

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463-592.11

В. Г. РАВЛЮК¹, М. Г. РАВЛЮК², І. К. КИРИЧЕНКО³, Н. Ю. ЛАМНАУЕР⁴,
А. К. МЕЛЬНИЧУК⁵¹Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482²Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X³Каф. «Фізико-математичні дисципліни», Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023, тел. +38 (095) 487 02 38, ел. пошта ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275⁴Каф. «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 0000-0002-6779-8761⁵Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл.Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта melnichuknastya417@gmail.com, ORCID 0000-0003-3815-5617

ІМОВІРНОСНО-СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ЗНОСУ ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Мета. Це дослідження спрямоване на застосування лінійних моделей для визначення зносу гальмових колодок вантажних вагонів у верхній і нижній частині з метою подальшого їх використання під час розв'язування подібних практичних задач. **Методика.** Як робочу методику використано відомий підхід контролювання лінійних змін зносу параметрів колодок залежно від пробігу вантажних вагонів по мережі АТ «Укрзалізниця» з модернізованими гальмовими важільними передачами в реальних умовах експлуатації. На основі отриманих статистичних даних в умовах експлуатації послідовно знайдено значення відповідних показників регресійного аналізу зносу колодок у конкретних точках, рекомендованих нормативними документами під час виконання технічного обслуговування в експлуатаційних підрозділах вагонного господарства для гальмових систем вантажних вагонів. **Результати.** Побудовано ймовірносно-статистичну модель зносу гальмових колодок на підставі експериментальних даних, зібраних у відповідних парках сортувальної станції в процесі експлуатації вантажних вагонів. Запропоновано функцію розподілу зносу для верхньої та нижньої частини колодки, за допомогою якої можна розв'язати практичні задачі. Також для різних частин гальмової колодки знайдено її γ -відсотковий і середній залишковий знос. **Наукова новизна.** Уперше для колодок гальмових систем вантажних вагонів із модернізованими пристроями визначено функціональну залежність їх зносу від пробігу вагонів по мережі АТ «Укрзалізниця». На підставі отриманої залежності розроблено статистичну модель зносу колодок з урахуванням можливостей їх використання до повного вичерпання ресурсу. Також визначено функцію розподілу пробігу вантажних вагонів з урахуванням зносу колодки, за допомогою якої знаходять відсоток зносу за заданого пробігу. **Практична значимість.** Результати, отримані в роботі, можна враховувати для розв'язання технічних проблем щодо ненормативного зносу колодок у гальмових системах візків і збільшення міжремонтних періодів експлуатації вантажних вагонів.

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

Вступ

За останні роки на залізничному транспорті України спостерігається істотне погіршення технічного стану гальмових систем вантажних вагонів, від яких у першу чергу залежить безпека руху поїздів. Однією з найбільш поширених відмов є клинодуальний знос гальмових колодок вантажних вагонів, спричинений недосконалою конструкцією важільної передачі візка, яку не модернізували багато десятиліть.

У результаті виконаних розширених експлуатаційних обстежень гальмових систем візків вантажних вагонів як інвентарного парку АТ «Укрзалізниця» так і промислових підприємств було встановлено, що більшість пристроїв для рівномірного відведення колодок перебувають у незадовільному стані, наслідком чого є клинодуальний знос гальмових колодок вантажних вагонів. Значна частина пристроїв має пошкоджений замок і скобу для рівномір-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ного зносу колодок, що призводить до непрацездатного стану, а іншою основною причиною є конструктивний недолік триангеля.

Відомо, що типовий триангель, який застосовують у візках вантажних вагонів, має врівноважену конструкцію відносно свого підвищення [13]. Але після приєднання до розпірки триангеля деталей гальмової важільної передачі (ГВП) умова його врівноваженості порушується. Під дією сили, яка створюється вагою приєднаних до нього деталей, він схиляється до упору, а це спричиняє притискування верхніх кінців гальмових колодок до поверхонь кочення коліс. Відбувається інтенсивне тертя верхніх кінців колодок по поверхні кочення коліс під час руху без гальмування. Унаслідок цього на верхніх частинах робочої площі колодок інтенсивно зростає місцева стертість, яка спричиняє їх клинодуальний знос.

Тому запорукою успішного вирішення такої проблеми під час технічного утримання вагонів є, по-перше, модернізація типової ГВП, а по-друге, створення підстав для збільшення міжремонтних періодів експлуатації вантажних вагонів шляхом прогнозування залишкового ресурсу колодок у гальмових системах модернізованих пристроїв візків.

Проблема клинодуального зносу гальмових колодок, спричинена конструкційними особливостями ГВП візка, виникла давно. Вона пов'язана зі зниженням ефективності гальмувань рухомого складу через зменшення площі контакту триботехнічних пар, що призводить до збільшення вимушених ремонтних робіт, витрат енергоресурсів на тягу поїздів і зменшення загальних економічних показників вантажних перевезень [1]. Вивчення причин і наслідків такого явища відображено в праці [13], де зосереджено увагу на тому, що занадто велика кількість елементів і зайвих зв'язків у ГВП візка (мод. 18–100) перешкоджає самовстановленню поверхонь тертя гальмових колодок відносно площин кочення коліс пристроїв М 1180.000 рівномірного відведення [6]. Ці пристрої після нетривалої експлуатації не забезпечують надійну роботу гальм через те, що динамічні навантаження, які діють на їх елементи, спричиняють значну кількість відмов в умовах експлуатації. У закордонних дослідженнях [23, 25] працездатність гальмових систем рухомого складу ви-

значають за стендовими випробовуваннями зносу й температурних показників, а деякі дослідження зосереджені на перевагах використання чавунних гальмових колодок [24].

У праці [18] розглянуто методику визначення геометричних параметрів корисної площі контакту колодок у разі утвореного верхнього шкідливого зносу залежно від зазору між колесом і гальмовою колодкою, із використання координатного та графічного методів, за умови справних пристроїв рівномірного відведення колодок від коліс вагонів.

У роботі [5] було запропоновано один із підходів до подібних статистичних досліджень. Автори оцінювали такі параметри, як сила натискання гальмових колодок на колеса, твердість матеріалу колодок тощо під час встановлення величини гальмового шляху залежно від швидкості руху, ухилу рейкової колії й радіуса кривої в разі гальмування рухомого складу. Статистично встановлено «критичні» ухили величини гальмового шляху в разі повного службового гальмування рухомого складу. Проте в роботі не розглянуто умови, коли зменшується гальмова площа контакту колодки з колесом за дуального їх зносу, тому оцінювати гальмову ефективність поїзда позитивно не можна.

У дослідженні описаному в праці [7], було розроблено регресійну модель тертя колодок і коліс локомотивів промислового транспорту в умовах структурної невизначеності за великої кількості складних вхідних змінних у моделях параметрів, тобто з урахуванням значення коефіцієнта тертя. Виключити нестійкі рішення в такій багатопараметричній моделі складно, хоча автор запропонував для цього своє бачення проблеми. Однак головний параметр – знос колодок за товщиною, який у системі планово-попереджувальних ремонтів (ППР) обмежує застосування всіх типів гальмових колодок (із точки зору безпеки їх використання), під час ідентифікації моделі включено не було.

У дослідженні [14] було встановлено причину шкідливого дуального зносу колодок і визначено можливості ліквідації вказаного недоліку, що призводить до передчасної заміни гальмових колодок, які не використали свій ресурс робочої маси в межах планових міжремонтних пробігів. У цій роботі використано статистичний підхід планування експери-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ментів за дослідної експлуатації вантажних вагонів із типовими й модернізованими ГВП, які були включені в один склад. Але завдання щодо прогнозування термінів їх експлуатації не ставилося.

