

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.027.27-048.35

В. Г. РАВЛЮК¹, М. Г. РАВЛЮК², І. К. КИРИЧЕНКО³

¹Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

²Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X

³Каф. «Фізико-математичні дисципліни», Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023, тел. +38 (095) 4870238, ел. пошта ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

СТАТИСТИЧНЕ ОПРАЦЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗНОСУ ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Мета. Це дослідження спрямоване на статистичне опрацювання контрольованих в експлуатації геометричних параметрів зносу колодок модернізованих гальмових систем візків вантажних вагонів. **Методика.** Застосовано статистичний підхід до побудови графічної залежності зносу гальмових колодок від пробігу вагонів на основі попередньо зібраних даних щодо зносу в контрольних точках, що регламентовано вимогами планово-попереджувального ремонту (ППР). Теоретично-експлуатаційні дослідження, які стосуються зменшення ненормативного зносу гальмових колодок, виконано за методикою регресійного аналізу на підставі експериментальних даних дослідної експлуатації модернізованих пристроїв гальмових систем візків вантажних вагонів. Обґрунтовано «паліативний» підхід до вирішення цього завдання. **Результати.** Установлено, що на практиці мають місце випадки, коли колодки не забезпечують свого регламентованого пробігу, унаслідок чого їх передчасно замінюють через клинодуальний знос. А це, з точки зору економіки та безпеки їх використання, призводить до зниження гальмової ефективності в триангельних гальмових системах. Експериментально-науковими дослідженнями виявлено, що під час виконання плану вантажних перевезень до 95 % колодок вагонів, за умови використання типових пристроїв гальмування, мають шкідливий подвійний фрикційний знос, що потребує їх заміни у гарантований міжремонтний період. Під час обстеження в умовах експлуатації явищ зносу гальмових колодок для модернізованих пристроїв візків на основі регресійного аналізу виконано прогнозування їхнього залишкового ресурсу, результатом якого є використання колодок на увесь міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів. **Наукова новизна.** Уперше адаптовано для побудови регресійної залежності модель зносу колодок модернізованих пристроїв гальмових систем візків залежно від пробігу вагонів. За отриманими результатами натурного експерименту проведено обробку зібраних даних про знос колодок за відсутності нормального закону статистичного розподілу. Перевірку відповідності експериментально-теоретичних розрахунків щодо вимірювань зносу колодок оцінено за тестом Кохрена. Запропоновано «паліативний» підхід для статистичного аналізу зносу колодок в умовах експлуатації, що дає змогу спрогнозувати їхній залишковий ресурс з позиції їх використання на увесь міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів. **Практична значимість.** Результати проведених досліджень апробовано на дослідному рухомому складі з модернізованими пристроями для рівномірного зносу гальмових колодок у візках. Отримано патент на винахід, який рекомендовано до втілення під час проектування нових і модернізації наявних гальмових систем візків вантажних вагонів.

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

Вступ

За останні роки на залізничному транспорті спостерігається істотне погіршення технічного стану гальмових систем вантажних вагонів, від яких у першу чергу залежить безпека руху поїздів. Поширеною відмовою є клинодувальний знос гальмових колодок вантажних вагонів, спричинений недосконалою конструкцією важільної передачі візка, модернізацію якої не виконували багато десятиліть.

Зібрана інформація в процесі наукового дослідження про зміну геометричних параметрів гальмових колодок залежно від пробігу вантажних вагонів в умовах експлуатації підлягає ретельній обробці. За допомогою методів статистичної обробки можна уявити загальну картину про гальмові системи візків вантажних вагонів, створюючи тим самим сприятливі умови для подальшого серійного впровадження оновлених конструкцій гальмових важільних передач (ГВП) у виробництво на вагонобудівних заводах або їх модернізації на вагоноремонтних підприємствах АТ «Укрзалізниця».

У роботі [4] 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 установа величини гальмового шляху залежно від швидкості руху, ухилу рейкової колії й радіуса кривої в разі гальмування рухомого складу. Статистично встановлені критичні ухили величини гальмового шляху у випадку повного службового гальмування рухомого складу. Проте в роботі не розглянуто умови, коли зменшується гальмова площа контакту колодки з колесом за дуального зносу колодок, тому оцінювати гальмову ефективність поїзда позитивно не можна.

Під час виконаних досліджень у праці [8] було розроблено регресійну модель тертя колодок і коліс локомотивів промислового транспорту в умовах структурної невизнаності за великої кількості складності входних змінних у моделях параметрів, тобто з урахуванням значення коефіцієнта тертя. Виключити нестійкі рішення в такій багато параметричній моделі складно, хоча автор запропонував своє бачення проблеми. Однак головний параметр – знос ко-

лодок за товщиною, який у системі планово-попереджувального ремонту (ППР) обмежує застосування всіх типів гальмових колодок (із точки зору безпеки їх використання) для ідентифікації моделі не було враховано.

У проведеному дослідженні [12] 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 цьому дослідженні було використано статистичний підхід планування експериментів 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 [9]. На прикладі ненормативного зносу гальмових колодок розглянуто питання про нерівномірний знос пар тертя колодок із колесами, що належать до одного вагона, їх динамічні процеси, які описано складною моделлю. Але тут мова йшла про випадки, коли величини досліджуваних параметрів підпорядковуються нормальному закону розподілу.

Як доводить практика, ненормативний знос гальмових колодок виникає через непрофесійні дії робітників, які виконують технічне обслуговування й ремонт вантажних вагонів із порушенням нормативних технічних документів [5], тобто в деяких випадках на свій розсуд установають колодки, які були раніше зняті з вагонів. Тому їх знос, вочевидь, не може відповідати нормальному закону розподілу, та подібні дослідження [14, 15, 21–23] не мають сенсу.

Мета

Це дослідження спрямоване на статистичне опрацювання контрольованих в експлуатації геометричних параметрів зносу гальмових колодок модернізованих гальмових систем візків вантажних вагонів.

Для реалізації мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

– виконати експериментально-наукове обстеження гальмових колодок в умовах експлуа-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тації вантажних вагонів шляхом вимірювання їх зносу в контрольних точках і зібрати статистичні відомості про вимірний знос;

– обґрунтувати вигляд залежності зносу гальмових колодок за їх товщиною від пробігу вантажного вагона шляхом застосування регресійного аналізу за результатами зібраних статистичних даних;

– здійснити перевірку статистичних гіпотез щодо характеру розподілу випадкових величин зносу гальмових колодок і їх взаємозв'язок за належністю даних до однієї генеральної сукупності, за значимістю відмінностей тощо;

– розглянути підстави щодо прогнозування залишкового ресурсу гальмових колодок у модернізованих пристроях для рівномірного зносу колодок у візках на увесь гарантований міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів.

Методика

В роботі [11] досліджується явище зносу гальмових колодок вантажних вагонів залежно від їх пробігу для модернізованих пристроїв рівномірного відведення колодок й утримування їх на нормативній відстані. На рис. 1 наведено модель технічної системи (МТС) модернізованої конструкції вантажного візка з ГВП в загальному вигляді для статистичних досліджень зносу колодок.

