

УДК 001.891.5:629.4-592

Водянніков Ю.Я.

Яланський М. І.

Макєєва О.Г.

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ГАЛЬМІВНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Отримані аналітичні залежності розрахункового коефіцієнта сили натиснення колодок у залежності від величини гальмівного шляху. Запропоновано методику визначення гальмівних характеристик з урахуванням невизначеності вимірювання при довірчій імовірності 0,95. Як критерій для оцінки гальмівної системи дослідного вагона пропонується приймати розподіли імовірності ушкодження колісних пар в експлуатації.

При проектуванні гальмівної системи необхідно вирішити два взаємовиключні завдання: з однієї сторони забезпечити необхідну ефективність гальмівної системи, а з іншого боку - забезпечити відсутність юзових ситуацій у всьому діапазоні швидкостей руху. Підвищення гальмівної ефективності вимагає збільшення натиснення гальмівних колодок на колеса, а недопущення юза - зниження натиснення колодок на колеса для того, щоб реалізованою гальмівною системою коефіцієнт зчеплення не перевищив допустимого, по юзовій ситуації, коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою.

Імовірність появи юза збільшується при складних погодних умовах - туман, дощ, сніг, іній та інші. Рекомендується, відповідно до нормативної документації, мати запас по юзу: для пасажирських вагонів не менше ніж 15 %, а для вантажних - не менше ніж 10 %.

Основним показником гальмівної ефективності вагонів з композиційними колодками є розрахунковий коефіцієнт сили натиснення колодок на колесо, а його критерієм - мінімально допустиме значення, установлене нормативною документацією залежно від типу й ступеня завантаження вагона.

Найбільш достовірна та об'єктивна інформація про гальмівну ефективність вагонів може бути отримана в результаті поїзних гальмівних випробувань, які, на відміну від стаціонарних випробувань, враховують фрикційні властивості гальмівних колодок. Як правило, поїзні випробування нових конструкцій вагонів проводяться методом „кидання” на прямій ділянці шляху при сприятливих погодних умовах, у світлий час доби. Проте, незважаючи на позитивні результати, як розрахункових досліджень по перевірці на недопущення юза, так і поїзних гальмівних випробувань, повзуни на поверхні кочення колісних пар є одним з основних видів ушкоджень в експлуатації, особливо високий відсоток таких ушкоджень має місце для вантажних вагонів. Обстеження вагонних коліс вантажних вагонів, що надходять у ремонт на вагоноремонтні підприємства, дозволили одержати теоретичний розподіл імовірності появи повзунів у залежності від строку експлуатації (рис.1).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Очевидно, однією з основних проблем при аналізі й інтерпретації результатів поїзних гальмівних випробувань є оцінка результатів на можливість пошкоджувальності колісних пар при гальмуванні.

Для вирішення поставленої проблеми, пропонується на першому етапі оцінювати гальмівні характеристики з урахуванням невизначеності вимірювань.

При проведенні ходових гальмівних випробувань вимірюваними характеристиками гальмівної системи вагона мають бути:

- тиск у гальмівних циліндрах;
- вихід штока гальмівного циліндра;
- швидкість на початку гальмування;
- гальмівний шлях.

Розрахунковий коефіцієнт сили натиснення гальмівних колодок на колеса при композиційних або чавунних колодках визначається виходячи з величини гальмівного шляху вагона, перерахованого на поїзд.