Інший підхід було запропоновано колективом авторів у роботі [8]. На прикладі ненормативного зносу гальмових колодок у статті розглянуто питання про нерівномірний знос пар тертя колодок із колесами одного вагона, їх динамічні процеси, які описано досить складною моделлю. Але тут мова йшла про ситуації, коли випадкові значення величини досліджуваних параметрів підпорядковуються нормальному закону розподілу.

У роботах [9, 16, 17, 20] йдеться про аналогічні дослідження, але специфіку планово-попереджувальних ремонтних робіт під час регулювання вузлів гальмових систем рейкового рухомого складу в них не відображено.

На підставі попередніх спостережень, проведених в умовах експлуатації вантажних вагонів, було встановлено, що на утворення й розвиток клинодуального зносу колодок впливає конструкція та стан гальмової системи вагонних візків. У разі досягнення пробігу вантажного вагона близько 80 тис. км необхідно виконувати заміну ненормативно зношеної колодки (її ресурс розрахований на пробіг 160 тис. км), у якій залишається в середньому 39 % робочої маси, а це зайві експлуатаційні витрати, яких можна уникнути шляхом модернізації ГВП вантажних вагонів, експлуатованих на залізничному й промислового транспорту, що дозволить збільшити їх міжремонтні періоди. За умов застосування модернізованих ГВП можна збільшити на порядок пробіг вантажних вагонів на магістральних коліях і ресурс гальмових колодок, але відсутність прогностичних моделей не дає змогу цього зробити.

У дослідженнях [11, 21], присвячених конструктивним змінам ГВП, залишаються невирішеними проблеми клинодуального зносу колодок через те, що їх розробники пропонували створювати різноманітні допоміжні пристрої протидії силам, які нахиляють колодки до впирання в колеса, тільки на підставі кінетостатичного аналізу механізму ГВП [15]. Однак, як показує практика, такий підхід пов'язаний з ускладненням конструкції ГВП, збільшенням

її собівартості та трудомісткості виготовлення й ремонту. Проаналізовані дослідження дають змогу зазначити, що наявним проблемам клинодуального зносу гальмових колодок, які застосовують у гальмових системах сучасних вантажних вагонів, – достатньо уваги приділено не було.

Мета

Це дослідження спрямоване на застосування лінійних моделей для визначення зносу гальмових колодок вантажних вагонів у верхній і нижній частині з метою подальшого їх використання під час розв'язування подібних практичних задач.

Для дослідження зносу гальмових колодок необхідно вирішити такі завдання:

- виконати конструктивний аналіз елементів типової ГВП візка, що спричиняють утворення клинодуального зносу гальмових колодок вантажних вагонів, і напрацювати передумови для її модернізації;

- розробити ймовірно-статистичну модель зносу гальмових колодок вантажних вагонів і виконати дослідження їх зносу у верхній і нижній частині, починаючи з номінальної товщини колодок для оцінки параметрів запропонованої моделі;

- сформулювати функцію розподілу зносу верхньої й нижньої частини колодки, яка дасть змогу розв'язувати практичні статистичні задачі щодо контрольних точок (місць) гальмової колодки вантажного вагона;

- визначити апроксимуючу залежність зносу й величини пробігу вантажних вагонів із модернізованими пристроями, на підставі яких отримати залежності та знайти модель величини пробігу вагонів з урахуванням повного зносу колодки для збільшення міжремонтних періодів.

Методика

У сучасних умовах експлуатації гальмові системи візків вантажних вагонів, у яких використовують типову ГВП, не забезпечує нормативного зносу колодок. Це пояснюється як конструктивними особливостями ГВП, так і виходом із ладу через нетривалий час експлу-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

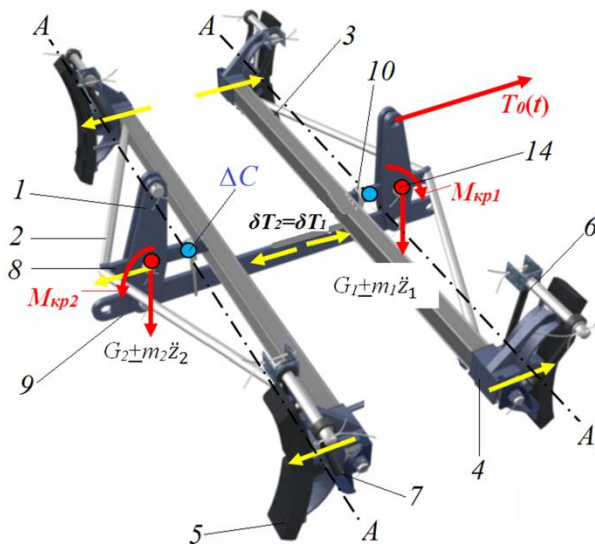
атації пристроїв М 1180.000 для рівномірного відведення гальмових колодок [6].

Для знаходження раціональних конструктивних рішень щодо зменшення зносу гальмових колодок від шкідливих явищ, які обумовлені конструктивними особливостями візка з ГВП, були проведені дослідження його структури, за результатами яких встановлено, що він має зайві зв'язки. Тому визначити кінематику й провести аналіз неможливо, так само нереально знайти інерційні силові фактори, які діють на ГВП зі сторони його елементів [13]. Через це для проведення силового аналізу цього складного механізму потрібно накладати відповідні

обмеження або розглядати його динаміку саме в межах рівнянь Лагранжа системи з гнучкими зв'язками. Для того, щоб визначити зусилля в ланці, потрібно враховувати його піддатливість у межах взаємодії пружних та інерційних сил.

У зв'язку з тим, що конструкція ГВП візка симетрична, умовно поділимо її на дві частини, які віднесемо до першої (правої) і другої (лівої) колісної пари, та побудуємо об'єднану схему розподілу силових факторів, що діють на відповідні елементи ГВП під час гальмування (рис. 1).

a – a



б – б

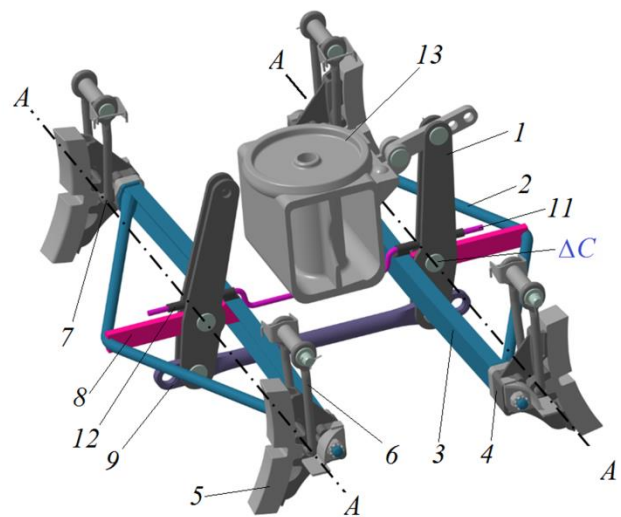


Рис. 1. Загальний вигляд моделі ГВП вантажного вагона:

a – типової конструкції; *б* – модернізованої конструкції; 1 – вертикальні двоплечі важелі; 2 – триангелі; 3 – балка триангеля; 4 – гальмові башмаки; 5 – гальмові колодки; 6 – маятникові підвіски; 7 – нижні шарніри; 8 – розпірки триангеля; 9 – затяжка вертикальних важелів; 10 – скоба із замком; 11 – напрямний криволінійний стрижень; 12 – циліндричні ковзуни; 13 – надресорна балка візка; 14 – з'єднувальний валик (шарнір); $T_0(t)$ – гальмова зовнішня сила; $\delta T_2 = \delta T_1$ – розпірні внутрішні «віртуальні» сили; $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1 = G_2 \pm m_2 \ddot{z}_2$ – статичні й динамічні сили; L – відстань, на яку потрібно перенести отвір у розпірці триангеля