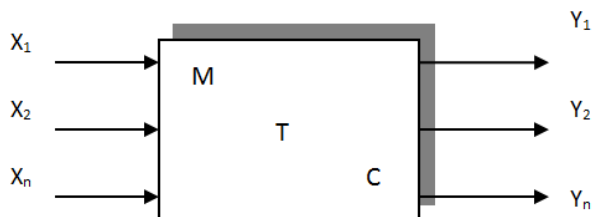


Рис. 1. Модель технічної системи

Fig. 1. Model of the technical system

Модель має такі складові: вхідний вектор $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; вектор вихідних параметрів $\vec{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ і сукупність процедур відображень досліджуваних параметрів (T). Відображення

$T: \vec{X} \rightarrow \vec{Y}$ містить усі функціональні процедури, які виконує технічна система.

У нашому завданні є два масиви вхідних і вихідних параметрів: $N = 2$ – виміри зверху X_V та знизу X_H колодок, що взаємодіють із колесами дослідних вагонів; $M = 2$ – знос верхньої Y_V чи нижньої Y_H частин колодок після пробігу L ; $i = 7$ – кількість вимірювань (у контрольній точці) для кожного дослідного вагона, які зведено до табл. 1 і 2: Y – дані експериментів, \hat{Y} – статистичні заміри зносу гальмових колодок.

Розрахунки виконано для середнього значення зносу всіх дослідних вагонів із модернізованими пристроями [17].

Як відомо зі статистичної теорії [3, 6, 13, 16], під час розгляду будь-якого завдання з використанням законів математичної статистики є два джерела інформації. Перше джерело – результати спостережень (експериментів). Причому процес спостережень може корегуватися на підставі попередніх результатів (так званий послідовний аналіз). Друге джерело – апріорна інформація про властивості досліджуваного об'єкта, тобто це накопичений на цей момент знос за визначений пробіг вагона. Цю інформацію відображають у моделі, що обрана для розгляду завдання.

Виходячи з теорії статистичних висновків [1, 3, 19], за даними табл. 1 і 2 визначаємо величину $\sum n_i / 2$, де n_i – середнє значення зносу колодок для всіх вагонів. Її значення дорівнює 60,27 для верху і 58,19 для низу колодок, тому медіанним є інтервал 24,1–74,1 із частотою, яка дорівнює 15,98 для верху і 15,22 для низу колодок.

Медіану отримуємо за формулою:

$$M_e = x_{Me} + \frac{\sum n_i / 2 - sn_{Me-1}}{n_{Me}} \cdot h, \quad (1)$$

де x_{Me} – початок медіанного інтервалу; n_{Me} – частота медіанного інтервалу; sn_{Me-1} – накопичена частота інтервалу, що передує медіанному.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Таблиця 1

Усереднені значення вимірюваного зносу у верхній частині гальмової колодки

Table 1

Averaged values of measured wear at the top of the brake pad

Інвентарний номер дослідного вагона	Послідовність зменшення товщини у верхній частині гальмових колодок U_i (мм) зі збільшенням пробігу вагона L (тис. ваг. км)						
	4,6	16,2	24,1	74,1	121,3	164,6	197,8
61138707	0,75	3,63	5,75	17,38	25,5	33,25	40,63
61139481	0,5	3,13	5,88	16	23,63	32,75	40,63
61138970	0,5	4,13	6,75	13,63	22	29,75	37,13
61139168	0,13	2,88	6,25	16	24,25	33,13	39,5
61139317	0,88	3,25	6,13	16,13	23,88	31,63	38,25
61139176	1,13	3,63	6,88	16	24,88	32,38	38,38
61139556	0,25	3,25	5,38	15,13	22,75	30,63	37,25
61139531	0,25	3	6,25	16	22,75	31,25	39,25
61140083	1,13	3,88	6,25	17,5	25	33,25	39,63
61140307	0,38	3	5,63	16	23,38	30,63	37,38
Середнє значення для всіх вагонів	0,59	3,38	6,12	15,98	23,8	31,87	38,8

Таблиця 2

Усереднені значення вимірюваного зносу в нижній частині гальмової колодки

Table 2

The average values of the measured wear at the bottom of the brake pad

Інвентарний номер дослідного вагона	Послідовність зменшення товщини в нижній частині гальмових колодок U_i (мм) зі збільшенням пробігу вагона L (тис. ваг. км)						
	4,6	16,2	24,1	74,1	121,3	164,6	197,8
61138707	0,5	3,25	5,25	13,25	20,63	29,5	36,5
61139481	0,63	3,25	6,25	15,88	23,38	31,75	39,38
61138970	0,63	4	7	14	22,38	30,25	37
61139168	0,38	3,38	6,13	15,38	23,63	31,38	38,25
61139317	0,63	3,25	5,88	14,5	22,25	29,75	36,38
61139176	0,38	2,63	6	14,75	22,25	29,75	36,5
61139556	0,63	3,13	5,88	15,38	23,13	30,88	38
61139531	0,63	2,88	5,5	18	25,88	33,25	40,5
61140083	0,38	2,5	5,13	14,88	22,75	30,63	37,5
61140307	0,88	3,13	5,88	16,13	24,13	30,75	37,25
Середнє значення для всіх вагонів	0,57	3,14	5,89	15,22	23,04	30,79	37,73

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За результатами розрахунку побудовано гістограми відносних частот (рис. 2 і 3) варіаційного ряду, тобто східчаста фігура, що складається із прямокутників, основами яких є часткові інтервали довжиною h , а висоти дорівнюють щільностям відносної частоти f_i . Площу i -го часткового прямокутника визначаємо за формулою:

$$hf_i = h \left(\frac{\omega_i}{h} \right) = \omega_i, \quad (2)$$

де ω_i – відносна частота варіантів, що потрапили в i -й інтервал. Площа гістограми відносних частот дорівнює сумі всіх відносних частот, тобто 1,0.

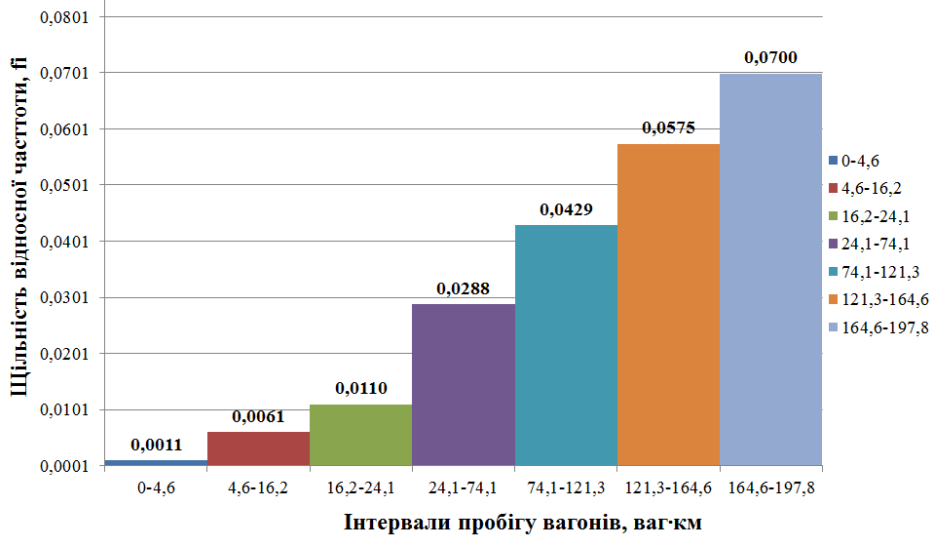


Рис. 2. Гістограма щільності розподілу середнього зносу для верху гальмових колодок залежно від пробігу дослідних вагонів

Fig. 2. Distribution density histogram of average wear for the top of the brake pads, depending on the run of the test cars

