроль. Недоліком такої системи є довга тривалість прийняття рішень.

У роботі [10] розглянуто системи електропостачання залізниць як критичні для безпеки транспортної системи та обґрунтовано таку пропозицію при використанні аналізу ризиків на підставі стандарту ІЕС 61508. Моделювання системи безпеки засноване на ланцюгах Маркова. Недоліком такої позиції є неврахування інших систем інфраструктури залізниць.

Виконаний аналіз ризиків у роботі [11] призвів до рішення використання стохастичних, а не детермінованих способів для оцінювання безпеки руху, ґрунтуючись, тим не менш, на економічних показниках втрат. У роботі показані можливості переходу до залізничної системи методів аналізу ризиків, які використовуються на сьогодні для інших транспортних і технологічних систем, але не наведена реалізація такого переходу.

У роботі [12] подано методи оцінювання ризиків і можливості їхнього зниження при проектуванні, експлуатації та технічному обслуговуванні засобів транспорту залізниць. Особливу увагу приділено конструкції вантажних вагонів і її впливу на безпеку руху. Недоліком цієї роботи є неврахування інших систем і засобів інфраструктури залізниць.

У роботах [13, 14] запропоновано методи оцінювання ризиків за статистичною інформацією і використанням теорії ймовірності. Теоретично доведено зменшення ризиків на залізничному транспорті і запропоновано заходи до подальшого використання. Проте не надано опису як ці методики застосувати на практиці залізничного транспорту.

Безпека руху поїздів у роботі [15] характеризується кількісним оцінюванням людських помилок з вибором байєсової мережі для вивчення наслідків виявлених помилок. Байєсова мережа використовується для моделювання небезпечних подій, ризиків і кількісного аналізу безпеки руху поїздів. Однак технічний стан інфраструктури залізниці та його вплив на безпеку руху не враховується.

На українських залізницях [16-19] для оцінювання стану безпеки руху поїздів застосовують абсолютні та питомі показники. Як абсолютні показники використовують статистичні дані: кількість транспортних подій і постраждалих осіб, які загинули або були травмовані, а як питомі – похідні від статистичних даних.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження впливу вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів на зниження ризиків відмов. Для цього необхідно виконати такі завдання:

- обґрунтувати застосування вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів для зниження ризиків відмов;
- виконати експериментальні дослідження зниження ризиків відмов при застосуванні вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів;
- розрахувати економічний ефект при застосуванні вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів під час проведення технічного обслуговування і ремонту.

Основна частина дослідження. Ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів є значущими в контексті безпеки та ефективності залізничного транспорту. Ризики – це можливі негативні події чи ситуації, які можуть виникнути і призвести до небажаних наслідків або втрат. У контексті вантажних вагонів ризики відмов буксових вузлів вказують на ймовірність технічних проблем або несправностей у їхній роботі, що може призвести до збитків, аварій або інших негативних наслідків для ефективності та безпеки залізничного транспорту.

До основних факторів, які спричиняють відмови буксових вузлів, можуть бути включені:

- несправності внаслідок експлуатації: інтенсивна експлуатація, неправильне завантаження вагонів, агресивне середовище шляху тощо;
- неякісний ремонт і технічне обслуговування без дотримання вимог щодо якості;
- знос і старіння матеріалів;
- низькоефективна діагностика: відсутність або недостатня ефективність систем діагностики перед ремонтом і обслуговуванням може призвести до невиявлення потенційних проблем;

- вплив зовнішніх факторів: атмосферні умови, температурні зміни, агресивні середовища;

- пошкодження внаслідок аварій: транспортні події, аварії та непередбачені обставини;

- людський фактор: неналежна підготовка та дії персоналу під час технічного обслуговування та ремонту.

Слід зазначити, що найбільше відмов припадає саме на людський фактор. Тому позначимо виконання завдання працівником з технічного обслуговування і ремонту буксових вузлів вантажних вагонів як x , а всіх інших елементів як y . Відомо, що працівник може виконати завдання правильно або ж неправильно. Тобто виконувані ними завдання неправильно – це будуть помилки, що з’являються в певній технологічній ситуації.

Запишемо формулу ймовірності успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування і ремонту буксових вузлів вантажних вагонів:

$$P_s = P_x(1 - P_h)P_y, \quad (1)$$

де P_x – ймовірність успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування і ремонту буксових вузлів вантажних вагонів;

P_h – ймовірність допущеної помилки в результаті дії людського фактора;

P_y – ймовірність успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів.