Fig. 1. General view of the model freight car brake rigging:

a – typical design; *b* – upgraded structure; 1 – vertical two-shoulder levers; 2 – triangles; 3 – triangle beam; 4 – brake shoes; 5 – brake pads; 6 – pendulum suspensions; 7 – lower hinges; 8 – brake struts; 9 – tightening of vertical levers; 10 – clip with lock; 11 – guide curve rod; 12 – cylindrical slides; 13 – bogie bolster; 14 – connecting roller (hinge); $T_0(t)$ – braking external force; $\delta T_2 = \delta T_1$ – spreading internal «virtual» forces; $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1 = G_2 \pm m_2 \ddot{z}_2$ – static and dynamic forces; L – is the distance to which you want to move the hole in the strut of the triangle

Виконаний аналіз дозволив виділити специфічний знос гальмових колодок, через який тільки на їх верхніх частинах починає

з'являтися місцева фрикційна стертість не під час гальмувань, а коли відбувається рух вагонів у режимах тяги та вибігу. Установлено, що таке

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

негативне явище відбувається через низьку надійність пристрою рівномірного відведення колодок від коліс і недосконалу конструкцію триангеля. Через це за власною вагою деталей гальмової системи на триангель діє статична й динамічна сила $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1 = G_2 \pm m_2 \ddot{z}_2$ (рис. 2, *a*). Під дією цієї сили на плече L виникає крутний момент $M_{кр}$, при цьому триангель повертається навколо нижніх шарнірів 7 маятникових підвісок b (рис. 1) до впирання верхньою частиною обох колодок у поверхню кочення колісної пари і врівноважується реакцією $(N_1/2)tg\gamma$, що починає діяти в зоні зіткнення колодок із колесами (рис. 2). Деталі ГВП, вагою яких створюється динамічна сила $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1$ і момент $M_{кр}$, з'єднані між собою шарнірами зі значними зазорами, які розташовані в невідресореній частині візка. Тому під час руху вагона створюються вимушені коливання цих деталей, що

приводить до знакозмінних переміщень ударного характеру в зазорах шарнірів від дії значної за величиною статичної й динамічної складової $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1$. У зв'язку з тим, що у відомих конструкціях пристроїв, призначених для усунення ненормативного зносу гальмових колодок, створюється протидія вказаним силам, в експлуатації такі пристрої швидко руйнуються й мають незначний ресурс [18].

Щоб вирішити проблему дуального зносу гальмових колодок, у триангельній системі ГВП необхідно ліквідувати крутний момент $M_{кр}$. Для цього шарнір з'єднання вертикального важеля з розпіркою в типовому триангелі потрібно розташувати на вісі $A-A$ в точці ΔC (рис. 1, *a*), яка умовно об'єднує обидва шарніри гальмових башмаків із колодками, та зменшити до мінімуму відстань L від наявного отвору (рис. 2, *b*) (червоне коло 4) до нового (блакитне коло 4').

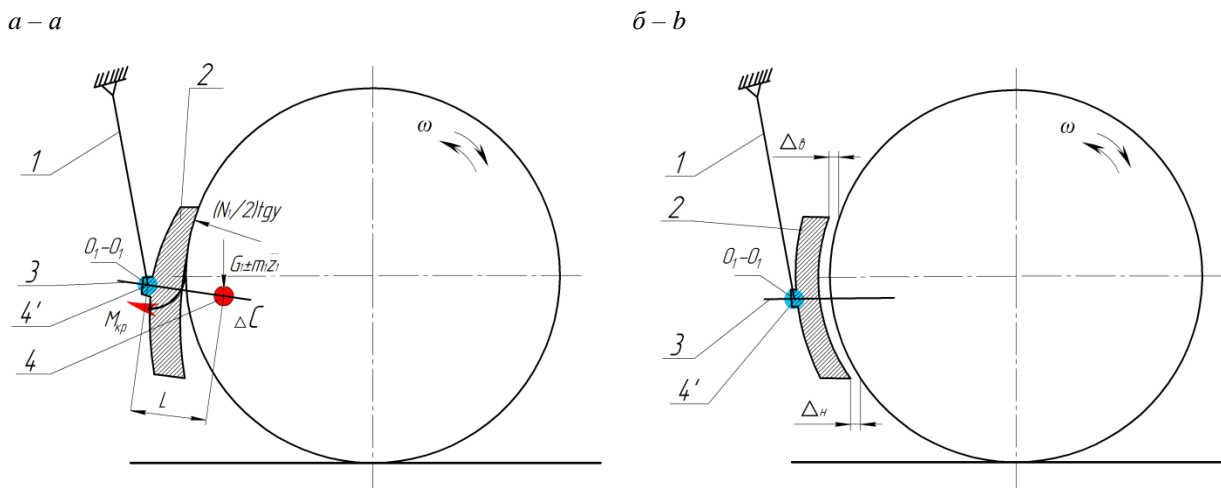


Рис. 2. Схема підвішування колодок у триангельній гальмовій системі:

a – дія сил, за яких утворюється дуальний знос колодки під час руху без гальмувань; *b* – рівномірний знос зверху і знизу колодки; 1 – маятникова підвіска; 2 – гальмова колодка; 3 – триангель; 4 – шарнір з'єднання вертикального важеля з триангелем; 4' – шарнір з'єднання вертикального важеля з триангелем, що умовно перенесений на відстань L ; Δ_b, Δ_n – зазор відповідно зверху та знизу колодки; γ – кут відхилення від горизонтального напрямку дії реакції N_1 дотичної до точки, якою колодка притискається до колеса

Fig. 2. Scheme of pads suspension in the triangle brake system:

a – action of forces under which the dual pad wear during movement without braking is being formed; *b* – uniform wear on top and bottom of the pad; 1 – pendulum suspension; 2 – brake shoe; 3 – triangle; 4 – connecting hinge of the vertical lever and triangle; 4' – connecting hinge of the vertical lever and triangle, which is conditionally transferred to the distance L ; Δ_b, Δ_n – gap at the top and bottom of the pad, respectively; γ – deviation angle from the horizontal direction of action of the reaction N_1 tangent to the point at which the pad is pressed against the wheel

Методику розрахунків типової ГВП з пристроєм М 1180.000 рівномірного відведення [6] було перевірено на наявній схемі-моделі

(рис. 1, *a*) без жодних конструктивних змін в її елементах. За результатами кінестатичних розрахунків елементів ГВП, зменшення дії

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

шкідливого зносу зверху гальмових колодок не спостерігалось, поки конструкцію триангеля не було модернізовано.

Для модернізації пристрою (рис. 1, б) було поставлено завдання: по-перше, центр мас конструкції триангеля потрібно якомога ближче наблизити до балки триангеля 3, щоб вісь загального центра ваги триангельної ГВП збігалася з нижніми шарнірами 7 маятникового підвішування 6 гальмових башмаків 4 з колодками 5. Цього можна досягти за рахунок перенесення отвору з'єднання вузла (шарніра) 14 вертикального двоплечого важеля 1 із розпіркою 8 триангеля 2 на відповідну відстань. Для цього необхідно з конструкції ГВП (рис. 1, а) прибрати скоби для рівномірного зносу із замками 10, які не виконують свою функцію. А по-друге, замість скоб із замками встановити в циліндричні ковзуни 12 напрямний криволінійний стрижень 11, який забезпечить рівномірну відстань між гальмовою колодкою 5 і колесом за попущених гальм у режимах тяги та вибігу поїзда незалежно від навантаження надресорної балки вагона 13. Також у процесі обслуговування модернізованої гальмової системи візків вантажних вагонів не виявлено випадків пошкодження напрямного криволінійного стрижня 11.