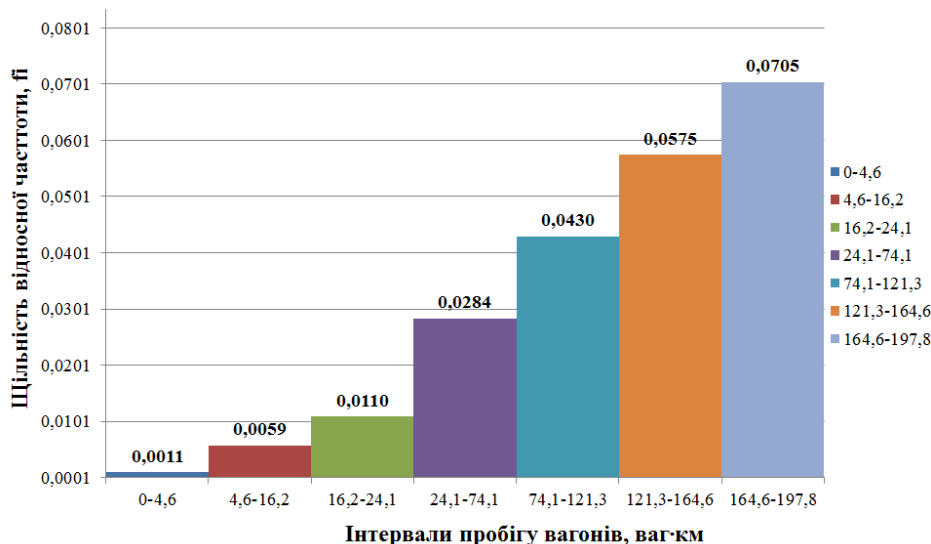


Рис. 3. Гістограма щільності розподілу середнього зносу для низу гальмових колодок залежно від пробігу дослідних вагонів

Fig. 3. Distribution density histogram of average wear for the bottom of the brake pads, depending on the run of the test cars

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Усі розрахунки виконано за допомогою зведених до табл. 3 і табл. 4. комп'ютерної програми EXCEL, а їх результати

Таблиця 3

Результати розрахунку середнього зносу для верху гальмових колодок за модернізованого пристрою

Table 3

Results of the calculation of average wear for the top of the brake pads with the upgraded device

Інтервали	a_{i-1}	a_i	x_i	n_i	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	ω_i	f_i	$s_i n_i$	$s \omega_i$
0–4,6	0	4,6	2,3	0,59	1,36	3,12	0,0049	0,0011	0,59	0,0049
4,6–16,2	4,6	16,2	10,4	3,38	35,15	365,58	0,028	0,0061	3,97	0,0329
16,2–24,1	16,2	24,1	20,2	6,12	123,62	2497,2	0,0508	0,011	10,09	0,0837
24,1–74,1	24,1	74,1	49,1	15,98	784,62	38 524,74	0,1326	0,0288	26,07	0,2163
74,1–121,3	74,1	121,3	97,7	23,8	2 325,3	227 177,9	0,1974	0,0429	49,87	0,4137
121,3–164,6	121,3	164,6	143	31,87	4 557,4	651 709,6	0,2644	0,0575	81,74	0,6781
164,6–197,8	164,6	197,8	181,2	38,8	7 030,6	1 273 937	0,3219	0,07	120,54	1
Усього				120,54	14 858	2 194 216	1			

Примітка: a_{i-1} – ліві границі пробігу вагонів; a_i – праві границі пробігу вагонів; x_i – середня величина пробігу вагонів; n_i – середнє значення зносу колодок для всіх вагонів; $x_i n_i$ – ваги статистичного розподілення; $x_i^2 n_i$ – ваги квадрата статистичного розподілення; ω_i – відносна частота; f_i – щільність відносної частоти; $s_i n_i$ – накопичені частоти; $s_i \omega_i$ – накопичені відносні частоти. Ширина інтервалу $h' = 4,6$; вибіркоче середнє арифметичне значення вибірки $x'_{cp} = 123,26$; середнє арифметичне квадратів значень вибірки $x'^2_{cp} = 18203$; вибіркоче дисперсія $D'_B = 3010,2$; вибіркоче середнє квадратичне відхилення $\sigma'_B = 54,865$; мода $M'_o = 6,283$; медіана $M'_e = 1,1332$.

Таблиця 4

Результати розрахунку середнього зносу для низу гальмових колодок за модернізованого пристрою

Table 4

Results of the calculation of the average wear for the bottom of the brake pads with the upgraded device

Інтервали	a_{i-1}	a_i	x_i	n_i	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	ω_i	f_i	$s_i n_i$	$s \omega_i$
0–4,6	0	4,6	2,3	0,57	1,31	3,02	0,0049	0,0011	0,57	0,0049
4,6–16,2	4,6	16,2	10,4	3,14	32,66	339,62	0,027	0,0059	3,71	0,0319
16,2–24,1	16,2	24,1	20,2	5,89	118,98	2 403,36	0,0506	0,011	9,6	0,0825
24,1–74,1	24,1	74,1	49,1	15,22	747,3	36 692,53	0,1308	0,0284	24,82	0,2133
74,1–121,3	74,1	121,3	97,7	23,04	2 251	219 923,5	0,198	0,043	47,86	0,4113
121,3–164,6	121,3	164,6	143	30,79	4 403	629 624,7	0,2646	0,0575	78,65	0,6759
164,6–197,8	164,6	197,8	181,2	37,73	6 836,7	1 238 806	0,3242	0,0705	116,38	1,0
Усього				116,38	14 391	2 127 792	1			

Примітка: ширина інтервалу $h'' = 4,6$; вибіркоче середнє арифметичне значення вибірки $x''_{cp} = 123,26$; середнє арифметичне квадратів значень вибірки $x''^2_{cp} = 18203$; вибіркоче дисперсія ; вибіркоче середнє квадратичне відхилення $\sigma''_B = 54,865$; мода $M''_o = 6,283$; медіана $M''_e = 1,1332$.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для характеристики властивостей статистичного розподілу розраховано емпіричну функцію розподілу за формулою:

$$F^*(x) = \frac{n_x}{n}. \quad (3)$$

Емпіричну функцію $F^*(x)$ використано для оцінки теоретичної функції розподілу генеральної сукупності. Відмінність між ними полягає в тому, що теоретична функція $F(x)$ визначає ймовірність події $X < x$, а емпірична функція $F^*(x)$ – відносну частоту цієї події.

Емпірична функція розподілу прагне до теоретичної за ймовірністю (сходиться за ймовірністю до $F^*(x)$) в разі великого обсягу вибірки:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|F^*(x) - F(x)| < \varepsilon) = 1; \quad \forall x; \quad \forall \varepsilon > 0. \quad (4)$$

За результатами розрахунку $D_B' = 3010,2$ (табл. 3 і 4) для верху і низу гальмових колодок дослідних вагонів побудовано емпіричну функцію розподілу (рис. 4 і 5).

Зараз існує досить багато різноманітних програмних продуктів, які дають можливість реалізувати на ЕОМ метод найменших квадратів (МНК). Їх застосування дуже різноманітне:

статистика, економетрія, оцінка похибок вимірювань тощо [3, 6, 7, 18, 20].

Для розуміння практичної реалізації одного з них розглянемо наше завдання – визначення та прогнозування зносу гальмових колодок вантажних вагонів із використанням МНК.