Формулу ймовірності невиконання поставленого завдання з технічного обслуговування і ремонту буксових вузлів вантажних вагонів, яка буде відповідати ризикам відмов, запишемо в такому вигляді:

$$R = P_F = 1 - P_x(1 - P_h)P_y. \quad (2)$$

З формул (1), (2) можна зробити висновок про єдиний спосіб виконання комплексного завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів, що полягає в успішному виконанні завдань x , y і зниженні дії людського фактора.

Ймовірність успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів була позначена через P_y , але доповнимо її залежністю від часу $P(t)$. Останній показник має такі властивості:

- $P(t) = 1$ – успішне виконання комплексного завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів;

- $P(t)$ – незростаюча функція часу;

- $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = 0$ – невиконання ком-

плексного завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів.

На підставі наведеного вище для опису ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів будемо вважати, що розподіл успішного виконання комплексного завдання є нормальним. Для зменшення кількості відмов буксових вузлів вантажних вагонів з причин проведення неякісного ремонту і технічного обслуговування можуть бути застосовані методи і засоби діагностики. Тому в роботі для діагностики буксових вузлів вантажних вагонів пропонується використовувати їхні вібраційні характеристики. Причому для виключення дії людського фактора пропонується повністю виключити вплив оператора на висновки діагностичного процесу. У зв’язку з цим ризик відмов буксових вузлів вантажних вагонів (вираз (2)) з урахуванням застосування вібраційної діагностики ($P_h = 0$) буде розраховуватися за формулою

$$R = 1 - P_x P_y. \quad (3)$$

З огляду на наведені залежності ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів [20] можна стверджувати, що застосування вібродіагностики під час технічного обслуговування і ремонту дає змогу знизити величину ризиків у 2...4,5 рази при успішному виконанні поставленого завдання.

У роботі [21] доведено, що оскільки найменшим ризик, який може виникнути в процесі експлуатації вантажних вагонів після виконання відповідних технічного обслуговування і ремонту буксового вузла, є при використанні методу вібродіагностики, то цей метод діагностування запропоновано до впровадження у ВЧДР та ВЧДЕ на Придніпровській залізниці. Стенд діагностування за віброакустичними параметрами впроваджено у ВЧДР Батуринське. Далі були виконані експериментальні дослідження, під час яких встановлено таке:

- кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів, що призвели до транспортних подій на час дослідження (початок 2017 – кінець 2019 року) становила 12 подій з вини ВЧДР Батуринська; загальна кількість відмов склала 32 події;

- ризик, що припадає на відмови буксових вузлів вантажних вагонів, що призвели до транспортних подій, становить

$$R = \frac{12}{32} = 0,375.$$

При використанні методу вібродіагностики у ВЧДР Батуринська Придніпровської залізниці при проведенні технічного обслуговування та ремонту кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів знизилась і становила чотири випадки (кінець 2020 року), а загальна кількість відмов становила 27 випадків.

Загальний ризик, що припадає на відмови буксових вузлів вантажних вагонів, які можуть призвести до транспортних подій, становить

$$R = \frac{4}{27} = 0,148.$$

Порівняння було зроблено виходячи з приблизно однакової кількості відремонтованих вагонів у ВЧДР Батуринська Придніпровської залізниці у 2019 і 2020 рр. Крім того, вантажообіг Придніпровською залізницею у 2020 році був вищий на 17 % порівняно з 2019 роком. Тому наведена вище вартість ризиків є адекватною.

Також були отримані дані у ВЧДР Батуринська Придніпровської залізниці за 2019 і 2020 роки про відмови буксових вузлів вантажних вагонів при звичайній технології технічного обслуговування та ремонту і з застосуванням вібродіагностики. Кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів, що припадає на 10 вагонів у ВЧДР Батуринська Придніпровської залізниці за 2019-2020 роки, наведено в таблиці.

Таблиця

Кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів, що припадає на 10 вагонів у ВЧДР Батуринська Придніпровської залізниці за 2019-2020 роки

Назва	Імовірність успішного виконання поставленого завдання P_x					
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Звичайна технологія технічного обслуговування та ремонту	10	9	8	6,5	6	5
Технологія технічного обслуговування та ремонту з застосуванням вібродіагностики	10	8	6	4,5	3	1

За результатами виконаних розрахунків за формулою (3) на рис. 1 подано практичні результати розподілу ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів при звичайній технології

технічного обслуговування та ремонту і з застосуванням вібродіагностики у ВЧДР Батуринська Придніпровської залізниці впродовж 2019-2020 років.

