

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463-592.11**В. Г. РАВЛЮК^{1*}, Н. Ю. ЛАМНАУЕР², І. Ш. ОГЛИ ЕЛЯЗОВ³, І. К. КИРИЧЕНКО⁴,
Н. М. СКУБАК⁵**^{1*}Каф. «Інженерія вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, м-н Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482²Каф. «Охорона праці, стандартизація та сертифікація», Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, Харків, Україна, 61003, тел.+38 (093) 149 39 17, ел. пошта lamnaouernatali@gmail.com, ORCID 0000-0002-6779-8761³Каф. «Транспортна техніка та технологія управління», Азербайджанський технічний університет, пр. Савіда Хусейна, 25, Баку, Азербайджан, AZ 1148, тел. +994 (050) 664 42 71, ел. пошта iselyazov@beu.edu.az, ORCID 0000-0002-7690-9996⁴Каф. «Вища математика», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (095) 487 02 38, ел. пошта ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275⁵Каф. «Інженерія вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, м-н Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта nata.7skubak@gmail.com, ORCID 0000-0002-6923-8370**Оцінка ресурсу гальмових колодок вантажних вагонів в умовах експлуатації**

Мета. Це дослідження спрямоване на обґрунтування й розробку коректної для практичного використання моделі вичерпання ресурсу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів на основі масових обстежень їх зносу з використанням елементів теорії статистичних висновків. **Методика.** Проведені в декілька етапів виробничі дослідження дали змогу виявити та накопичити достатню кількість статистичних даних про наявність несправностей, відмов або дефектів елементів гальмової важільної передачі (ГВП). Статистичні дані щодо визначення ресурсу композиційних гальмових колодок до їх повної відмови зібрано для типової та модернізованої конструкції важільної передачі візків вантажних вагонів. Як методику досліджень використано відомі положення теорії статистичних висновків, які застосовують до технічних гальмових систем вузлів та елементів вантажних вагонів. **Результати.** За поточними обстеженнями зносу композиційних гальмових колодок важільних передач отримано емпіричні характеристики. Це дало змогу досягти більш достовірних результатів із закону розподілу випадкових величин щодо зносу композиційних гальмових колодок – обмежити робочий ресурс колодок за пробігом за умов їх безпечної експлуатації. Запропонована в роботі модель функції щільності розподілу випадкової величини для композиційних гальмових колодок дозволяє з високою точністю оцінити таку важливу характеристику, як граничний поріг ресурсу, що дає можливість прогнозувати роботоздатність гальмових колодок і визначити ефективність роботи важільних передач візків вантажних вагонів. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано коректну статистичну модель зносу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів. На підставі розробленої моделі досліджено хронологію виникнення клинодуального зносу композиційних гальмових колодок і його вплив на їх ресурс в умовах експлуатації. Проведені натурні дослідження на експериментальних візках вантажних вагонів підтвердили, що ресурс робочого тіла композиційних колодок збільшився в середньому до 64,3 % для модернізованих гальмових важільних передач порівняно з типовими. **Практична значимість.** Отримані в роботі позитивні результати в подальшому буде враховано для розв'язання технічних проблем ненормативного зносу композиційних гальмових колодок у візках вантажних вагонів парку АТ «Укрзалізниця», що дасть можливість подовжити міжремонтні періоди.

Ключові слова: гальмова колодка; знос; гальмова важільна передача (ГВП); вантажний вагон; аналіз; модель; статистичні дослідження; параметр

Вступ

Звітні дані останніх років, що висвітлюють безпеку руху у вагонному господарстві АТ «Укрзалізниця», свідчать, що механічне обладнання гальмових систем візків вантажних вагонів стало занадто вразливим у сучасних

умовах підвищення швидкостей руху та збільшення обсягу вантажу, який перевозять у вагонах.

Останнім часом докладають багато зусиль, щоб вирішити проблему ненормативного зносу гальмових колодок як у візках вантажних вагонів АТ «Укрзалізниця», так і власного парку

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вагонів, як експлуатованих на мережі магістрального транспорту колії 1520 мм [1]. Ця проблема спричинена конструкційними особливостями гальмової важільної передачі (ГВП). Відхилення він нормативного зносу колодок пов'язано зі зниженням ефективності гальмувань рухомого складу через зменшення площі контакту між гальмовими колодками й колесами візків, що призводить до збільшення частоти й обсягу ремонту рухомого складу, додаткових витрат енергоресурсів на тягу поїздів та сумарного зниження економічних показників вантажних перевезень. Тому в останні роки провідні організації вагобудування перманентно модернізують ГВП з метою підвищення її надійності, довговічності та ремонтпридатності [16].

Тріангелі гальмових передач візків вантажних вагонів працюють так, що під час гальмування вагона до коліс одночасно притискаються гальмові колодки, а система ГВП повинна бути врівноваженою щодо силового навантаження кожної колодки. За рахунок динаміки від взаємодії коліс із нерівностями рейкової колії ця врівноваженість порушується, і колодки зношуються найчастіше у верхніх краях, а це є основною причиною їх клинодуального зносу [14].

Шляхи конструктивного уникнення таких наслідків у роботі ГВП було запропоновано в праці [13]. Проте ніяких застережень щодо клинодуального зносу колодок в експлуатації у відповідній Інструкції [6] не передбачено тому, що цей стохастичний процес недостатньо вивчено на прикладі серійних візків (мод. 18–100) з ГВП, які експлуатують на мережі АТ «Укрзалізниця».