Аналіз отриманих результатів експериментів, за допомогою яких оцінюють, достовірно чи ні підібрана апроксимуюча залежність зносу колодок від пробігу вагона, обраний так, що відповідна аналітична функція в інтервалі вимірювань підпорядковується відомій теоремі Вейерштрасса. При цьому число членів поліноміального ряду визначено з реальних можливостей проведення планово-попереджувального ремонту (ППР) вагонів, хоча це й може бути причиною неузгодження за критеріями Фішера, Стьюдента та ін. Загалом близько половини фахівців статистів вважають [3, 18, 19], що з точки зору узгодженості результатів обчислень багато з критеріїв не завжди дають позитивний висновок, хоча в підсумку дослідження підтверджується практикою. Тому апроксимуючий вигляд функції до регресійного аналізу можна вибирати довільно, виходячи зі зручностей її подальшого використання. Інші фахівці, навпаки, вважають, що вигляд цієї функції слід обґрунтовувати.

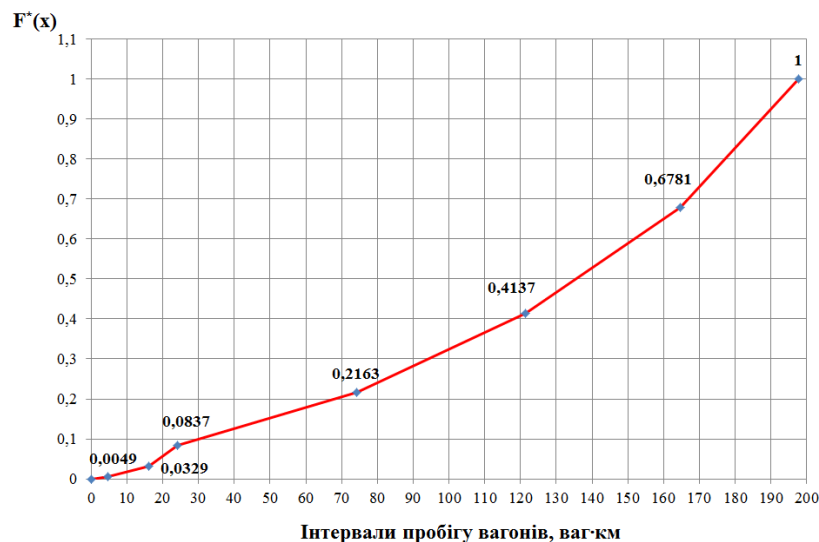


Рис. 4. Графік емпіричної функції розподілу середнього зносу для верху гальмових колодок залежно від пробігу дослідних вагонів

Fig. 4. Graph of the empirical function of the average wear distribution for the top of the brake pads, depending on the run of the test cars

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

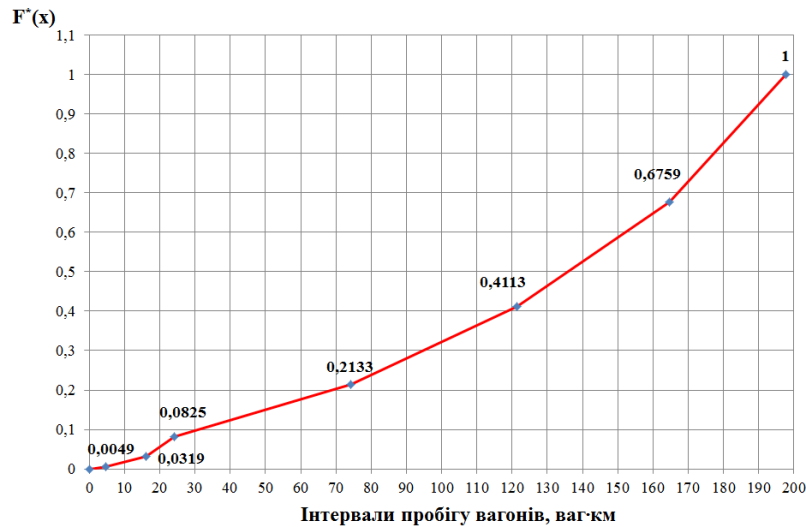


Рис. 5. Графік емпіричної функції розподілу середнього зносу для низу гальмових колодок залежно від пробігу дослідних вагонів

Fig. 5. Graph of the empirical function of the average wear distribution for the bottom of the brake pads depending on the run of the test cars

У нашому дослідженні обрано деякий поєднаний підхід до цього питання. Припустимо, після попереднього аналізу процесу, дослідженого на основі статистичних даних. Таким чином, математична модель цього процесу має вигляд:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2. \quad (5)$$

Це нелінійна модель другого ступеня. У значній кількості випадків вибору типу моделей апроксимації процесів гальмування вагонів має місце отримання достовірної залежності зносу колодок від пробігу, що відповідає лінійній моделі регресійного аналізу [3, 20], яка задовільно описує процес досліджуваного зносу колодок під час гальмування. Тому зведемо вираз (5) до лінійності. Для цього візьмемо $x_1 = x$ і $x_2 = x^2$. У результаті отримаємо лінійну модель (для лінійних моделей існують потужні алгебраїчні засоби щодо їх дослідження), яка матиме вигляд:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2. \quad (6)$$

Між розрахованими за моделлю значеннями \hat{y} й експериментальними розрахунками \hat{y}_i будуть спостерігатися відхилення. Позначимо їх як

$$\hat{u}_i = y_i - \hat{y}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Далі будемо називати їх залишками. Вони включають вплив неврахованих факторів – змінних, випадкових перешкод, помилок спостереження тощо. Їхні значення можуть змінюватися від одного спостереження до іншого.

Метод найменших квадратів дає змогу знайти такі значення (оцінки) b_0, b_1, b_2 вихідних параметрів $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ моделі, для якої (це пов'язано з тим, що необхідний критерій для підбору коефіцієнтів моделі повинен враховувати ту обставину, за якої одержана функція регресії), якщо її представити на графіку, вони будуть якомога ближче проходити між експериментально отриманими змінними:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

У подальшому таку модель будемо записувати у вигляді:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2. \quad (9)$$

Беручи частинні похідні за значеннями b_0, b_1, b_2 і прирівнюючи їх до нуля, одержимо систему з трьох рівнянь із трьома невідомими b_0, b_1, b_2 , розв'язком якої і є визначені значення оцінок. У нашому випадку, оскільки

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$U = \sum_{i=1}^n U_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2})^2 \Rightarrow . (10)$$

одержимо:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2}) = 0, \\ \frac{\partial U}{\partial b_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2}) x_{i1} = 0, \\ \frac{\partial U}{\partial b_2} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2}) x_{i2} = 0. \end{cases} (11)$$

Із наведеної вище системи отримуємо таку систему алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} b_0 n + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i2} = \sum_{i=1}^n y_i, \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{i2} = \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i, \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_{i2} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{i2} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{i2}^2 = \sum_{i=1}^n x_{i2} y_i. \end{cases} (12)$$

Розв'язуючи дану систему рівнянь, знаходимо невідомі коефіцієнти b_0, b_1, b_2 :

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)(y_i - \hat{y}) \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2}{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2) \right)^2} - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(y_i - \hat{y}) \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2)}{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2) \right)^2}. (13)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(y_i - \hat{y}) \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2}{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2) \right)^2} - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)(y_i - \hat{y}) \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2)}{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2) \right)^2}. (14)$$

$$b_0 = \hat{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2. (15)$$

Підставивши їх значення в загальний вигляд регресії, отримуємо так звану лінію регресії з коефіцієнтами b_1 і b_2 , які називаються коефіцієнтами регресії \hat{y} за x_1 і \hat{y} за x_2 відповідно.