Таким чином, за рахунок конструктивних змін у ГВП було вирішено проблему виникнення клинодуального зносу гальмових колодок у візках вантажних вагонів на увесь міжремонтний період їх експлуатації, унаслідок зменши-

лася кількість показників інтенсивності їх зносу порівняно з типовими пристроями, і ГВП стали працювати безвідмовно.

Методика статистичних оцінок. Явище зносу гальмових колодок вантажних вагонів залежно від пробігу для модернізованих пристроїв рівномірного відведення колодок та утримування їх на нормативній відстані досліджено в [12, 14].

Для отримання статистичних оцінок зносу гальмових колодок потрібно зібрати об'єм вибірки n . Далі шляхом використання емпіричних функцій і їх залежностей потрібно розподілити області на кількість інтервалів l , які можна знайти з виразу $l = 5lg n$ залежно від об'єму вибірки n .

В умовах експлуатації вантажних вагонів було виконано вимірювання зносу гальмових колодок у верхній і нижній частині для пробігів вагонів від 0 до 197,8 тис. км, результати кількості випробувань склали об'єм із вибіркою $n = 106$.

Для визначення зносу верхньої X_1 і нижньої X_2 частини гальмової колодки були знайдені числові характеристики: середнє значення \bar{x} , виправлена дисперсія s^2 , квадрат коефіцієнта асиметрії As^2 і коефіцієнт ексцесу Es – для значень випадкових величин X_1 і X_2 . Результати розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Числові характеристики вимірюного зносу на гальмовій колодці X_1 і X_2

Table 1

Numerical characteristics of the measured wear on the brake pad X_1 and X_2

Вимірний знос колодки	Числові характеристики			
	\bar{x}	s^2	As^2	Es
Зверху X_1	31,693898	238,377769	0,001895	2,0117
Знизу X_2	31,856568	237,513916	0,001228	2,01451

Модель лінійних розмірів пристрою для рівномірного відведення й оцінка його параметрів за результатами зносу гальмових колодок. Застосуємо модель зносу лінійних розмірів колодок вантажних вагонів у вигляді

статистичної функції. У цьому випадку функцію щільності $f(x)$ для випадкових величин зносу X колодок пропонують визначати у вигляді [4, 10, 19, 22]:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

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

де a – модальне значення; b , c – нижня і верхня границя зносу гальмової колодки відповідно; k – параметр форми зносу гальмової колодки вантажного вагона.

Модель (1) визначена за $k > 0$ і $k < -1$, де $b < a < c$ і $b \geq 0$. Для моделі (1) функція розподілу має вигляд [2]:

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

У нашому випадку нижня границя зносу становить $b = 0$, а верхня границя $c = 65$ мм.

За таких параметрів математичне очікування має вигляд:

$$M(X) = (55 + 55k + 165kq + 55q) / 2(2k + 1)(1 + q), \quad (3)$$

де $a = 65q / (1 + q)$.

Дисперсію визначаємо за формулою [3]:

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

Для цієї моделі квадрат асиметрії є функцією двох змінних та має такий вигляд [4, 5]:

$\beta_1^2 = \mu_3^2 / \mu_2^3$, де μ_k – центральний момент k -го порядку,

$$\beta_1^2 = 108 \left(4k^2q^2 - 4k^2 + 4k^2q^3 - 4k^2q + 3kq^3 + 7kq^2 - 3k - 7kq - \right. \\ \left. - 1 - q + q^2 + q^3 \right)^2 k^4 (3k+1) / \left((k+1) (2k^2q + 7k^2 + 7k^2q^2 + \right. \\ \left. + 4k + 8kq + 4kq^2 + 1 + 2q + q^2)^3 (4k+1)^2 \right). \quad (5)$$

Ексцес визначаємо за виразом

$\beta_2 = \mu_4 / \mu_2^2$ [3–5], він дорівнює:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

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

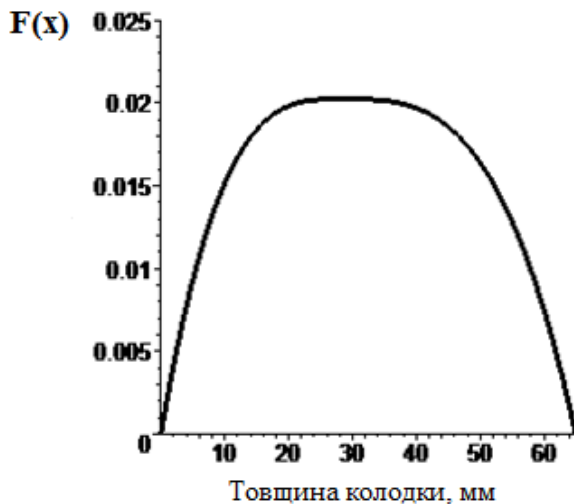
Для оцінки безрозмірних параметрів k і q застосовуємо метод моментів [3], прирівнюючи для цього теоретичні (5)–(6) та емпіричні числові характеристики (табл. 1), коефіцієнт квадрата асиметрії й коефіцієнт ексцесу.

Розв'язуючи цю систему рівнянь, отримаємо такі значення параметрів моделі (1) для: а) верху гальмових колодок $k=0,315555$,

$q=0,772721$, $a=28,333204$; б) низу гальмових колодок $k=0,319359$, $q=0,815560$, $a=29,198376$.

За отриманими значеннями параметрів побудовано графіки щільності розподілу випадкової величини зносу колодок (рис. 3 й 4) і функції розподілу зносу колодок (рис. 5 і 6).

а – а



б – б

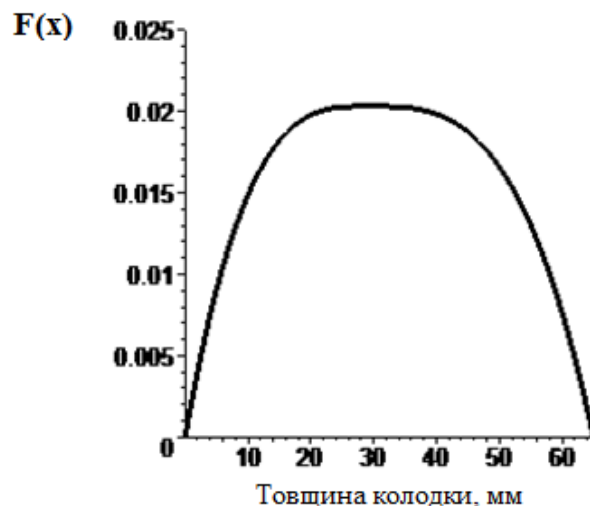
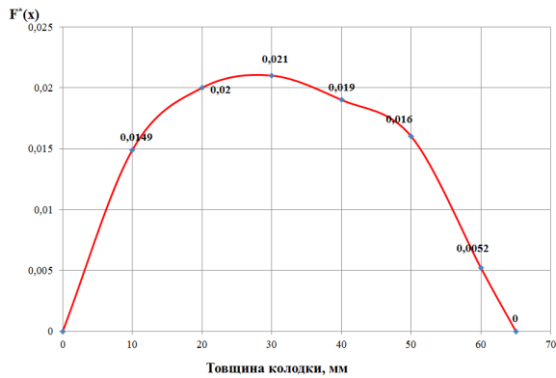


Рис. 3. Теоретична крива щільності розподілу зносу зверху (а) і знизу (б) колодок з оцінками параметрів, отриманих методом моментів

Fig. 3. Theoretical curve of the wear distribution density at the top (a) and bottom (b) of the pads with estimates of the parameters obtained by the method of moments