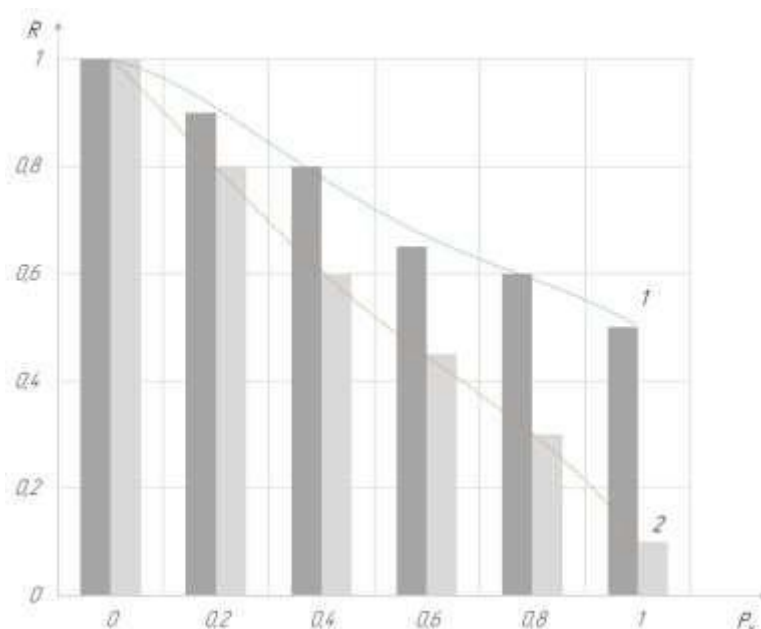


Рис. 1. Розподіл ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів при звичайній технології технічного обслуговування та ремонту (1) і з застосуванням вібродіагностики (2) у ВЧДР Батуринська Придніпровської залізниці впродовж 2019-2020 років

З рис. 1 можемо бачити, що ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів при звичайній технології технічного обслуговування та ремонту порівняно з застосуванням вібродіагностики в 1,125...5,000 разів вищі. Це вказує на доцільність застосування при технічному обслуговуванні та ремонті буксових вузлів вантажних вагонів вібродіагностики, оскільки вона зменшує вплив людського фактора на технологічні процеси.

Крім того, наведені розподіли відмов букс вантажних вагонів при експлуатації за звичайною технологією технічного обслуговування і ремонту (1) і з застосуванням вібродіагностики (2) порівняно з теоретичними значеннями [21] мають відхилення в значеннях, які

становлять не більше 8 %. Це свідчить про прийнятний збіг теоретичних і експериментальних розрахунків ризиків, які трапилися внаслідок відмов буксових вузлів вантажних вагонів після технічного обслуговування та ремонту.

При використанні методу діагностування за віброакустичними діагностичними параметрами на Придніпровській залізниці при проведенні технічного обслуговування та ремонту буксових вузлів вантажних вагонів у процесі їхньої експлуатації можна визначити період безпечної експлуатації та прогнозувати відповідні економічні показники, що характеризують експлуатаційні та ремонтні витрати. Тобто на основі показника ризику відмов

буксових вузлів вантажних вагонів можна управляти безпекою руху, знижувати можливість виникнення небезпечних ситуацій на залізничному транспорті та контролювати якість усього перевізного

процесу. Скорочення витрат при зниженні кількості транспортних подій на залізничному транспорті через відмови буксових вузлів вантажних вагонів для деяких варіантів наведено на рис. 2.

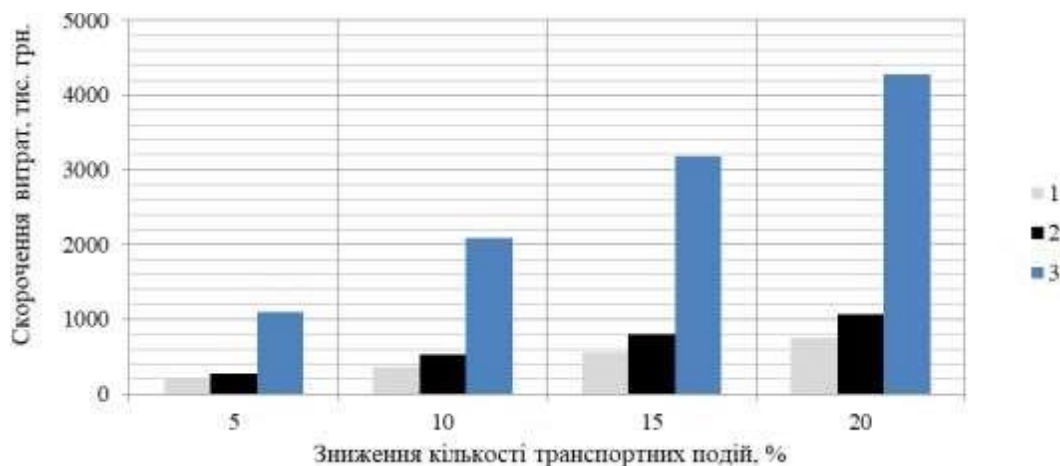


Рис. 2. Скорочення витрат при зниженні кількості транспортних подій на залізничному транспорті:

1 – на експлуатацію вагонів; 2 – ремонт вагонів; 3 – інфраструктуру залізниці

При прогнозуванні ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів за технічним станом після проведення технічного обслуговування чи ремонту для запобігання транспортним подіям можна також спрогнозувати економічний ефект від застосування вібродіагностики

буксових вузлів вантажних вагонів. Результати прогнозування економічного ефекту від застосування вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів у ВЧДР Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці при їхньому відповідному пробігу наведено на рис. 3.

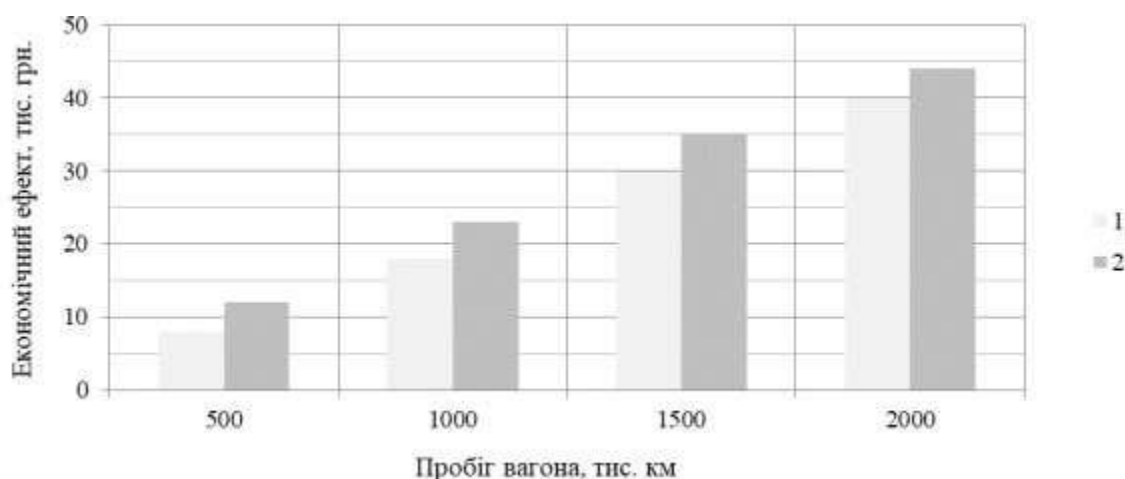


Рис. 3. Економічний ефект при відповідному пробігу вантажного вагона за запровадження вібродіагностики буксових вузлів під час проведення:

1 – технічного обслуговування; 2 – ремонту

Наведені результати вказують, що економічний ефект за запровадження вібродіагностики буксових вузлів під час проведення технічного обслуговування складає від 13 до 40 тис. грн, при ремонті – від 13 до 44 тис. грн для відповідного експлуатаційного пробігу вантажного вагона.

Висновки. У роботі обґрунтовано застосування вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів для зниження ризиків відмов. У результаті виконаних експериментальних досліджень встановлено, що ризики на залізничному транспорті за застосування вібродіагностики буксового вузла вантажних вагонів знижуються в 2,5 раза.

За використання методу вібродіагностики у ВЧДР Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці під час проведення технічного обслуговування та ремонту кількість відмов буксових вузлів

вантажних вагонів знизилась і становила чотири випадки.

Практична цінність розробленого методу визначення ризиків, що виникають при відмовах буксових вузлів вантажних вагонів, полягає в можливості оцінювання безпеки залізничного транспорту. Крім того, для зниження ризиків, пов'язаних з відмовами буксових вузлів вантажних вагонів, було запропоновано використання вібродіагностики при технічному обслуговуванні та ремонті. У результаті отримано зниження ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів у ВЧДР Батурицька Придніпровської залізниці в 1,125...5,000 разів.

Установлено, що економічний ефект при застосуванні вібродіагностики буксових вузлів під час проведення технічного обслуговування складає від 13 до 40 тис. грн, при ремонті – від 13 до 44 тис. грн для відповідного експлуатаційного пробігу вантажного вагона.