Знайдена точка (b_0, b_1, b_2) є точкою, яка задовольняє згаданій умові. Але в математичному аналізі є теорема, яка дає змогу визначити достатні умови екстремуму функції, у нашому випадку – мінімум функції $U(b_0, b_1, b_2)$.

На рис. 6 і 7 наведено графіки лінійної регресії, побудовані за результатами обробки

експериментальних даних (табл. 5 і 6), які дають можливість спрогнозувати залишковий ресурс гальмових колодок за їх граничної товщини 10 мм [5] для модернізованих пристроїв у випадку їх використання на увесь міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів. За умови встановлення таких пристроїв середній пробіг вантажного вагона в разі рівномірного зносу гальмових колодок може досягти 284 тис. км.

Із графіків лінійної регресії (рис. 6 і 7) видно, що замінювати гальмову колодку за можливості використання модернізованих пристроїв для рівномірного відведення колодок не потрі-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

бно у міжремонтний період експлуатації вагона. Комбінований критерій у дослідженнях підтверджує, що пробіг вантажних вагонів, які ремонтують за нормативною періодичністю, піс-

ля останнього деповського ремонту повинен бути 110 тис. км, а для останнього капітального – 160 тис. км [2].

Таблиця 5

Результати розрахунку середнього зносу для верху гальмових колодок модернізованого пристрою

Table 5

Results of the calculation of average wear for the top of the brake pads of the upgraded device

x	\hat{y}	x^2	$x\hat{y}$	$y_{\text{лін}}$	$d_{\text{відх}}$	d^2
0	0	0	0	0,46936	-0,4694	0,22029
4,6	0,59	21,16	2,714	1,3607	-0,7707	0,59397
16,2	3,38	262,44	54,756	3,60843	-0,2284	0,05218
24,1	6,12	580,81	147,492	5,13921	0,98079	0,96195
74,1	15,98	5490,81	1184,12	14,8277	1,15229	1,32777
121,3	23,8	14713,7	2886,94	23,9737	-0,1737	0,03016
164,6	31,87	27093,2	5245,8	32,3639	-0,4939	0,24393
197,8	38,8	39124,8	7674,64	38,7971	0,00295	8,7E-06
602,7	120,54	87287	17196	–	–	3,4303

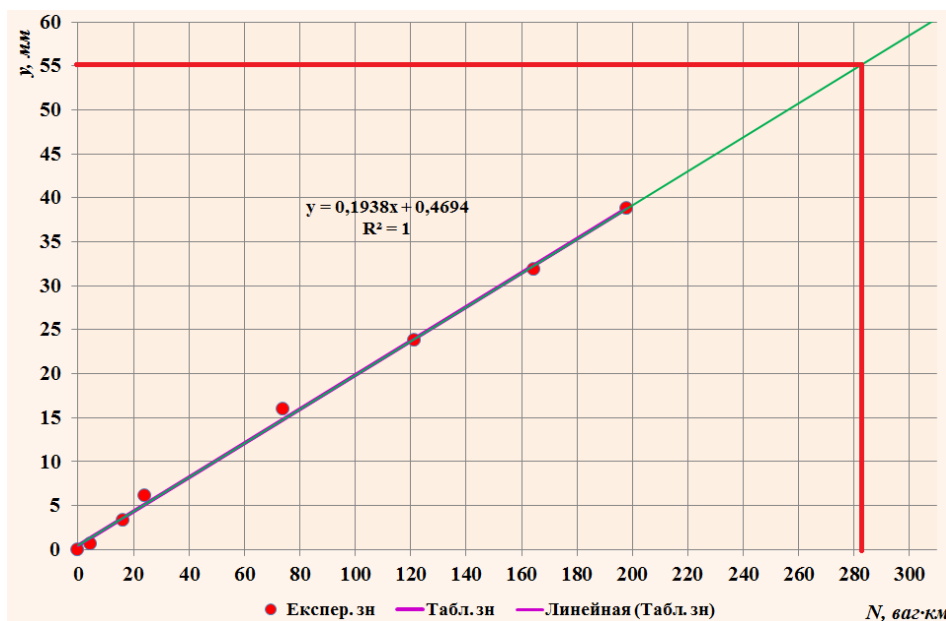


Рис. 6. Графік лінійної регресії з прогнозом подовження ресурсу гальмових колодок залежно від їх середнього зносу зверху з урахуванням пробігу дослідних вагонів

Fig. 6. The graph of linear regression with the prediction of the service life extension of the brake pads, depending on their average wear at the top, taking into account the run of the test car

Таблиця 6

Результати розрахунку середнього зносу для низу гальмових колодок за модернізованого пристрою

Table 6

Results of the calculation of the average wear for the bottom of the brake pads with the upgraded device

x	\hat{y}	x^2	$x\hat{y}$	$U_{\text{лін}}$	$d_{\text{відх}}$	d^2
0	0	0	0	0,37035	-0,3704	0,13716
4,6	0,57	21,16	2,622	1,23599	-0,666	0,44354
16,2	3,14	262,44	50,868	3,4189	-0,2789	0,07778
24,1	5,89	580,81	141,949	4,90553	0,98447	0,96917
74,1	15,22	5490,81	1127,8	14,3146	0,90538	0,8197
121,3	23,04	14713,7	2794,75	23,1968	-0,1568	0,02459
164,6	30,79	27093,2	5068,03	31,3451	-0,5551	0,30811
197,8	37,73	39124,8	7462,99	37,5927	0,13728	0,01885
602,7	116,38	87287	16649	–	–	2,7989