Виправити таке становище з надмірним вилученням колодок за цим дефектом намагалися і вітчизняні, і закордонні дослідники шляхом створення спеціальних пристроїв. У дослідженнях [23–25] перевірку на роботоздатність гальмових систем візків проведено на каткових стендах із вимірюванням параметрів зносу й температурних показників.

У подібному дослідженні [5] ідентифікацію справних гальмових колодок визначено вимірюванням таких параметрів: сили натискання колодок на колеса, твердість матеріалу колодок тощо. Також статистично визначено залежність

часу гальмування вагонів від ухилів рейкової колії, величини гальмового шляху під час повного службового гальмування рухомого складу. Проте в цій роботі не приділено достатньо уваги специфічним умовам контакту клинодуально зношених композиційних гальмових колодок із колесами візків.

У роботі [22] запропоновано методика визначення гальмової ефективної (корисної) площі колодки в разі появи зносу на поверхні її контакту з колесом, але тільки у верхніх її частинах (стертості) залежно від зазору між ними.

У дослідженні [7] описано регресійну модель тертя колодки об колесо у підвізних-вивізних локомотивах промислових підприємств в умовах невизначеності, коли кількість вхідних параметрів досить велика, а вихідних – обмежена з урахуванням значення коефіцієнта тертя. Проте за значної розмірності математичної моделі отримані вихідні параметри не мають стабільних рішень.

У роботі [15] висвітлено можливі причинно-наслідкові зв'язки появи небажаного дуального зносу колодок і запропоновано декілька змін у конструкції тріангеля ГВП. Шляхом нескладних статичних розрахунків достатньо коректно наведена привабливість запропонованих рішень, які сприяють подовженню терміну експлуатації колодок ГВП трьохелементних візків. На жаль, такий підхід не дає змоги прогнозувати строк працездатності колодок і визначати періоди їх планово-попереджувального ремонту.

Інший підхід, запропонований у роботі [8], присвячений питанням триботехнічних явищ та їх наслідків, що мають місце на поверхнях кочення коліс і на робочих поверхнях гальмових колодок. Ідеться про процеси, які відповідають розподілу досліджуваних параметрів, що підпорядковуються нормальному закону розподілу випадкових величин. Однак у роботі не враховано, як впливає ненормативний знос композиційних колодок на поверхню кочення коліс під час гальмування поїзда.

У працях [2, 9, 19, 21] проведено подібні дослідження, але особливості планово-попереджувального ремонту (ППР) гальмових систем вантажних вагонів у жодній із них не відображено.

У роботах щодо модернізації ГВП [12, 25] дослідження клинодуального зносу гальмових

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

колодок до позитивних конструктивних змін не дійшло тому, що їх розробники пішли шляхом створення допоміжних пристроїв протидії моментам сил, які нахиляють колодки так, що вони впираються верхніми крайками в колеса.

Таку ж мету було поставлено в дослідженні [18], яке проведено як кінетостатичний аналіз роботи ГВП.

Однак вирішити цю актуальну проблему на практиці майже неможливо, оскільки конструкція ГВП стає не тільки складнішою, але й збільшує свою вагу та номенклатуру складових елементів, а це, у свою чергу, призводить до підвищення собівартості ППР.

У виробничих дослідженнях на державне замовлення АТ «Укрзалізниця» виконано розробку конструкторсько-технологічної документації щодо модернізації ГВП візків вантажних вагонів [17]. Проте у цій НДР не було проведено статистичних досліджень [16] зносу гальмових колодок парку вантажних вагонів приватних підприємств які, на відміну від вагонів АТ «Укрзалізниця», мають постійне місце дислокації й експлуатуються в пом'якшених умовах щодо напрацювання колодок на ресурс.

Мета

Це дослідження спрямоване на обґрунтування й розробку коректної для практичного використання моделі вичерпання ресурсу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів на основі масових обстежень їх зносу з використанням елементів теорії статистичних висновків.

Для досягнення мети потрібно виконати такі завдання:

- запропонувати наближену модель для оцінки ресурсу колодок вантажних вагонів із використанням масових випробувань їх відмов;
- з допомогою цієї моделі оцінити граничну межу ресурсу гальмової колодки вантажного вагона за пробігом, що дає змогу цілеспрямовано виконувати її огляд у визначений час щодо граничного значення критичного зносу (ресурсу) колодки;
- порівняти основні ресурсні оцінки гальмових колодок вантажних вагонів як у типовій, так і в модернізованій конструкції ГВП і довести, що запропонована модернізація справді пдовжує їх ресурс.

Методика

В умовах експлуатації вантажних вагонів під час візуальних спостережень за Інструкцією [6] ми вперше виявили, що їх гальмові колодки зношуються особливо, як закономірне масово розповсюджене фізичне явище – клинодуальне «спотворення» зносу гальмових колодок, яке притаманне типовій у візку розгалуженій важільно-шарнірній системі передачі рухів і зусиль одночасно на чотири гальмові колодки.

Попередньо виконаний аналіз кінетостатичних та інтенсивних динамічних дій у гальмовій системі вантажних візків під час руху вагонів показав, що на утворення та зростання клинодуального зносу колодок впливають різноманітні експлуатаційні чинники, пов'язані зі зносами та пошкодженнями вузлів і деталей загалом у всій розгалуженій складній важільно-шарнірній конструкції візка [14].

Аналіз накопиченого статистичного матеріалу дає змогу послідовно встановити причини виникнення несправностей елементів ГВП та обґрунтувати підстави для вдосконалення гальмової системи візка з позиції використання повного ресурсу гальмових колодок на увесь гарантований міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів.