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

a – a



б – б

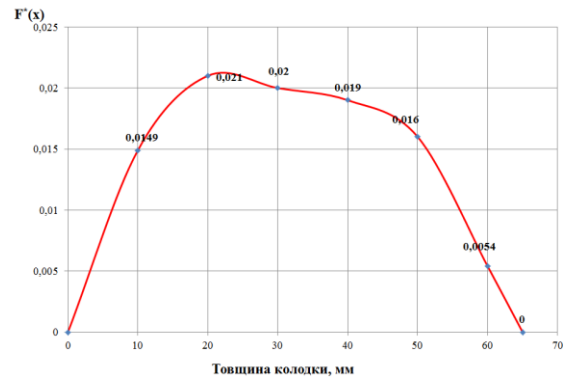
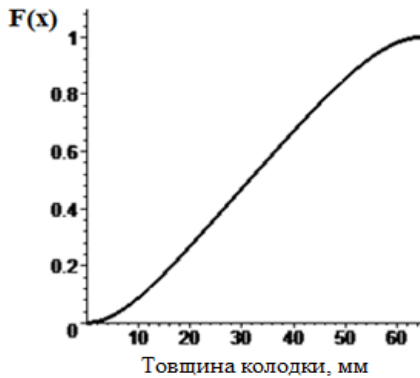


Рис. 4. Крива щільності розподілу зносу зверху (*a*) і знизу (*б*) експлуатаційних колодок

Fig. 4. Wear distribution density curve of the top (*a*) and bottom (*b*) of the operating pads

a – a



б – б

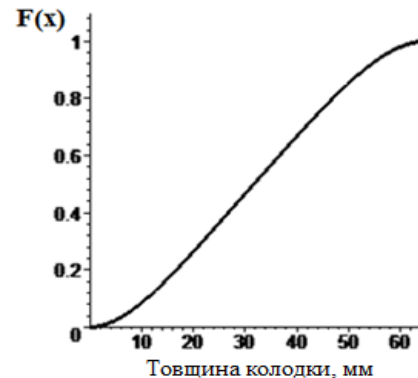
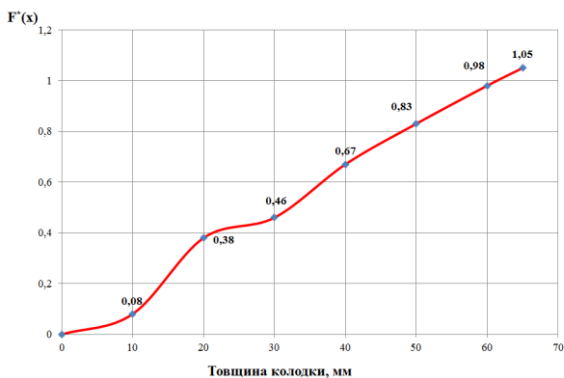


Рис. 5. Теоретична крива функції розподілу зносу зверху (*a*) і знизу (*б*) колодок з оцінками параметрів, отриманих методом моментів

Fig. 5. Theoretical curve of the wear distribution function of the top (*a*) and bottom (*b*) pads with estimates of the parameters obtained by the method of moments

a – a



б – б

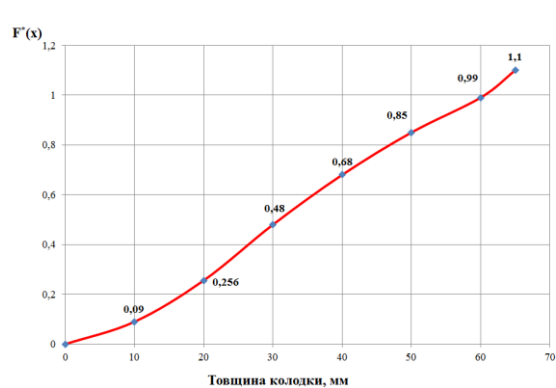


Рис. 6. Крива функції розподілу зносу зверху (*a*) і знизу (*б*) експлуатаційних колодок

Fig. 6. Curve of the wear distribution function at the top (*a*) and bottom (*b*) of the operating pads

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Чутливі характеристики закону розподілу випадкової величини та їх експлуатаційні оцінки зносу гальмових колодок. Оскільки узгодження не є адекватністю ймовірної моделі, розглянемо функціональні характеристики чутливих до моделей розподілу випадкових величин. Форма їх установлена за дослідними даними, є однією з істотних підстав близькості адекватності запропонованої моделі. Однією з таких характеристик у теорії надійності є інтенсивність відмов, яку в загальному випадку надалі будемо називати λ -характеристикою. Теоретичну λ -характеристику широко використовують на практиці і за значеннями визначається за формулою:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)}. \quad (7)$$

Одна з них має вигляд:

$$\lambda(x_{(i)}) = \frac{n(x_{(j)})}{\left[n - \sum_{j=1}^{i-1} n(x_{(j)}) \right] (x_{(i)} - x_{(i-1)})}, \quad (8)$$

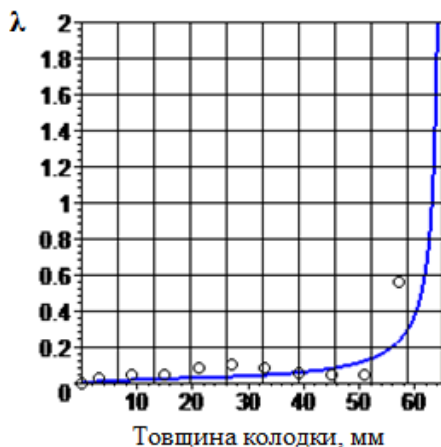
де $n(x_{(j)})$ – частота розміру з середньою величиною розміру $x_{(i)}$.

За виконаними в умовах експлуатації 106 вимірюваннями величини зносу гальмових колодок вантажних вагонів із модернізованими пристроями побудовано емпіричну та теоретичну

λ -характеристику зі знайденими параметрами розподілу (1), що зображено на рис. 7. Точки емпіричної λ -характеристики практично збіглися з точками теоретичної λ -характеристики, що вказує на можливість застосування моделі (1) для випадкової величини розміру верхнього та нижнього зносу гальмових колодок вантажних вагонів.

На рис. 7, а і б наведено λ -характеристику та її емпіричні оцінки верхнього й нижнього зносу гальмових колодок вантажних вагонів.

а – а



б – б

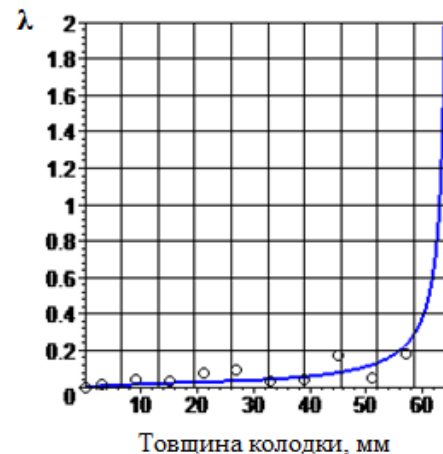


Рис. 7. Графіки λ -характеристики зносу зверху (а) і знизу (б) гальмових колодок і їх емпіричні оцінки

Fig. 7. Graphs of λ -characteristics of wear on top (a) and bottom (b) of brake pads and her empirical estimates

Із рис. 7, а і б видно, що ця характеристика в межах від 0 до 45 мм має практично лінійну зростаючу залежність. Оскільки емпіричні оцінки λ -характеристики достатньо близькі до теоретичної кривої λ -характеристики, то модель

зносу колодок (1) можна використовувати на практиці досліджень цієї спрямованості.