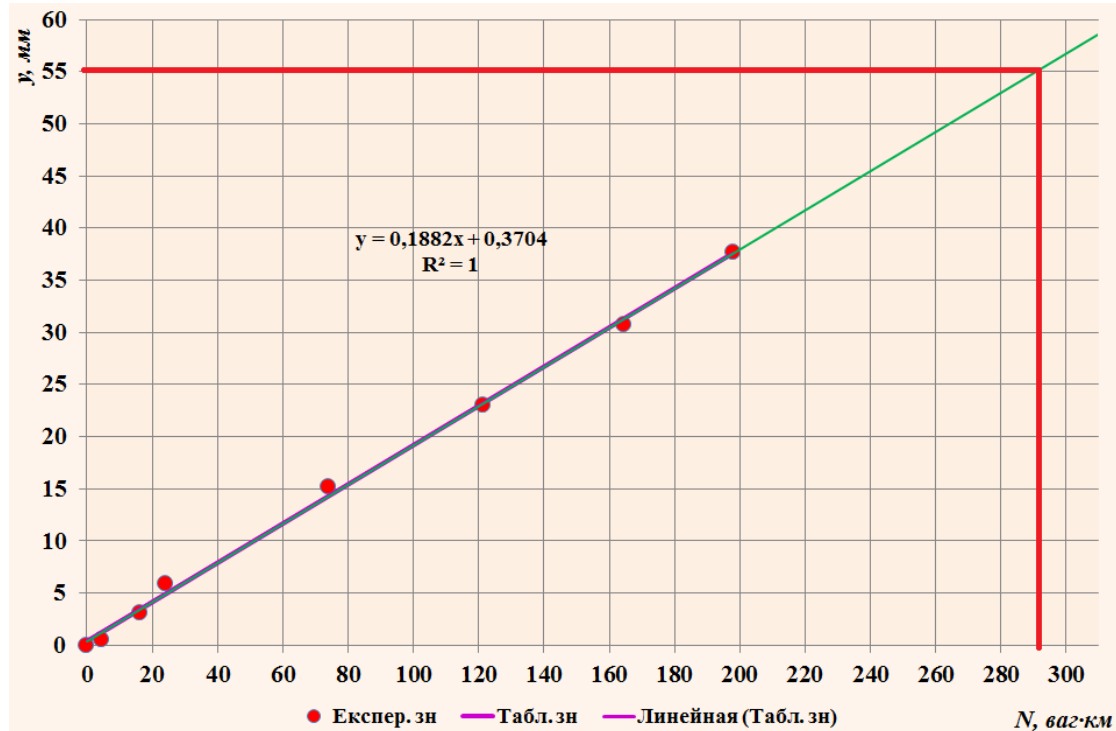


Рис. 7. Графік лінійної регресії з прогнозом подовження ресурсу гальмових колодок залежно від їх середнього зносу знизу з урахуванням пробігу дослідних вагонів

Fig. 7. Graph of linear regression with prediction of service life extension of brake pads depending on their average wear at the bottom, taking into account the run of the test cars

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Схожу методику застосовують у випадку знаходження m коефіцієнтів регресії $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$.

Щоб оцінити щільність зв'язку між x та y , використовують коефіцієнт кореляції та коефіцієнт детермінації, які показують, наскільки варіація змінної x пояснює варіацію y . Щоб оцінити, наскільки добре лінія регресії пояснює зв'язок між x та y , використовують стандартну помилку залишків, яка показує відхилення емпіричних значень від лінії регресії.

Для побудови регресійної моделі перевіряють гіпотезу про її адекватність. Для цього можна використовувати F -критерій Фішера [10, 19, 20]. Під час оцінки параметрів регресії перевіряють гіпотези, чи статистично значимі вони, чи відрізняються від нуля. Для цього варто застосовувати t -тест Стюдента. Побудовану регресійну модель можна використовувати для прогнозування величини результативної ознаки y за заданого значення факторної ознаки x , при цьому бажано будувати інтервал довіри для прогнозу.

F -критерій Фішера для перевірки моделі на відповідність критерію з достатньою точністю визначаємо за виразом:

$$F_{1,n-2} = \frac{(n-2) \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}. \quad (16)$$

Спостережуване значення t -критерію Стюдента для перевірки значущості коефіцієнта кореляції визначаємо за виразом:

$$t_{n-2} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}. \quad (17)$$

Спостережуване значення t -критерію Стюдента для перевірки гіпотези:

$$H_0: b_i = \beta_i \quad (H_1: b_i \neq \beta_i): \quad t_{n-2} = \frac{b_i - \beta_i}{\hat{\sigma}_{b_i}}, \quad i = 0, 1.$$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{b_0} &= \hat{\sigma}_\varepsilon \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \\ \hat{\sigma}_{b_1} &= \frac{\hat{\sigma}_\varepsilon}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \\ \hat{\sigma}_\varepsilon^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Спостережуване значення t -критерію Стюдента для перевірки гіпотези:

$$H_0: b_i = 0 \quad (H_1: b_i \neq 0) \quad t_{n-2} = \frac{b_i}{\hat{\sigma}_{b_i}}.$$

Якщо пряму лінію розташувати так, щоб точки приблизно однаково знаходилися по обидва боки від неї, тоді параметри лінійного рівняння можна визначити достатньо просто.

Для визначення параметрів рівняння вигляду $\bar{y} = kx + b$ найчастіше використовують МНК. При цьому обов'язковою є умова, щоб сума квадратів відхилень (відстаней) усіх досліджених точок від ординат, обчислених за рівнянням прямої ε_i , була мінімальною. Інакше кажучи, пряма повинна проходити якомога ближче до вершин емпіричної лінії регресії. Це означає, що параметри k і b рівняння регресії треба визначити з виразу:

$$\varepsilon_i = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i) = \min, \quad (19)$$

де y_i – ординати досліджуваних точок; \tilde{y}_i – ординати розрахункових точок, визначені за рівнянням регресії $\bar{y} = kx_i + b$ таким чином:

$$\varepsilon_i = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx + b)]^2 = F(k, b) \min. \quad (20)$$

Необхідною умовою екстремуму цієї функції є рівність нулю частинних похідних, узятих за параметрами k і b :

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\frac{\partial F}{\partial k} = 0 \text{ і } \frac{\partial F}{\partial b} = 0, [F(u)]' = F_u(u) * u'. \quad (21)$$

Звідси:

$$\frac{\partial F}{\partial k} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)] x_i = 0, \quad (22)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)] = 0.$$

Спростивши ці вирази, отримаємо систему лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i x_i &= k \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i, \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i &= k \sum_{i=1}^n x_i + bn. \end{aligned} \quad (23)$$

Підставивши в систему чисельні значення відповідних величин, знайдемо параметри k і b .

Залишаючи поза увагою чисельні перевірки за критеріями Стьюдента та ін., які в цій задачі не можуть дати позитивні висновки, здійснимо аналогічні обчислення з використанням критерію якості Кохрена, однак при цьому збільшило число точок вимірювань до 53. Результати розрахунків описані нижче без зведення їх до таблиці.

Згідно з критерієм Кохрена, для перевірки відповідності нульової гіпотези візьмемо відношення максимально виправленої дисперсії до суми всіх виправлених дисперсій:

$$\begin{aligned} G_{\text{набл}} &= \frac{S_{\text{max}}^2}{S_1^2 + S_2^2} = \\ &= \frac{116,65}{116,65 + 109,66} = 0,5154. \end{aligned} \quad (24)$$

Розподілення цієї випадкової величини залежить від числа ступенів вільності $k = n - 1 = 52$, де n – обсяг вибірки, що дорівнює 53.

Знаходимо за таблицею додатка [3], за рівнем значущості 0,05, число ступенів вільності 52 і значення вибірки $l = 2$ (знос зверху і знизу) критичну точку $G_{\text{крит}}(0,05; 52; 2) = 0,6543$.

Оскільки $G_{\text{крит}} > G_{\text{набл}}$ і різниця між ними не значна, немає підстав відкидати нульову гіпотезу. Тому за умовою однорідності дисперсій остаточно встановлюємо генеральну дисперсію:

$$D(x) = \frac{1}{2}(S_1^2 + S_2^2). \quad (25)$$

Таким чином, виправлені дисперсії практично рівні – $S_1^2 \approx S_2^2$.

Оскільки дані в завданні вибірки зносу гальмових колодок зверху і знизу однакового обсягу, розглянемо порівняння двох середніх нормальних генеральних сукупностей [3, 20]. Введемо позначення $d_i = (X_1)_i - (X_2)_i$, тоді виправлене середнє квадратичне відхилення буде дорівнювати:

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum d_i^2 - \frac{[\sum d_i]^2}{n}}{n-1}} = 0,342598. \quad (26)$$

Для того, щоб для заданого рівня значущості $\alpha = 0,05$ перевірити нульову гіпотезу, потрібно визначити значення критерію, що спостерігається:

$$T_{\text{набл}} = \frac{\bar{d} \cdot \sqrt{n}}{s_d} = 13,90331, \quad (27)$$

де $\bar{d} = \sum d_i / n$ – середня різниця.