Виробничі дослідження щодо виявлення та накопичення достатньої кількості статистичних даних про наявність несправностей, відмов або дефектів, що зумовлюють утворення й розвиток клинодуального зносу гальмових колодок і пошкодження поверхонь коліс, проведено в декілька етапів. Було зібрано статистичний матеріал щодо визначення ресурсу до повної відмови (заміни) на підставі дослідження 210 гальмових колодок. Дослідження проведено для типової та модернізованої конструкції ГВП візків вантажних вагонів.

Результати

За результатами експериментальних досліджень знайдено оптимальне число розбиття інтервалів для побудови гістограми з оцінювання вибіркової щільності функції розподілу нестационарного числового ряду. Оптимальне число розбиття на інтервали взято на основі досліджень [20], де за обсягом вибірки $n = 210$ узято число $r = 9$. Це відповідає вимогам до стандар-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тів сучасних статистичних досліджень [22].

Такий підхід слід вважати обґрунтованим, якщо враховувати результат використання формули Стерджеса, за якою маємо $r = 1 + 3,3221\lg n \approx 8,7$. Тобто вибірки напрацювання на ресурс потрібно поділити на 9 інтервалів, якщо сумарна кількість спостережень перевищує 100 одиниць.

Результати ресурсних випробувань колодок вантажних вагонів у годинах роботи для типової та модернізованої конструкції ГВП візків наведено в табл. 1, на основі яких побудовані гістограми (рис. 1).

Із рис. 1 (*a* і *б*) видно, що випадкова величина ресурсу колодок несиметрична і не підпорядковується нормальному закону розподілу.

Таблиця 1

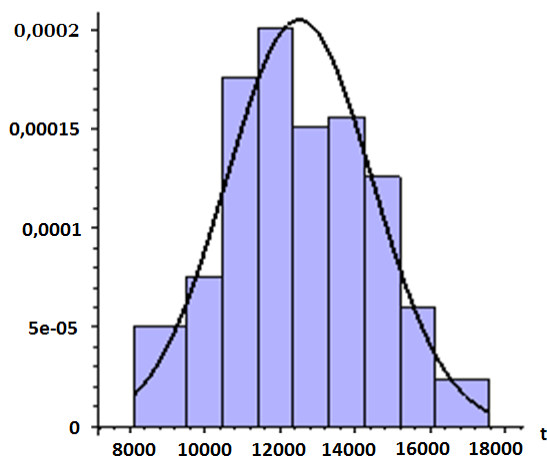
Результати досліджень ресурсу гальмових колодок у часі для ГВП

Table 1

Research results of brake pads resource in time for brake rigging

№ <i>r</i>	Типова ГВП		Модернізована ГВП	
	Інтервал напрацювання на ресурс, год	Частота, n_i	Інтервал напрацювання на ресурс, год	Частота, n_i
1	8567 – 9512,4	15	11499 – 12355,6	15
2	9512,4 – 10457,9	15	12355,6 – 13212,1	15
3	10457,9 – 11403,3	35	13212,1 – 14068,7	45
4	11403,3 – 12348,8	40	14068,7 – 14925,2	42
5	12348,8 – 13294,2	30	14925,2 – 15781,8	29
6	13294,2 – 14239,7	31	15781,8 – 16638,3	29
7	14239,7 – 15185,1	15	16638,3 – 17494,9	21
8	15185,1 – 16130,6	12	17494,9 – 18351,4	8
9	15185,1 – 17076	7	18351,4 – 19208	6

a – a



б – б

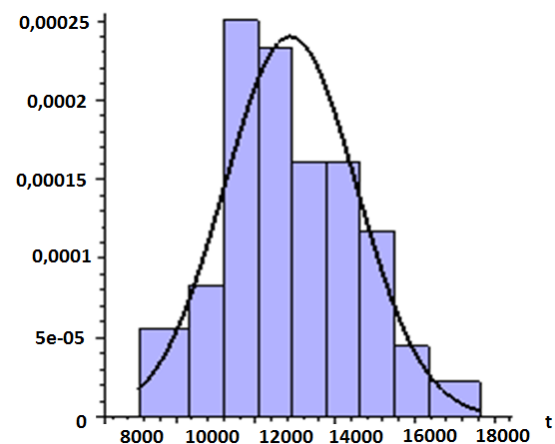


Рис. 1. Гістограма ресурсу T в часі колодок з апроксимацією нормальним законом розподілу: *a* – типової ГВП; *б* – модернізованої ГВП

Fig. 1. Resource histogram T of the pads in time with an approximation of the normal distribution law: *a* – typical brake rigging; *b* – modernized brake rigging

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За випробуванням колодок вантажних вагонів були знайдені в часі числові характери-

стики ресурсу колодок типової та модернізованої конструкції ГВП візків (табл. 2).

Таблица 2

Числові характеристики вибірки

Table 2

Numerical characteristics of the sample

Числові характеристики	Конструкція ГВП	
	типової	модернізованої
Середнє значення ресурсу \bar{t} на час	12505,43810	14881,42381
Виправлена дисперсія, s^2	3779571,961	2762500,073
Емпіричний стандарт, s	1944,112127	1662,077036
Коефіцієнт асиметрії, as	0,139372094	0,291046355
Квадрат коефіцієнта асиметрії, as^2	0,019424581	0,084707980
Коефіцієнт ексцесу: – з мінусом 3 <i>eks</i> . – без мінуса 3 <i>eks</i> .	–0,68983109 2,31016891	–0,43725999 2,56274001

Для аналізу більшості робіт за ресурсними випробуваннями використовують розподіл Вейбулла, тому спочатку перевіримо, чи можна застосувати такий розподіл для наших експериментальних досліджень [4].