Оцінка μ -характеристики середнього залишкового ресурсу [3, 14] має суттєво менші випадкові флуктуації, ніж розрахована за тими ж да-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ними оцінка μ -характеристики. Це можна пояснити кращими статистичними якостями оцінок суми порівняно з оцінками часток. Більш того, оцінка μ -характеристики достатньо чутлива до правої частини розподілу, що є необхідним для дослідження обмежених моделей праворуч.

Далі будемо розглядати саме цю характеристику. Нехай проведено n випробувань, тоді за значень x залишається приблизно $n \cdot P(X \geq x)$ значень, які приймуть свої значення більші, ніж x , а до значення $x + \tau$: $n \cdot P(X \geq x + \tau)$.

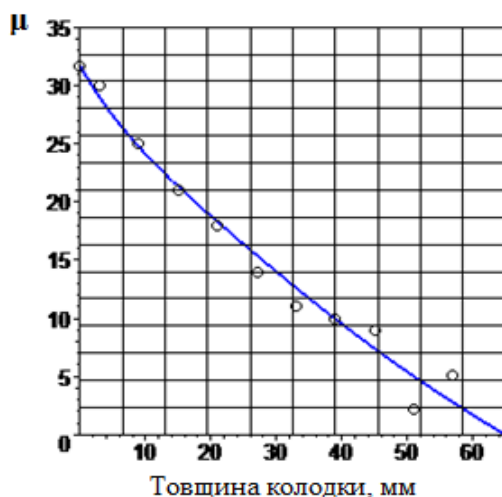
Відношення цих кількостей дає умовну ймовірність значення, що перевищує значення τ , якщо всі ці значення x уже були. При цьому розглядають упорядковані значення:

$$P(X \geq \tau / x) = \frac{P(X \geq x + \tau)}{P(X \geq x)}. \quad (9)$$

Інтегруючи вираз (9), знаходимо $\mu(x)$:

$$\begin{aligned} \mu(x) &= \int_0^{\infty} \frac{1 - F(x + \tau)}{1 - F(x)} d\tau = \\ &= \frac{1}{1 - F(x)} \int_x^{\infty} (1 - F(z)) dz. \quad (10) \end{aligned}$$

a – a



Для знаходження емпіричної оцінки $\tilde{\mu}(x)$ достатньо всі значення, за якими спостерігали, розташувати в порядку зростання, тобто з них скласти порядкові статистики $x_{(1)}, \dots, x_{(n)}$. Тоді підраховуємо величини за виразом $\tau_0^{(j)}(x_i) = \tau_j - x_i$ для тих значень τ_j , які не менші, ніж x_i .

Якщо таких величин l , тоді (з невеликим зміщенням)

$$\mu(x) \approx \bar{\tau}(x_i) = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \tau_0^{(j)}(x_i). \quad (11)$$

Оцінка $\mu(x)$ може бути знайдена з використанням емпіричних оцінок функції розподілу $\tilde{F}(x)$, де $\tilde{F}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^i f_i$, а

$$\mu(\tilde{x}) = \frac{1}{\tilde{F}(x)} \sum_{j=1}^l \left(1 - \frac{\tilde{F}(x_{i+1}) + \tilde{F}(x_i)}{2} \right) \Delta x_i \quad (12)$$

тут $x_{i+1} - x_i = \Delta x_i$.

Використовуючи формулу (10), знайдемо μ -характеристику для зносу колодки зверху і знизу за вирахованими значеннями параметрів моделі (1) (рис. 8, *a* і *b*) та її емпіричні оцінки.

b – b

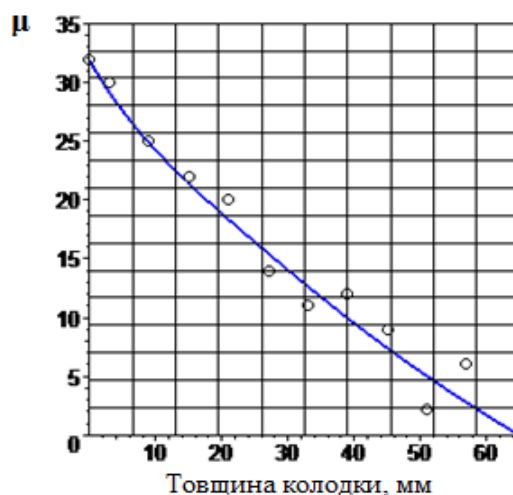


Рис. 8. Графік μ -характеристики зносу зверху (*a*) і знизу (*b*) гальмових колодок і їх емпіричні оцінки

Fig. 8. Graphs of μ -characteristics of wear on top (*a*) and bottom (*b*) of brake pads and her empirical estimates

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Із рис. 8 видно, що для значень зносу гальмових колодок вантажних вагонів в області визначення емпіричні та теоретичні μ -характеристики практично збігаються і мають однаковий характер зміни, що вказує про наближеність цієї моделі до істинної.

Ресурсні оцінки зносу колодок. Для встановлення ресурсних характеристик у точках перевірки зносу був визначений пробіг вантажного вагона з модернізованими пристроями. Дослідження показали, що залежність між зносом і пробігом вагона близька до лінійної. У пер-

шому наближенні прийемо цю залежність у вигляді $y = \eta x$, оскільки за $x = 0$ y має дорівнювати нулю. Використовуючи метод найменших квадратів, знайдено кутовий коефіцієнт η . Для зносу зверху колодки він дорівнює $\eta_1 = 5,105861$, а для зносу знизу – $\eta_2 = 5,277592$. Знаючи залежність і розподіл зносу (1), визначаємо щільність розподілу випадкової величини пробігу y :

$$f(y) = \begin{cases} 0, & y \notin (\eta b, \eta c), \\ \frac{1+k}{(c-b)\eta} \left[1 - \left(\frac{y/\eta - a}{b-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & y \in [\eta b, \eta a], \\ \frac{1+k}{(c-b)\eta} \left[1 - \left(\frac{y/\eta - a}{c-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & y \in (\eta a, \eta c]. \end{cases} \quad (13)$$

Для цієї моделі функція розподілу має вигляд:

$$F(y) = \begin{cases} \frac{-\eta(b+ka) + y(1+k) + \eta k(a-b) \left(\frac{y-a\eta}{\eta(a-b)} \right)^{\frac{1+k}{k}}}{\eta(c-b)}, & y \in [\eta b, \eta a], \\ \frac{-\eta(b+ka) + y(1+k) + \eta k(c-a) \left(\frac{y-a\eta}{\eta(c-a)} \right)^{\frac{1+k}{k}}}{\eta(c-b)}, & y \in [\eta a, \eta c]. \end{cases} \quad (14)$$

Знайдемо емпіричні та теоретичні оцінки інтенсивності й середнього залишкового ресурсу гальмової колодки вантажного вагона з урахуванням її зносу.

На рис. 9, a і b наведено графіки емпіричної та теоретичної оцінки інтенсивності пробігу вантажного вагона з модернізованими пристроями, а на рис. 10, a і b – графіки емпіричної та теоретичної оцінки середнього залишкового пробігу вагона залежно від зносу гальмових колодок.