За критичних точок розподілення, заданого рівня значущості $\alpha = 0,05$ і числа ступенів вільності $k = n - 1 = 52$ знаходимо значення критичної точки $t_{\text{двост. кр}} = 2,01$. Якщо $|T_{\text{набл}}| > t_{\text{двост. кр}}$, тоді отримані результати є підтвердженням того, що в середньому знос гальмових колодок зверху і знизу має різні значення.

Результати

Установлено, що на практиці мають місце випадки, коли колодки не забезпечують свого регламентованого пробігу, унаслідок чого їх передчасно замінюють через клинодуальний знос. А це з точки зору економіки та безпеки їх використання призводить до зниження гальмо-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вої ефективності в триангельних гальмових системах. Експериментально-науковими дослідженнями встановлено, що в разі виконання плану вантажних перевезень до 95 % колодок вагонів, за умови використання типових пристроїв гальмування, мають шкідливий подвійний фрикційний знос, що потребує їх заміни в гарантований міжремонтний період. Шляхом обстеження в умовах експлуатації явищ зносу гальмових колодок для модернізованих пристроїв візків на основі регресійного аналізу виконано прогнозування залишкового ресурсу колодок, результатом якого є їх використання на увесь міжремонтний період вантажних вагонів.

За результатом розрахунків доведено, що неоднорідність дисперсії тут не залежить від кількісного показника вибірки цього експерименту. Ураховуючи, що в критерій Кохрена входить поняття числа ступенів вільності $k = n - 1$, де n – обсяг вибірки, встановлюємо, що залежність від n існує, але вона незначна. Крім того, згідно з тестом Кохрена, для рівних обсягів вибірки n маємо $G_{крит} > G$. Тому підстав відкидати нульові гіпотези немає. За умови однорідності дисперсій остаточно маємо практично рівні виправлені дисперсії: $S_1^2 \approx S_2^2$.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше адаптовано для побудови регресійної залежності модель зносу колодок модернізованих пристроїв гальмових систем візків залежно від пробігу вагонів. За отриманими результатами натурного експерименту проведено обробку зібраних даних про знос колодок за відсутності нормального закону статистичного розподілу. Перевірку відповідності експериментально-теоретичних розрахунків щодо вимірювань зносу колодок оцінено за тестом Кохрена. Запропоновано «паліативний» підхід для статистичного аналізу зносу колодок в умовах експлуатації, що дає змогу спрогнозувати їхній залишковий ресурс з позиції їх використання на увесь міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів.

Результати проведених досліджень апробовано на дослідному рухомому складі з модернізованими пристроями для рівномірного зносу

гальмових колодок у візках. Отримано патент на винахід, який рекомендовано до втілення під час проектування нових і модернізації наявних гальмових систем візків вантажних вагонів.

Висновки

1. В умовах експлуатації вантажних вагонів здійснено обстеження гальмових колодок модернізованих пристроїв гальмових систем візків вантажних вагонів шляхом вимірювання їх зносу в контрольних точках.

2. Теоретично обґрунтовано графічну залежність лінійного вигляду зносу гальмових колодок за товщиною залежно від пробігу вантажного вагона шляхом застосування регресійного аналізу для дослідження поведінки зібраних статистичних даних.

3. Здійснено перевірку статистичних гіпотез відповідно до характеру розподілу випадкових величин зносу гальмових колодок і їх взаємозв'язку щодо належності даних до однієї генеральної сукупності. Побудовані регресійні моделі були перевірені на адекватність за гіпотезою F–критерію Фішера. Так само під час оцінювання параметрів регресії були перевірені гіпотези на їх статистичну значимість за t–критерієм Стьюдента.

4. Виконано перевірку відповідності експериментально-теоретичних розрахунків за критерієм Кохрена й отримано підтвердження, що в середньому знос гальмових колодок зверху і знизу має різні значення.

5. Створено графічні залежності на основі регресійного аналізу зносу гальмових колодок, які дають можливість спрогнозувати їхній залишковий ресурс за умови використання модернізованих пристроїв на увесь гарантований вагоноремонтним підприємством і нормативно-технічними документами міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів.

6. Теоретично визначено, що за умови встановлення на вантажні вагони модернізованих пристроїв середній пробіг вагона за рівномірного зносу гальмових колодок може досягати 280 тис. км.

7. Результати, отримані в роботі, будуть на майбутнє враховувати для розв'язання проблемних завдань щодо ненормативного зносу колодок у гальмових системах візків вантажних вагонів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакарджієв 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.
2. *Вагони вантажні. Система технічного обслуговування та ремонту за технічним станом: СТП 04 – 010:2018* [Чинний від 2019-08-08 № 519-Ц]. Київ, 2018. 25 с.
3. Гребенникова И. В. *Методы математической обработки экспериментальных данных: учебно-метод. пособие*. Екатеринбург : Уральский университет. 2015. 124 с.
4. 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.
5. *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.
6. Камкіна Л. В., Надточій А. А., Гришин А. М., Стогній Ю. Д. *Основи наукових досліджень: навчальний посібник (російською мовою)*. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2013. 89 с.
7. Карпычев В. А., Никитин Г. Б., Андреев П. А. К вопросу оценки и контроля тормозных нажатий колодок на колеса в зависимости от положений рычагов при регулировке рычажной передачи тележки 18-100. *Вестник ВНИИЖТ*. 2013. № 5. С. 43–47.
8. Коптовец А. Н. Идентификация состояния тормоза шахтных локомотивов в условиях структурной неопределенности. *Геотехническая механика*. 2014. № 119. С. 241–246.
9. 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.
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. *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.
12. 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>
13. Шпачук В. П., Пушня В. О., Рубаненко О. І., Гарбуз А. О. *Теоретична механіка. Динаміка* : консп. лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. 222 с.
14. 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>
15. Fomin O., Lovska A., Masliyev V., Tsybaliuk A., Burlutski O. Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from roundpipes when transported by a railroad ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1. Iss. 1 (97). P. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282>
16. Leng L., Zhu W. Compound Regression and Constrained Regression: Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician Journal*. Vol. 134. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734>
17. Ravlyuk V., Ravlyuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026>
18. 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>
19. Sarma K. V. S., Vardhan R. V. *Vishnu. Multivariate Statistics Made Simple. A Practical Approach*. New York, 2018. 258 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429465185>
20. Thrane C. *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London, 2019. 202 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

21. 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>.
22. 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>
23. 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. DOI: <https://doi.org/10.9790/1684-1503031723>

В. Г. РАВЛЮК¹, М. Г. РАВЛЮК², І. К. КИРИЧЕНКО³

¹Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта gavvg@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 gavmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X

³Каф. «Физико-математические дисциплины», Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевская, 94, Харьков, Украина, 61023, тел. +38 (095) 4870238, эл. почта ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПАРАМЕТРОВ ИЗНОСА ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Цель. Это исследование направлено на статистическую обработку контролируемых в эксплуатации геометрических параметров износа колодок модернизированных тормозных систем тележек грузовых вагонов.