Функція щільності трипараметричного розподілу Вейбулла має вигляд:

$$f(x, \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} (x - \gamma)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{(x - \gamma)^\beta}{\alpha}\right), & x \geq \gamma, \\ \gamma \geq 0, \quad \beta > 0, \quad \alpha > 0; \\ 0, & x < \gamma, \end{cases}$$

де α – параметр масштабу; β – параметр форми; γ – параметр зсуву.

Математичне сподівання має вигляд:

$$\mu = \gamma + \alpha^{1/\beta} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right),$$

а дисперсія:

$$\sigma^2 = \alpha^{2/\beta} \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right].$$

Якщо розподіл має моду, то її визначають за виразом:

$$x_{\text{mod}} = \gamma + \left[\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \right]^{1/\beta}, \quad \beta > 1.$$

Звідси коефіцієнт:

$$K = \frac{\mu - x_{\text{mod}}}{\sigma} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) - \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{1/\beta}}{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}}.$$

Замінивши μ на вибіркове середнє \bar{x} , σ на емпіричний стандарт s та оцінивши за гістограмою x_{mod} , знайдемо оцінку коефіцієнта K . Отримаємо для колодок типової ГВП $K = 0,3237377882$ і для модернізованої ГВП $K = -0,2840278578$.

Знайдемо оцінки параметрів розподілу Вейбулла й оцінимо параметр β , розв'язуючи рівняння зі значеннями коефіцієнта K .

Отримаємо, що для колодок типової ГВП оцінка параметра β дорівнює 2,13748367, а мо-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

дернізованої – 7,412764773. Оскільки $\beta \geq 1$, то ці результати експериментів можуть бути описані розподілом Вейбулла з модою.

Оцінку параметра α знайдемо з формули дисперсії, прирівнюючи σ^2 до виправленої дисперсії s^2 . Отримаємо для колодок типової ГВП $\alpha = 63096485,15$, а модернізованої – $\alpha = 0,9840401283 \cdot 10^{30}$.

Оцінку параметра γ знайдемо з формули математичного очікування, прирівнюючи її до вибіркового середнього \bar{t} , звідки отримаємо значення для колодок типової ГВП $\gamma = 8\,557,23$, відповідно, для модернізованої $\gamma = 4\,448,13$. Зауважимо, що отримане значення граничного порогу ресурсу для колодок типової ГВП становить $\gamma = 8\,557,23$ годин, що практично збігається зі спостережуваним значенням ресурсу, а для колодок із модернізованою ГВП граничний поріг ресурсу $\gamma = 4\,448,13$ годин очевидно занижений порівняно зі спостережуваним значенням 11 499 годин.

Це пов'язано з тим, що застосована модель Вейбулла не має верхньої межі ресурсу. Ресурс композиційних гальмових колодок із сітчастодротяним каркасом вантажних вагонів має граничне обмеження за товщиною 10 мм, що перевіряють із зовнішнього боку колодки, а в разі клиноподібного зносу – на відстані 50 мм від

тонкого верхнього її кінця. Після досягнення гранично – допустимої величини за товщиною колодку замінює слюсар із ремонту рухомого складу на нову. У зв'язку з цим застосуємо розподіл, який має нижній і верхній поріг ресурсу до відмови.

Функцію щільності розподілу $f(t)$ випадкової величини T для колодок рекомендують визначати за виразом [3]:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t \notin (b, c), \\ \frac{1+k}{c-b} \left[1 - \left(\frac{t-a}{b-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & t \in [b, a], \\ \frac{1+k}{c-b} \left[1 - \left(\frac{t-a}{c-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & t \in (a, c], \end{cases} \quad (1)$$

де a – модальне значення; b, c – нижня і верхня межа часу відповідно; k – параметр форми. Модель (1) визначена за $k > 0$ і $k < -1$, де $b < a < c$ і $b \geq 0$.

Функція розподілу випадкової величини часу T має вигляд [10]:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t \leq b \\ \left\{ t - b + k(t-a) \left[1 - \left(\frac{t-a}{b-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \right\} / (c-b), & b < t \leq a \\ \left\{ t - b + k(t-a) \left[1 - \left(\frac{t-a}{c-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \right\} / (c-b), & a < t \leq c \\ 1, & t > c \end{cases} \quad (2)$$

Для оцінки параметрів цієї моделі виконаємо заміну

$$a = (b + cq) / (1 + q). \quad (3)$$

Тоді математичне очікування $M(T)$ випадкової величини часу T для гальмових колодок вантажних вагонів матиме вигляд:

$$M(T) = \frac{3kb + kbq + b + bq + 3kqc + kc + c + qc}{2(1+q)(2k+1)}.$$

Дисперсія випадкової величини часу для моделі (1) має вигляд [3, 11]:

$$D(T) = \frac{(c-b)^2 (k+1)(2k^2q + 7k^2 + 7k^2q^2 + (4k+1)(q+1)^2)}{12(2k+1)^2(1+q)^2(3k+1)}.$$

Для цієї моделі квадратам асиметрії є функція двох змінних, яка має вигляд:

$$\beta_1^2 = \mu_3^2 / \mu_2^3,$$

де μ_k – центральний момент k -го порядку,

$$\beta_1^2 = 108(4k^2q^2 - 4k^2 + 4k^2q^3 - 4k^2q + 3kq^3 + 7kq^2 - 3k - 7kq - 1 - q + q^2 + q^3)^2 k^4 (3k+1) / ((k+1)(2k^2q + 7k^2 + 7k^2q^2 + 4k + 8kq + 4kq^2 + 1 + 2q + q^2)^3 (4k+1)^2).$$