Аналізуючи рис. 9 і 10, можна зробити висновки, що запропоновану модель (1) зносу колодок та отриману модель (13), з огляду на показники їх адекватності для пробігів вантажних вагонів із модернізованими пристроями з урахуванням зносу гальмової колодки, можна використовувати для розв'язання основних задач, пов'язаних як зі зносом будь-яких типів гальмових колодок вантажних вагонів, так і рухомого складу в цілому.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

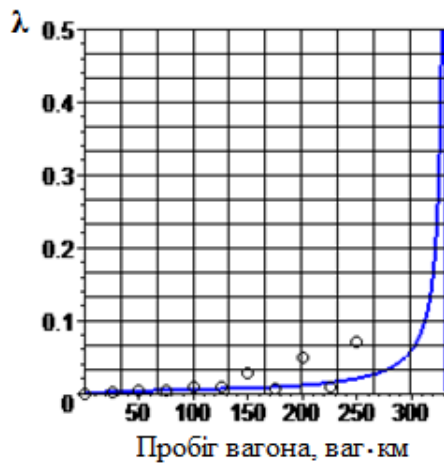
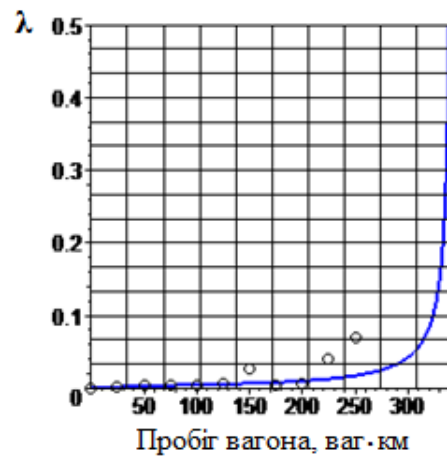
a – a*б – б*

Рис. 9. Графіки емпіричної та теоретичної оцінки інтенсивності пробігу вагона з урахуванням зносу гальмової колодки зверху (*a*) і знизу (*б*)

Fig. 9. Graphs of empirical and theoretical assessment of the intensity of the car run, taking into account the wear of the brake pad at the top (*a*) and bottom (*b*)

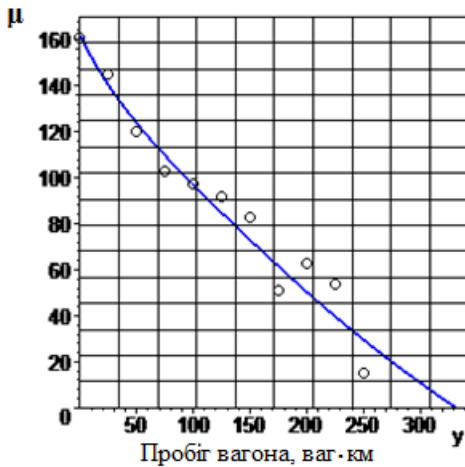
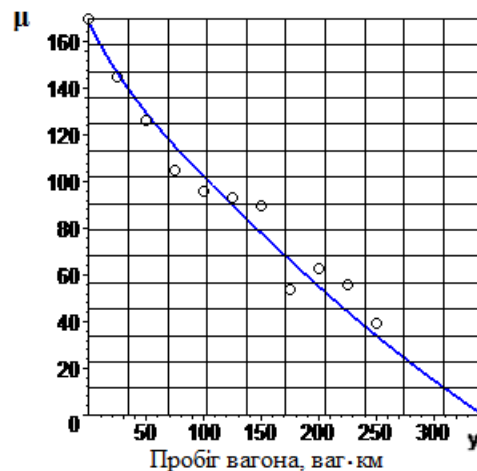
a – a*б – б*

Рис. 10. Графіки емпіричної та теоретичної оцінки середнього залишкового пробігу вагона з урахуванням зносу гальмової колодки зверху (*a*) і знизу (*б*)

Fig. 10. Graphs of empirical and theoretical estimation of average residual run of the car taking into account wear of a brake pad at the top (*a*) and bottom (*b*)

Результати

Запропонована модель (1) зносу колодок вагонів та отримані результати дозволяють розв'язувати необхідні практичні задачі. Використання ресурсних характеристик дає можливість прогнозувати основні показники експлуатації вагонів. Наведемо деякі приклади.

Виконані розрахунки показали, що верхній поріг пробігу вагона до повного зносу гальмової колодки зверху дорівнює 331,88 тис. км, а знизу – 343,04 тис. км.

За пробігу вагона 225 тис. км знос колодки зверху склав 74,91 %, а за пробігу вагона 250 тис. км знос гальмової колодки знизу склав 80,74 %.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Значення інтенсивності пробігу вагона для величини 250 тис. км за верхнього зносу гальмової колодки складе $\lambda = 0,02042$, а для нижнього зносу гальмової колодки – $\lambda = 0,01758$.

Маючи функцію розподілу $F(x) = P(X < x)$ та оцінки її параметрів, можна визначити таку характеристику, як імовірність зносу колодки в точці $x_0 - F(x_0)$ і ймовірність, коли колодка не зношується в цій точці $Q(x_0) = 1 - F(x_0)$. Так, наприклад, імовірність зносу зверху гальмових колодок складе $F(20) = 0,2681$; $F(30) = 0,4696$ і $F(40) = 0,6705$, а знизу колодок $F(20) = 0,2637$; $F(30) = 0,4655$ і $F(40) = 0,6672$.

Іншою істотною характеристикою може бути γ -відсотковий знос, який визначають за формулою $F(x_\gamma) = \gamma / 100$ %. Так, наприклад, для верхнього зносу гальмової колодки маємо, що за $\gamma = 95$ % $x_\gamma = 56,7926$, а за $\gamma = 90$ % $x_\gamma = 52,9284$. Для нижнього зносу гальмової колодки за $\gamma = 95$ % $x_\gamma = 56,8531$, а за $\gamma = 90$ % $x_\gamma = 53,0165$.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше для колодок гальмових систем вантажних вагонів із модернізованими пристроями визначено функціональну залежність їх зносу від пробігу вагонів по мережі АТ «Укрзалізниця». На підставі отриманої залежності розроблено статистичну модель зносу колодок з урахуванням можливостей їх використання до повного вичерпання ресурсу. Також знайдено функцію розподілу пробігу вантажних вагонів з урахуванням зносу колодки, за рахунок якої визначають відсоток зносу за заданого пробігу.

Результати, отримані в роботі, можна враховувати для розв'язання технічних проблем ненормативного зносу колодок у гальмових системах візків і збільшення міжремонтних періодів експлуатації вантажних вагонів.

Висновки

1. Проведено комплексні експериментальні дослідження в експлуатаційному вантажному вагонному депо Основа під час технічного об-

слуговування (ТО) вагонів у парках сортувальної станції. Упродовж кожного обігу дослідних вантажних вагонів із модернізованою ГВП було виконано вимірювання гальмових колодок за ТО в контрольних точках, починаючи з 2,1 до 197,8 тис. пробігу ваг.км. Під час обстежень гальмових колодок особливу увагу звертали на технічну справність модернізованих пристроїв рівномірного відведення колодок – стан криволінійного напрямного стрижня й зазори за всією довжиною колодки. Усі результати вимірювань занесли до задалегідь розробленої відомості, після чого вони були перенесені в комп'ютерну базу даних для досліджень можливості збільшення міжремонтних періодів експлуатації вантажних вагонів шляхом прогнозування залишкового ресурсу колодок у гальмових системах візків із модернізованими пристроями.

2. Виконано конструктивний аналіз елементів типової ГВП візка, що віддзеркалює утворення ненормативного зносу гальмових колодок вантажних вагонів. Напрацьовано передумови для її модернізації.

3. Запропоновано ймовірнісно-статистичну модель зносу гальмових колодок вагонів, проведено дослідження зносу для верху й низу гальмових колодок вантажних вагонів із модернізованими пристроями за показником товщини колодки для оцінки параметрів моделі.

4. Отримано функцію розподілу зносу верхньої та нижньої частини колодки, за допомогою якої можливе розв'язування практичних задач для різних частин гальмової колодки (імовірність зносу колодок за заданого зносу; γ -відсотковий знос колодки; λ -характеристика зносу та середній залишковий знос для відповідного значення зносу).

5. Визначено апроксимуючу залежність зносу й величини пробігів вантажних вагонів із модернізованими пристроями, також знайдено залежності величин пробігів вагонів з урахуванням повного зносу колодки.