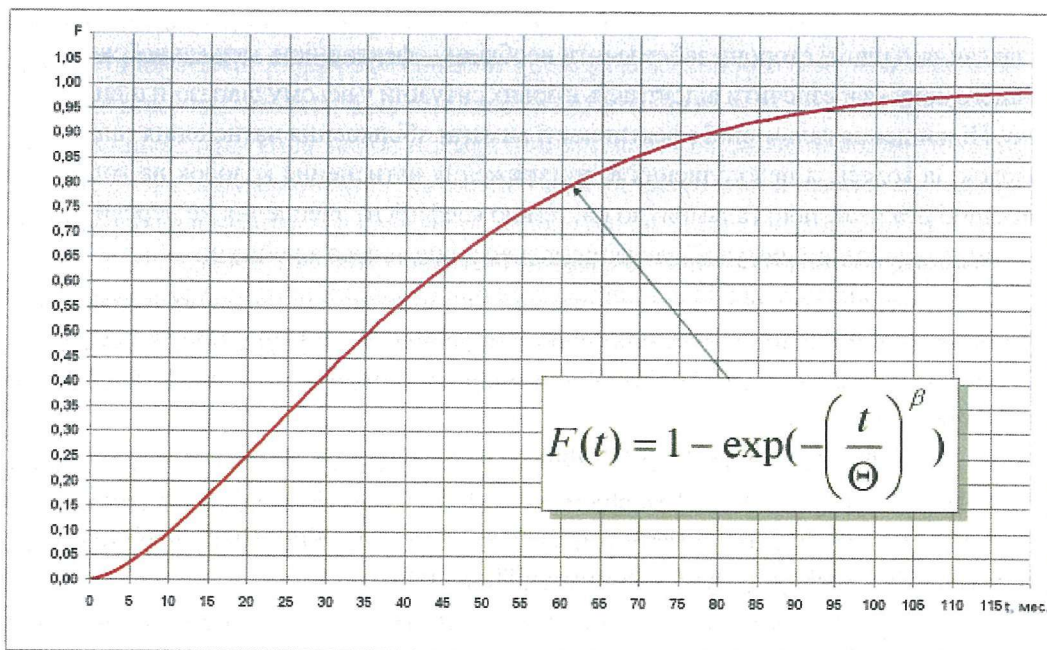


Рис.1. Імовірність появи повзунів на колісних парах вантажних вагонів.

Для викладу методики визначення вірогідності й точності результатів вимірювань використовуються результати поїзних гальмівних випробувань (табл. 1) напіввагона моделі 12-7023 з композиційними колодками та типовою гальмівною системою.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Табл. 1. Результати вимірювань гальмівних характеристик

Швидкість на початку гальмування, км/год	Гальмівний шлях, м	Тиск у ГЦ, кгс/см ²	Вихід штока, мм
1	2	3	4
Порожній вагон			
40,44	121,58	1,40	70,00
78,49	351,39	1,35	73,00
39,83	114,16	1,30	74,00
76,25	346,94	1,35	74,00
92,03	507,07	1,35	73,00
111,20	653,85	1,35	76,00
62,06	235,74	1,45	77,00
95,31	536,72	1,30	77,00
116,03	723,53	1,30	74,00
102,65	572,30	1,35	77,00
41,06	120,09	1,30	70,00
59,31	229,81	1,35	75,00
58,02	210,54	1,35	75,00
76,25	354,35	1,35	75,00
111,20	616,78	1,35	77,00
98,84	545,62	1,35	76,00
116,03	680,54	1,30	77,00
Середнє значення		1,36	74,71
Навантажений вагон			
44,71	163,09	3,15	90,00
83,13	524,86	3,20	80,00
121,30	1162,40	3,20	92,00
102,61	849,56	3,21	90,00
66,94	360,28	3,18	95,00
120,94	1171,29	3,20	92,00
102,30	862,90	3,20	90,00
68,48	391,42	3,25	90,00
121,89	1233,56	3,20	90,00
98,93	811,01	3,20	89,00
43,62	176,44	3,21	90,00
75,94	449,24	3,15	92,00
76,17	449,24	3,20	93,00
62,43	300,98	3,20	90,00
43,57	176,44	3,20	90,00
Середнє значення		3,20	90,20

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За результатами вимірювань швидкості й гальмівного шляху побудована, із застосуванням статистичних методів, крива у залежності величини гальмівного шляху від швидкості руху на початку гальмування для порожнього й навантаженого вагонів (рис. 2). Час підготовки автогальм до дії, для перерахування гальмівного шляху на поїзд, з обліком того що поїзні випробування проводилися методом „кидання”, приймався рівним 3 с.