Методика. Применен статистический подход к построению графической зависимости износа тормозных колодок от пробега вагонов на основе предварительно собранных данных износа в контрольных точках, что регламентировано требованиями планово-предупредительного ремонта (ППР). Теоретико-эксплуатационные исследования, касающиеся уменьшения ненормативного износа тормозных колодок, выполнены по методике регрессионного анализа на основании экспериментальных данных опытной эксплуатации модернизированных устройств тормозных систем тележек грузовых вагонов. Обосновано «паллиативный» подход к решению этой задачи. **Результаты.** Установлено, что на практике имеют место случаи, когда колодки не обеспечивают своего регламентированного пробега, вследствие чего их преждевременно заменяют по причине клинодуального износа. А это, с точки зрения экономики и безопасности их использования, приводит к снижению тормозной эффективности в триангельных тормозных системах. Экспериментально-научными исследованиями выявлено, что при выполнении плана грузовых перевозок до 95% колодок вагонов, при использовании типовых устройств торможения, имеют вредный двойной фрикционный износ, что требует их замены в гарантированный межремонтный период. При обследовании в условиях эксплуатации явлений износа тормозных колодок для модернизированных устройств тележек на основе регрессионного анализа выполнено прогнозирование их остаточного ресурса, результатом которого является использование колодок на весь межремонтный период эксплуатации грузовых вагонов. **Научная новизна.** Впервые адаптировано для построения регрессионной зависимости модель износа тормозных модернизированных устройств тормозных систем тележек в зависимости от пробега вагонов. По полученным результатам натурального эксперимента проведена обработка собранных данных об износе колодок при отсутствии нормального закона статистического распределения. Проверку соответствия экспериментально-теоретических расчетов по измерениям износа колодок оценено по тесту Кохрена. Предложено «паллиативный» подход для статистического анализа износа колодок в условиях эксплуатации, что позволяет спрогнозировать их остаточный ресурс с позиции их использования на весь межремонтный период эксплуатации грузовых вагонов. **Практическая значимость.** Результаты проведенных исследований апробированы на опытном подвижном составе с модернизированными устройствами для равномерного износа тормозных колодок в тележках. Получен патент на изобретение, рекомендованный к воплощению при проектировании новых и модернизации существующих тормозных систем тележек грузовых вагонов.

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

V. G. RAVLYUK¹, M. G. RAVLIUK², I. K. KIRICHENKO³¹Dep. «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 0000-0003-4818-9482²Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail ravmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X³Dep. «Physical and Mathematical Sciences», National University of Civil Defence of Ukraine, Chernyshevskoho St., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023, tel. +38 (095) 4870238, e-mail ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

STATISTICAL PROCESSING OF BRAKE PADS WEAR PARAMETERS OF FREIGHT CARS

Purpose. This study is aimed at the statistical processing of the geometric parameters of pad wear of the modernized brake systems of freight cars' bogies. **Methodology.** A statistical approach to the construction of the graphical dependence of the brake pad wear on the car run was applied based on the previously collected wear data at checkpoints, which is regulated by the requirements of routine preventive repair. In this sense, theoretical and operational studies concerning the reduction of the non-standard wear of the brake pads were performed according to the regression analysis method based on the experimental data of the experimental operation of the upgraded devices of the brake systems of freight car bogies. The palliative approach to solution of this task is substantiated. **Findings.** It has been established that in practice there are cases when the pads do not provide their regulated run, as a result of which they are replaced prematurely for reasons of wedge-shaped wear. From the point of view of the economy and safety of their use, it leads to a decrease in brake efficiency in triangular brake systems. Experimental and scientific studies have found that when performing freight transportations plan, up to 95% of the car brake pads at standard braking devices have harmful double friction wear. This requires pads replacement in the warranty inter-repair period. It is established that during the inspection in the conditions of operation of brake shoe wear phenomena for the upgraded bogie devices based on the regression analysis, the prediction of the residual life of the pads was performed, the result of which is their use for the whole inter-repair period of freight cars. **Originality.** For the first time, the model of brake pad wear for upgraded devices of the bogie brake systems, depending on the car run, is adapted to build the regression dependence. Based on the results of the full-scale experiment, processing of the collected data on the pads wear in the absence of a normal law of statistical distribution was performed. Correspondence check of experimental and theoretical calculations according to the measurements of the pads wear was evaluated by Kochran's test. A «palliative» approach is proposed for statistical analysis regarding the wear of pads in the operating conditions, allowing to predict the residual life of the brake pads for their use for the whole inter-repair period of freight wagons operation. **Practical value.** The results of the studies were tested on experimental rolling stock with upgraded devices for uniform wear of brake pads in the bogies. A patent for an invention was obtained, which is recommended for implementation during the design of new and modernization of the existing brake systems for freight car bogies.

Keywords: brake pad; wear; brake rigging; car; analysis; model; statistical studies; sampling

REFERENCES

1. 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)
2. *Vahonyvantazhni. Systema tekhnichnohoo bsluhovuvannia ta remontu zatekhnich nymstanom: STP 04 – 010:2018, № 519-Ts.* (2018). Kyiv. (in Ukrainian)
3. Grebennikova, I. V. (2015). *Metody matematiches koyobra botkiekspers imentalny khdannyykh: uchebno-metodicheskoe posobie.* Yekaterinburg: Uralski yuniversitet. (in Russian)
4. 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)
5. *Instruktsiia z ekspluatatsi ihalmruk homohos kladun azaliznytsiakh Ukrainy: TsT-TsV-TsL-0015, No. 264-Ts.* (2004). Kyiv. (in Ukrainian)
6. Kamkina, L. V., Nadtochii, A. A., Hryshyn, A. M., & Stohnii, Yu. D. (2013). *Osnovy naukovykh doslidzhen: navchalnyi posibnyk.* Dnipropetrovsk: NMetAU. (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. Karpichev, V. A., Nikitin, G. B., & Andreyev, P. A. (2013). Assessment and Control of Pressure Exerted by Brake Shoes on Wheels as Dependent on the Brake Beams Adjusted Position of the 18-100 Bogie. *Vestnik VNIIZHT*, 5, 43-47. (in Russian)
8. Koptovec, A. N. (2014). Identification of mine locomotive brake state in terms of structural uncertainty. *Geo-Technical Mechanics*, 119, 241-246. (in Russian)
9. Koropets, P. A., Chernikov, V. D., & Kostiukevych, A. I. (2010). Pro neriv nomirnyi znosruk homy khfryktsi-nykh par. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 5(147), 41-45. (in Ukrainian)
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. Ravlyuk, V. G., & Nechvoloda, S. I. (2017). *UA Patent № 121889 Ukrainskiyi instytut intelektual noivlasnosti* (Ukrpatent)
12. Ravlyuk, V. G. (2019). Investigation of features of dual wear of pads in brake system of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(80), 11-126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114> (in Ukrainian)
13. Shpachuk, V. P., Pushnia, V. O., Rubanenko, O. I., & Harbuz, A. O. (2016). *Teoretychna mekhanika. Dynamika: Konspektlekcij*. Kharkiv: KhNUMGhim. O. M. Beketova. (in Ukrainian)
14. 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)
15. Fomin, O., Lovska, A., Masliyev, V., Tsymbaliuk, A., & Burlutski, O. (2019). Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(97)), 33-40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282> (in English)
16. Leng, L., & Zhu, W. (2019). Compound Regression and Constrained Regression: Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician*, 134, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734> (in English)
17. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Hrebenuk, V., & Bondarenko, V. (2019). Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026> (in English)
18. 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)
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. Thrane, C. (2019). *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756> (in English)
21. 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)
22. 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)
23. 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. DOI: <https://doi.org/10.9790/1684-1503031723> (in English)

Надійшла до редколегії: 25.11.2019

Прийнята до друку: 26.03.2020