Список використаних джерел

1. Stažnik D. B., Bajor I. Identification and analysis of risks in transport chains. *Journal of Applied Engineering Science*. 414, 15(1), 2017. P. 61-70. doi:10.5937/jaes15-12179.
2. Ruud M. H. Rail Transport of Hazardous Substances from the Perspective of «All Hazard» Risk Management. *Chemical engineering transactions*. 48, 2016. P. 949-954. doi: 10.3303/CET1648159.
3. Jamshidi A. et al. A Big Data Analysis Approach for Rail Failure Risk Assessment. *Risk Analysis*. 37(8), 2017. P. 1495-1507. doi:10.1111/risa.12836.
4. Jelena M., Andrić J. W., Ruoyu Z. Identifying the Critical Risks in Railway Projects Based on Fuzzy and Sensitivity Analysis: A Case Study of Belt and Road Projects. *Sustainability, MDPI*. 11(5), 2019. P. 1-18.
5. Patil M. et al. Ranking of risk in railway projects. *International journal of engineering sciences & research technology*. 6(6), 2017. P. 472-476. doi:10.5281/zenodo.814794.
6. Figueres E. M., Hughes P., Gulijk C. Big Data for Risk Analysis: the future of safe railways. *XII Congreso de ingeniería del transporte. 7, 8 y 9 de Junio, Valencia (España)*. Editorial Universitat Politècnica de València, 2016. P. 347-353. doi.org/10.4995/CIT2016.2016.1825.
7. Sasidharan M. et al. A Review of Risk Management Applications for Railways. *14th International Conference of Railway Engineering*. 2017. 15 p. doi:10.25084/raileng.2017.0065.
8. Smoczyński P., Kadziński A., Introduction to the risk management in the maintenance of railway tracks. *Journal of mechanical and transport engineering*. 68(4), 2016. P. 65-80. doi:10.21008/j.2449-920X.2016.68.4.06.
9. Pablo-Martí F., Santos J. S., Kaszowska J. An agent-based model of population dynamics for the European regions. *Emergence: Complexity and Organization*. 17(2), 2015. P. 18-24.

10. Otto A. et al. Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 33, 2019. P. 385-397. doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.10.025.
11. Bohus L. A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis. *Procedia Engineering*. 187, 2017. P. 150-159. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361.
12. Hadj-Mabrouk H. Contribution of Artificial Intelligence to Risk Assessment of Railway Accidents. *Urban Rail Transit*. 5(2), 2019. P. 104-122. doi.org/10.1007/s40864-019-0102-3.
13. Baranovskyi D., Muradian L., Bulakh M. The Method of Assessing Traffic Safety in Railway Transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 042075, 2021. P. 1-6.
14. Bulakh M., Okorokov A., Baranovskyi D. Risk System and Railway Safety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 042074, 2021. P. 1-7.
15. Peng Z., Lu Y., Miller A., Johnson C., Zhao T. Risk Assessment of Railway Transportation Systems using Timed Fault Trees. *Quality and Reliability Engineering*. 32, 2016. P. 181-194. doi:10.1002/qre.1738.
16. Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 52(1161), 2015. С. 127-130.
17. Гаврилюк В. І. Забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах: монографія. Дніпро: ДНУЗТ, 2019. 282 с. ISBN 978-966-8471-89-6.
18. Равлюк В. Г. Визначення технічного стану буксових підшипників рухомого складу шляхом вібродіагностування. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2/7 (74), 2015. С. 11-15.
19. Рачинська А. В. Класифікація ризиків на залізничному транспорті як основа формування системи економічної безпеки його функціонування. *Економіка і суспільство*. 6, 2016. С. 81-87.
20. Myamlin S., Muradian L., Pitsenko I. Influence of Diagnostics of Axle Boxes of Freight Cars on Traffic Safety of the Railway Transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 666, 052051, 2021. P. 1-6. doi:10.1088/1755-1315/666/5/052051.
21. Muradian L., Pitsenko I., Shaposhnyk V., Shvets A., Shvets A. Predictive model of risks in railroad transport when diagnosing axle boxes of freight wagons. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 237(4), 2023. P. 528-532. doi:10.1177/09544097221122043.

Піценко Ірина Віталіївна, аспірантка кафедри вагонів та вагонного господарства, Український державний університет науки та технологій. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5674-0337>. Тел.: +380964122426. E-mail: irinapit95@gmail.com.

Pitsenko Iryna Vitaliyvna, PhD student, Department of Railway cars, Ukrainian State University of Science and Technology. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5674-0337>. Tel.: +380964122426. Email: irinapit95@gmail.com.

Статтю прийнято 10.12.2023 р.