Величина гальмівного шляху вантажного поїзда S , м, у залежності від швидкості на початку гальмування V , км/год, визначалася за формулах (1) і (2) відповідно для навантаженого та порожнього вагонів.

$$S(V)_{\text{порож}} = 0,0808 \cdot V^2 - 0,0045 \cdot V + \frac{3 \cdot V}{3,6} \quad (1)$$

$$S(V)_{\text{навантаж}} = 0,0391 \cdot V^2 + 1,544 \cdot V + \frac{3 \cdot V}{3,6} \quad (2)$$

Розрахунки невизначеності вимірювань, з використанням методичних вказівок [1], для вимірювання тиску стисненого повітря в гальмівному циліндрі та виходу штока наведені у вигляді бюджетних таблиць (табл. 2, 3, 4 та 5).

Невизначеність вимірювань розрахункового коефіцієнта сили натиснення композиційних колодок δ визначається по функціональній залежності розрахункового коефіцієнта від швидкості на початку гальмування V й відповідних їм величин гальмівних шляхів S , перерахованих на вантажний поїзд. Для побудови аналітичної залежності використовувалися дані таблиці 6.

Як функціональна залежність приймається статична залежність:

$$d(V) = c(V) \cdot S(V)^{d(V)} \quad (3)$$

Формулу (3), шляхом логарифмування правої й лівої частин, приводимо до вигляду:

$$y = a + bz \quad (4)$$

Коефіцієнти a й b із формули (4) визначалися методом найменших квадратів:

$$U = \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bz))^2 \quad (5)$$

де n - число i -их опорних значень.

Завдання зводилося до визначення таких значень коефіцієнтів a й b , які мінімізують суму квадратів різниці між експериментальними значеннями й визначеною за формулою (4), для цього використовувалася система рівнянь:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