Ексцес визначають за формулою $\beta_2 = \mu_4 / \mu_2^2$. Тоді:

$$\beta_2 = 9(3k+1)(1 + 90kq^2 + 60kq + 1184k^3q^3 + 368k^2q + 1011k^5 + 572k^6 + 813k^4 + 4q^3 + 366k^3 + 6q^2 + 102k^2 + q^4 + 532k^2q^2 + 1184k^3q + 1636k^3q^2 + 1932k^4q + 1932k^4q^3 + 2958k^4q^2 + 102k^2q^4 + 1684k^5q + 1011k^5q^4 + 366k^3q^4 + 572k^6q^4 + 528k^6q^3 + 528k^6q + 813k^4q^4 + 60kq^3 + 368k^2q^3 + 1684k^5q^3 + 2546k^5q^2 + 872k^6q^2 + 4q + 15k + 15kq^4) / (5(2k^2q + 7k^2 + 7k^2q^2 + 4k + 8kq + 4kq^2 + 1 + 2q + q^2)^2 (4k+1)(5k+1)(k+1)).$$

Оцінки параметрів моделі (1) можуть бути знайдені методом моментів, тому що для неї розраховані числові характеристики: квадрат асиметрії й ексцес, які містять тільки два параметри – k і q . Розв'язуючи системи рівнянь, в

обох випадках $\begin{cases} as^2 = \beta_1^2; \\ ek = \beta_2. \end{cases}$ отримаємо: для коло-

док типової ГВП $k=0,796616022$ і $q=0,7099086449$, а модернізованої – $k=1,494338579$ і $q=0,6053181062$. Для зна-

ходження оцінок параметрів моделі (1) b і c розв'яжемо систему рівнянь $\begin{cases} M(T) = \bar{t} \\ D(T) = s^2 \end{cases}$, підс-

тавляючи знайдені параметри k і q . Отримаємо для колодок типової ГВП: $b=8\,143,000275$

і $c=17\,355,13453$; відповідно, модернізованої: $b=11\,054,76894$ і $c=19\,484,54429$.

Оцінку параметра a знаходимо з рівняння-заміни (3). Отримаємо для колодок типової ГВП $a=11\,967,63370$, модернізованої $a=14\,233,38858$ годин.

Із такою функціональною характеристикою, як інтенсивність відмов $L(t) = f(t) / (1 - F(t))$ [10], можна однозначно визначити модель випадкової величини.

За отриманими оцінками параметрів для моделі (1) і моделі Вейбулла знайдемо функціональні теоретичні характеристики $L(t)$ і порівняємо їх з емпіричними значеннями.

Результати порівняння наведені на рис. 2, а для колодок типової ГВП, а на рис. 2, б – модернізованої ГВП.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

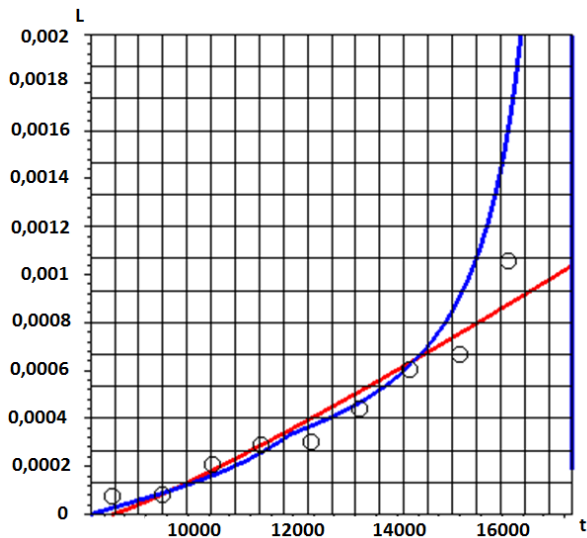
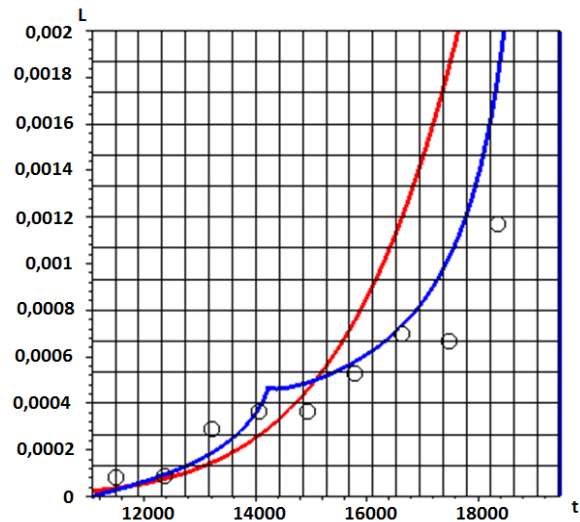
 $a - a$  $b - b$ 

Рис. 2. Емпіричні оцінки інтенсивності відмов (кола), моделі Вейбулла (червона лінія) і розробленої моделі (1) (синя лінія):

a – колодок типової ГВП; b – колодок модернізованої ГВП

Fig. 2. Empirical estimates of failure rate (circles), Weibull model (red line) and developed model (1) (blue line):

a – pads of typical brake rigging; b – pads of modernized brake rigging

Із рис. 2, a видно, що найкраще наближення має модель (1) в обох випадках (як для колодок модернізованої ГВП, так і для типової). Більш того, модель (1), за заданого обсягу експериментів $n = 210$, дає більш реальні оцінки граничного порога ресурсу в годинах, ніж розподіл Вейбулла. Поліпшення оцінки граничного порогу ресурсу гальмових колодок модернізованої ГВП порівняно з типовою становить 65,8 %, а оцінка середнього ресурсу – 64,3 %.