6. Установлено, що середній залишковий знос за наявним зносом верху колодки 40 мм дорівнює 9,5118 мм, а для низу колодки – 9,5262 мм. Середній залишковий пробіг вагона за умови, що він пройшов відстань 200 тис. км до отриманого зносу у верхній частині гальмової колодки, склав $\mu = 50,39876$ тис. км,

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

а в нижній частині гальмової колодки $\mu = 55,12564$ тис. км.

7. Результати, отримані в роботі, можна брати до уваги під час розв'язання складних проблем-

них задач, які пов'язані з ненормативним зносом гальмових колодок і збільшенням міжремонтних періодів рухомого складу залізниць.

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. Коптовец 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 СНУ 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. Ловська А. О. Особливості комп'ютерного моделювання навантаженості контейнера з пружно-в'язкими зв'язками у фітінгах при експлуатаційних режимах. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій : Серія «Транспортні системи і технології».* 2019. Вип. 33. Т. 2. С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-2-3>
11. 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>
12. *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.
13. 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>
14. 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>
15. Тулузин С. В., Горский Д. В. Оценка работоспособности тормозной рычажной передачи тележки грузового вагона на различных стадиях износа колодок и колес. *Вестник ВНИИЖТ.* 2015. № 2. С. 38–44.
16. 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>
17. 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>
18. Ravlyuk V., Elyazov I., Afanasenko I., Ravliuk 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>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

19. 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>
20. 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>
21. 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>
22. Thrane C. *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London, 2019. 202 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756>
23. 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>
24. 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>
25. 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.

В. Г. РАВЛЮК¹, М. Г. РАВЛЮК², И. К. КИРИЧЕНКО³, Н. Ю. ЛАМНАУЭР⁴,
А. К. МЕЛЬНИЧУК⁵

¹Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

²Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта ravmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X

³Каф. «Физико-математические дисциплины», Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевская, 94, Харьков, Украина, 61023, тел. +38 (095) 487 02 38, эл. почта ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

⁴Каф. «Охрана труда, стандартизация и сертификация», Украинская инженерно-педагогическая академия, ул. Университетская, 16, Харьков, Украина, 61003, тел. + 38 (093) 149 39 17, эл. почта lamnaouernatali@gmail.com, ORCID 0000-0002-6779-8761

⁵Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта melnichuknastyia417@gmail.com, ORCID 0000-0003-3815-5617

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСА ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Цель. Это исследование направлено на применение линейных моделей для определения износа тормозных колодок грузовых вагонов в верхней и нижней части с целью дальнейшего их использования при решении подобных практических задач. **Методика.** В качестве рабочей методики использован известный подход контролирования линейных изменений износа параметров колодок в зависимости от пробега грузовых вагонов по сети АО «Укрзалізниця» с модернизированными тормозными рычажными передачами в реальных условиях эксплуатации. На основании полученных статистических данных в условиях эксплуатации последовательно определены значения соответствующих показателей регрессионного анализа износа колодок в конкретных точках, рекомендованных нормативными документами при выполнении технического обслуживания в эксплуатационных подразделениях вагонного хозяйства для тормозных систем грузовых вагонов. **Результаты.** Построена вероятностно-статистическая модель износа тормозных колодок на основании экспериментальных данных, собранных в соответствующих парках сортировочной станции в процессе эксплуатации грузовых вагонов. Предложена функция распределения износа для верхней и нижней части колодки, с помощью которой можно решать практические задачи. Также для различных частей тормозной колодки найдено ее γ -процентный и средний остаточный износ. **Научная новизна.** Впервые для колодок тормозных систем грузовых вагонов с модернизированными устройствами определены функциональные зависимости их износа в зависимости от пробега вагонов по сети АО «Укрзалізниця». На основании полученных зависимостей разработана статистическая модель износа колодок с учетом возможностей их использования до полного исчерпания ресурса. Также определена функция распределения пробега грузовых вагонов с учетом износа колодки, с помощью которой устанавливают процент износа при заданном пробеге.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Практическая значимость. Результаты, полученные в работе, можно учитывать для решения технических проблем ненормативного износа колодок в тормозных системах тележек и увеличения межремонтных периодов эксплуатации грузовых вагонов.

Ключевые слова: тормозная колодка; износ; тормозная рычажная передача (ТРП); грузовой вагон; анализ; модель; статистические исследования; параметр

V. H. RAVLIUK¹, M. H. RAVLIUK², I. K. KYRYCHENKO³, N. Y. LAMNAUER⁴,
A. K. MELNYCHUK⁵

¹Dep. «Cars», 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. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail ravmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X

³Dep. «Physical and Mathematical Sciences», National University of Civil Defence of Ukraine, Chernyshevskaya St., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023, tel. +38 (095) 4870238, e-mail ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

⁴Dep. «Occupational Safety, Standardization and Certification», Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Universitetska St., 16, Kharkiv, Ukraine, 61003, tel. + 38 (093) 1493917, e-mail lamnaouernatali@gmail.com, ORCID 0000-0002-6779-8761

⁵Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail melnichuknastya417@gmail.com, ORCID 0000-0003-3815-5617

PROBABILITY AND STATISTICAL MODEL OF WEARING OF BRAKE PADS OF FREIGHT CARS

Purpose. This study aims to use linear models to determine the wear of brake pads of freight cars at the top and bottom for further use in solving similar practical problems. **Methodology.** As a working technique the known approach for controlling linear wear changes of pad parameters depending on freight cars run on a network of Ukrzaliznytsia JSC with the modernized brake levers in real operating conditions is used. Based on the obtained statistical data in the operating conditions, we consistently found values of the corresponding regression analysis indicators for pad wear at specific points, which are recommended by regulatory documents when performing maintenance in operational units of car facilities for brake systems of freight cars. **Findings.** A probabilistic-statistical model of brake pad wear is constructed on the basis of experimental data collected in the respective parks of the sorting station during the operation of freight cars. The function of wear distribution for the top and bottom part of a pad by means of which the decision of practical problems is possible is offered. Also for different parts of the brake pad found its γ -percentage and average residual wear. **Originality.** For the first time for the brake pads of freight cars with modernized devices, the functional dependence of their wear depending on the run of cars on the network of Ukrzaliznytsia JSC was determined. Based on the received dependence the statistical model of pad wear taking into account possibilities of their use before full resource exhaustion is developed. The function of distribution of run of freight cars taking into account pad wear due to which the wear percent at the set run is also defined. **Practical value.** The results obtained in the work will be taken into account in the future to solve technical problems related to non-standard wear of pads in the brake systems of bogies and increase the service life of freight cars.

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

REFERENCES

1. *Analiz stanu bezpeki rukhu v strukturi AT «Ukrzaliznytsya» u 2019 rotsi.* Aktsionerne tovaristvo «Ukrainska zaliznytsya» 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 matematicheskoy obrabotki eksperimentalnykh dannykh: uchebno-metodicheskoe posobie.* Yekaterinburg: Uralskiy universitet. (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

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 ekspluatatsii 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. Lovska, A. O. (2019). Features of the computer modeling of loading of container with elastic-related connections in the fittings in operating modes. *Transport Systems and Technologies: Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 33(2), 28-37.
DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-2-3> (in Ukrainian)
11. 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)
12. Ravlyuk, V. G., & Nechvoloda, S. I. (2017). *UA Patent № 121889 Ukrainyskyi instytut intelektual noivlasnosti* (Ukrpatent). (in Ukrainian)
13. 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)
14. 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)
15. 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)
16. 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)
17. 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)
18. 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)
19. 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)
20. 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)
21. 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)
22. Thrane, C. (2019). *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London.
DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756> (in English)
23. 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)
24. 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)
25. 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: 22.05.2020

Прийнята до друку: 25.09.2020