За поточними обстеженнями зносу композиційних гальмових колодок важільних передач отримано емпіричні характеристики. Це дало змогу досягти більш достовірних результатів із закону розподілу випадкових величин щодо зносу композиційних гальмових колодок – обмежити робочий ресурс колодок за пробігом за умов їх безпечної експлуатації. Запропонована в роботі модель функції щільності розподілу випадкової величини для композиційних гальмових колодок дозволяє з високою точністю оцінити таку важливу характеристику, як граничний поріг ресурсу, що дає можливість прогнозувати роботоздатність гальмових колодок і визначити ефективність роботи важільних пе-

редач візків вантажних вагонів.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше запропоновано коректну статистичну модель зносу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів. На підставі розробленої моделі досліджено хронологію виникнення клинодуального зносу композиційних гальмових колодок і його вплив на ресурс їх роботи в умовах експлуатації. Проведені натурні дослідження на експериментальних візках вантажних вагонів підтвердили, що ресурс робочого тіла композиційних колодок збільшився в середньому до 64,3 % для модернізованих гальмових важільних передач порівняно з типовими.

Отримані в роботі позитивні результати в подальшому буде враховано для розв'язання технічних проблем ненормативного зносу композиційних гальмових колодок у візках вантажних вагонів парку АТ «Укрзалізниця», що дасть можливість подовжити міжремонтні періоди.

Висновки

1. Проведені дослідження показали, що модель функції щільності розподілу випадкової величини має краще наближення до емпіричних оцінок інтенсивності відмов, отриманих під час виробничих випробувань для композиційних гальмових колодок вантажних вагонів, ніж застосована модель Вейбулла.

2. Використання емпіричної характеристики інтенсивності відмов дозволило зробити більш правильний висновок щодо закону розподілу випадкової величини, оскільки така характеристика однозначно визначає цей закон.

3. Знайдено теоретичні й емпіричні числові характеристики часу роботи композиційних гальмових колодок до повної їх відмови, які показали, що в середньому час роботи колодок із виконаною модернізацією ГВП збільшився на 64,3 %.

4. Отримана за результатами досліджень оцінка порогового значення ресурсу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів показала, що він збільшився у модернізованих ГВП на 65,8 % порівняно з типовими.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Аналіз стану безпеки руху в структурі АТ «Укрзалізниця» у 2019 році*. Акціонерне товариство «Українська залізниця» Департамент безпеки руху. Київ, 2019. 198 с.
2. Бакарджиев Р. О., Комаров А. О. Попередня оцінка і обробка даних при регресійному аналізі. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2015. № 28. С. 255–260.
3. Гмурман В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика* : учебное пособие для вузов. Москва : Высшая школа, 2003. 479 с.
4. Гребенникова И. В. *Методы математической обработки экспериментальных данных*: учебно-метод. пособие. Екатеринбург : Уральский университет, 2015. 124 с.
5. Жаров И. А., Макас А. А. Методы статистической обработки результатов измерения тормозных путей при оценке эффективности тормозных средств подвижного состава. *Вестник ВНИИЖТ*. 2009. № 5. С. 29–33.
6. *Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України. ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015*. [Чинний від 1997-10-28 № 264-Ц]. Київ : ТОВ НВП «Поліграфсервіс», 2004. 146 с.
7. Коптонец А. Н. Идентификация состояния тормоза шахтных локомотивов в условиях структурной неопределенности. *Геотехническая механика*. 2014. № 119. С. 241–246.
8. Коропець П. А., Черніков В. Д., Костюкевич А. І. Про нерівномірний знос рухомих фрикційних пар. *Вісник СХУ ім. Даля*. 2010. № 5 (147). С. 41–45.
9. Ламнауэр Н. Ю. Метод сборки деталей машин, обеспечивающий точность соединения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Вып. 6. № 7 (72). С. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29321>
10. Ламнауэр Н. Ю. Про оцінку точності технологій виготовлення деталей за параметром лінійного розміру. *Машинобудування*. 2020. Вип. 25. С. 114–120. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2020-25-114-120>
11. Ламнауэр Н. Ю., Пташний О. Д. Градації якості технологій виготовлення деталей машин на основі оцінки виправленої дисперсії. *Машинобудування*. 2021. Вип. 27. С. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2021-27-22-28>
12. Павлюков А. Э., Черепов О. В., Шалупина И. П. Тормозные колодки грузовых вагонов: анализ повреждаемости и факторов, влияющих на создание тормозной силы. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2017. № 4 (36). DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-4-11>
13. *Підсилюючий пристрій до паралельного відведення колодок від коліс у гальмівній системі візків вантажних вагонів* : пат. 121889 Україна : МПК51 В60Т 1/02 (2006.01), В61Н 15/00, В61Н 13/00; заявл. 24.04.17; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24. 12 с.
14. Равлюк В. Г. Дослідження особливостей дуального зносу колодок у гальмовій системі вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). С. 111–126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

15. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Кириченко І. К. Статистичне опрацювання параметрів зносу гальмових колодок вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 2 (86). С. 74–91. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203103>
16. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Кириченко І. К., Ламнауер Н. Ю, Мельничук А. К. Імовірнісно-статистична модель зносу гальмових колодок вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 5 (89). С. 116–133. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/217633>
17. *Розробка конструкторсько-технологічної документації на проведення модернізації гальмових важільних передач візків вантажних вагонів* : Звіт про НДР (закл.) : Укр. держ. акад. залізнич. трансп. Харків, 2012. 53 с.
18. Тулузин С. В., Горский Д. В. Оценка работоспособности тормозной рычажной передачи тележки грузового вагона на различных стадиях износа колодок и колес. *Вестник ВНИИЖТа*. 2015. № 2. С. 38–44.
19. Gorobchenko O., Tkachenko V. Statistical analysis of locomotiv extraction motors performance. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 287. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002>
20. Lamnauer N., Kupriyanov O., Skorkin A., Kondratyuk O. A Probabilistic-Statistical Model of Durability of Parts Under Cyclic Loading. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 285–294. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_28
21. Leng L., Zhu W. Compound Regression and Constrained Regression : Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician*. 2019. Vol. 74. Iss. 3. P. 226–232. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734>
22. Ravlyuk V., Elyazov I., Afanasenko I., Ravlyuk M. Determination of forces in the elements of the brake rigging of bogies of freight cars. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 166. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607003>
23. Sarma K. V. S., Vardhan R. V. *Multivariate Statistics Made Simple. A Practical Approach*. New York, 2018. 258 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429465185>
24. Sharma B. Processing of data and analysis. *Biostatistics and Epidemiology International Journal*. 2018. Vol. 1. Iss. 1. P. 3–5. DOI: <https://doi.org/10.30881/beij.00003>
25. Sinitsyn V. V., Kobishchanov V. V. Braking system for bogie successive braking of freight cars. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2020. Vol. 2020. Iss. 3. P. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-3-21-28>
26. Thrane C. *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London, 2019. 202 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756>
27. Vakkalagadda M. R. K., Srivastava D. K., Mishra A., Racherla V. Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Wear*. 2015. Vol. 328–329. P. 64–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044>
28. Vineesh K. P., Vakkalagadda M. R. K., Tripathi A. K., Mishra A., Racherla V. Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian Railways and associated causes. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 59. P. 493–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.023>
29. Zhang Y., Zhang M. The application status of unit brakes on metro vehicles in China. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2018. Vol. 3 (15). P. 17–23.

V. G. RAVLYUK^{1*}, N. Y. LAMNAUER², I. Sh. oglu ELYAZOV³, I. K. KYRYCHENKO⁴,
N. M. SKUBAK⁵

^{1*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

²Dep. «Occupational Safety, Standardization and Certification», Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Universitetska St., 16, Kharkiv, Ukraine, 61003, tel. + 38 (093) 149 39 17, e-mail lamnaouernatali@gmail.com, ORCID 0000-0002-6779-8761

³Dep. «Transport Engineering and Management Technology», Azerbaijan Technical University, Savid Hussein Av., 25, Baku, Azerbaijan, AZ 1148, tel. +994 (050) 664 42 71, e-mail iselyazov@beu.edu.az, ORCID 0000-0002-7690-9996

⁴Dep. «Higher mathematics», Kharkiv National Automobile and Road University, Yaroslava Mudroho St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (095) 487 02 38, e-mail ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

⁵Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail nata.7skubak@gmail.com, ORCID 0000-0002-6923-8370

Resource Estimation of Freight Car's Brake Pads in Operating Conditions

Purpose. This research is aimed at substantiation and development of the correct for practical use model of service life exhaustion of brake pads of freight cars based on mass inspections of their wear using the elements of the statistical conclusions' theory. **Methodology.** Production research conducted in several stages, allowed identifying and accumulating sufficient statistics on the malfunctions, failures or defects of the elements of the brake rigging. Statistics on determining the service life of composite brake pads before their complete failure were carried out for a typical and modernized design of the brake rigging of freight cars. The well-known provisions of the theory of statistical conclusions, which are applied to technical brake systems of units and elements of freight cars, were used as research methods. **Findings.** Empirical characteristics are obtained as a result of current inspections of wear of composite brake pads of brake rigging. This made it possible to achieve more reliable results from the law of random variables distribution concerning the wear of composite brake pads – to limit the service life of pads on the run under conditions of their safe operation. The proposed model of the density distribution function of random variables for composite brake pads allows high accuracy estimating such an important characteristic as the resource threshold. This make it possible to predict the brake pads performance and determine the efficiency of brake rigging of freight car bogies. **Originality.** For the first time, a correct statistical wear model of composite brake pads of freight cars has been proposed. Based on the developed model the occurrence chronology of clinodual wear of composite brake pads and its influence on a resource of their work in operating conditions is investigated. Field research on experimental bogies of freight cars confirmed that the service life of composite pads has increased by an average of 64,3% for upgraded brake rigging compared to typical ones. **Practical value.** The obtained positive results will be taken into account in the future to solve problematic technical issues related to non-standard wear of composite brake pads in the freight cars' bogies of Ukrzaliznytsia JSC, which will allow extending the interrepair periods.

Keywords: brake pad; wear; brake rigging; freight car; analysis; model; statistical research; parameter

REFERENCES

1. *Analiz stanu bezpeki rukhu v strukturі AT «Ukrzaliznytsya» u 2019 rotsi.* Akcionerne tovarystvo «Ukrainska zaliznycja» Departament bezpeki rukhu. (2019). Kyiv. (in Ukrainian)
2. Bakardzhyiev, R. O., & Komarov, A. O. (2015). Preliminary assessment and data processing in regression analysis. *Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in agricultural production, industry machine building, automation*, 28, 255-260. (in Ukrainian)
3. Gmurman, V. Ye. (2003). *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie dlya vuzov.* Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
4. Grebennikova, I. V. (2015). *Metody matematiches koyobra botkieksper imentalny khdannyykh: uchebno-metodicheskoe posobie.* Yekaterinburg: Uralski yuniversitet. (in Russian)
5. Zharov, A., & Makas, A. (2009). Methods of statistical processing results of brake distance measurement when evaluating efficiency of rolling stock brake systems. *Vestnik VNIIZHT*, 5, 29-33. (in Russian)
6. *Instruktsiia z ekspluatatsi ihalmruk homohos kladun azaliznytsiakh Ukrainy: TsT-TsV-TsL-0015, No. 264-Ts.* (2004). Kyiv. (in Ukrainian)
7. Koptovec, A. N. (2014). Identification of mine locomotive brake state in terms of structural uncertainty. *Geo-Technical Mechanics*, 119, 241-246. (in Russian)
8. Koropets, P. A., Chernikov, V. D., & Kostiukevych, A. I. (2010). Pro neriv nomirnyi znosruk homy khfryktsiinykh par. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 5(147), 41-45. (in Ukrainian)
9. Lamnauer, N. Y. (2014). Machine parts assembly method, which provides connection accuracy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(72)), 45-49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29321> (in Russian)
10. Lamnauer, N. Y. (2020). About assessing the accuracy of manufacturing technology of parts by the parameter of linear size. *Engineering*, 25, 114-120. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2020-25-114-120> (in Ukrainian)
11. Lamnauer, N. Y., & Ptashnyi, O. D. (2021). Grading the quality of manufacturing technologies of machineparts based on the assessment of the corrected variance. *Engineering*, 27, 22-28. (in Ukrainian)
12. Pavlyukov, A. E., Cherepov, O. V., & Shalupina, I. P. (2017). Brake shoe of freight wagon: analysis of damage and factors affecting the brake power. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*, 4(36), 4-11. DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-4-11> (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

13. Ravlyuk, V. G., & Nechvoloda, S. I. (2017). *UA Patent № 121889 Ukrainyskyi instytut intelektual noiv-lasnosti* (Ukrpatent). (in Ukrainian)
14. Ravlyuk, V. G. (2019). Investigation of features of dual wear of pads in brake system of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(80), 111-126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114> (in Ukrainian)
15. Ravlyuk, V. G., Ravlyuk, M. G., & Kirichenko, I. K. (2020). Statistical processing of brake pads wear parameters of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(86), 74-91. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203103> (in Ukrainian)
16. Ravliuk, V. H., Ravliuk, M. H., Kyrychenko, I. K., Lamnauer, N. Y., & Melnychuk, A. K. (2020). Probability and statistical model of wearing of brake pads of freight cars. *Science and Transport Progress*, 5(89), 116-133. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/217633>
17. *Rozrobka konstruktors'ko-tehnolohichnoyi dokumentatsiyi na provedennya modernizatsiyi hal'mivnykhvazhill'nykh peredach vizkiv vantazhnykh vahoniv.* (2012). Zvit pro NDR (zaklyuch.): Ukrainsjka derzhavna akademiya zaliznychoho transportu. Kharkiv. (in Ukrainian)
18. Tuluzin, S. V., & Gorskiy, D. V. (2015). Performance evaluation of bogie brake rigging in a freight car at various stages of brake blocks and wheels wear. *Vestnik VNIIZhTa*, 2, 38-44. (in Russian)
19. Gorobchenko, O., & Tkachenko, V. (2019). Statistical analysis of locomotives traction motors performance. *MATEC Web of Conferences*, 287, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002> (in English)
20. Lamnauer, N., Kupriyanov, O., Skorkin, A., & Kondratyuk, O. (2020). A Probabilistic-Statistical Model of Durability of Parts Under Cyclic Loading. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 285-294. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_28 (in English)
21. Leng, L., & Zhu, W. (2019). Compound Regression and Constrained Regression: Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician*, 74(3), 226-232. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734> (in English)
22. Ravlyuk, V., Elyazov, I., Afanasenko, I., & Ravliuk, M. (2020). Determination of parameters of abnormal wear of brake pads of freight cars. *E3S Web of Conferences*, 166, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607003> (in English)
23. Sarma, K. V. S., & Vardhan, R. V. (2018). *Multivariate Statistics Made Simple. A Practical Approach*. New York. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429465185> (in English)
24. Sharma, B. (2018). Processing of data and analysis. *Biostatistics and Epidemiology International Journal*, 1(1), 3-5. DOI: <https://doi.org/10.30881/beij.00003> (in English)
25. Sinitsyn, V. V., Kobishchanov, V. V. (2020). Braking system for bogie successive braking of freight cars. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2020(3), 21-28. DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-3-21-28> (in Russian)
26. Thrane, C. (2019). *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756> (in English)
27. Vakkalagadda, M. R. K., Srivastava, D. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2015). Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Wear*, 328-329, 64-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044> (in English)
28. Vineesh, K. P., Vakkalagadda, M. R. K., Tripathi, A. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2016). Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian Railways and associated causes. *Engineering Failure Analysis*, 59, 493-508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.023> (in English)
29. Zhang, Y., & Zhang, M. (2018). The application status of unit brakes on metro vehicles in China. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 3(15), 17-23. (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 30.09.2021