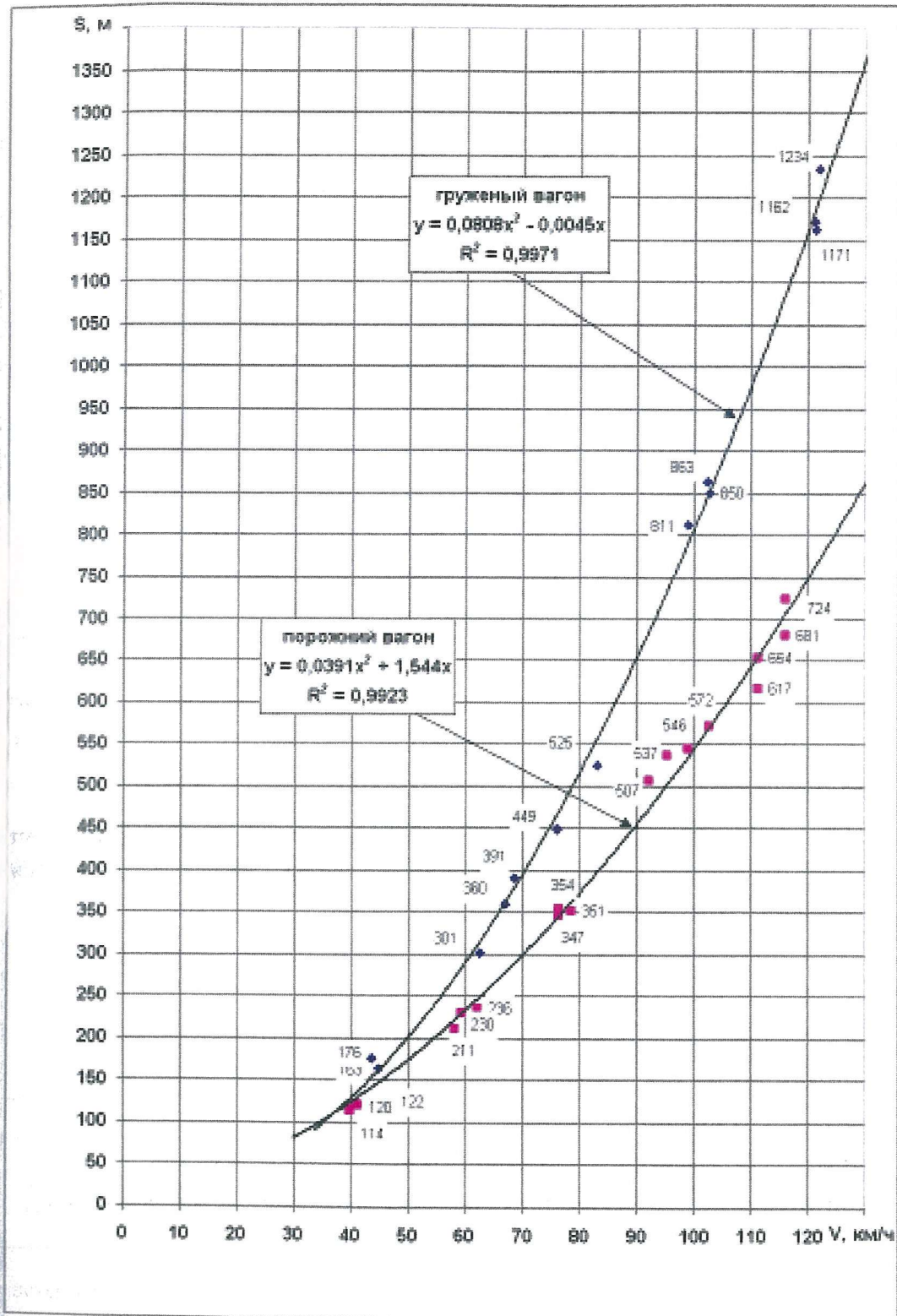


Рис. 2. Величини гальмівного шляху порожнього й навантаженого вагона при швидкості руху на початку екстреного гальмування, реалізованих при поїзних гальмівних випробуваннях методом „кидання”

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Табл. 2. Бюджет невизначеності вимірювань тиску стисненого повітря у гальмівному циліндрі навантаженого вагона

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини, кгс/см ²	Стандартна невизначеність, кгс/см ²	Число ступенів свободи	Розподіл імовірностей вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності, кгс/см ²
Тиск стисненого повітря	3,2	0,006146	14	Нормальне	1	0,006146
Основна похибка Δ	0	0,051962	∞	Рівномірне	1	0,051962
Похибка квантування Δ_k	0	0,028868	∞	Рівномірне	1	0,028868
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини, кгс/см ²	Сумарна стандартна невизначеність, кгс/см ²	Ефективне число ступенів свободи	Рівень довіри	Коефіцієнт покриття*)	Розширена невизначеність, кгс/см ²
P, кгс/см ²	3,2	0,059759	125101	0,95	1,959984	0,117126

*) - Коефіцієнт покриття визначається як коефіцієнт із розподілу Стюдента при довірчій імовірності 0,95 й ефективного числа ступенів свободи ν_{eff} , визначений за формулою Велча-Сатерсвейта:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{u^4(x_i)}{\nu_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2}$$

де u_c - Сумарна стандартна невизначеність;
 $u(x_i), \nu_i$ - стандартна невизначеність і число ступенів свободи для і-ої вхідної величини;

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ - коефіцієнт чутливості для і-ої вхідної величини;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Табл. 3. Бюджет невизначеності вимірів тиску стисненого повітря в гальмівному циліндрі порожнього вагона

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини, кгс/см ²	Стандартна невизначеність, кгс/см ²	Число ступенів свободи	Розподіл імовірностей вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності, кгс/см ²
Тиск стислого повітря	1,34	0,009474	16	Нормальне	1	0,009474
Основна похибка Δ	0	0,051962	∞	Рівномірне	1	0,051962
Похибка квантування Δк	0	0,028868	∞	Рівномірне	1	0,028868
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини, кгс/см ²	Сумарна стандартна невизначеність, кгс/см ²	Ефективне число ступенів свободи	Довірча ймовірність	Коефіцієнт покриття	Розширена невизначеність, кгс/см ²
Тиск стислого повітря	1,34	0,060192	26074	0,95	1,960057	0,11798

Табл. 4. Бюджет невизначеності вимірювань виходу штока гальмівного циліндра навантаженого вагона

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини, мм ²	Стандартна невизначеність, мм ²	Число ступенів свободи	Розподіл імовірностей вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності, мм ²
Вихід штока	90,2	0,834951	14	Нормальний	1	0,834951
Основна похибка Δ	0	0,057735	∞	Рівномірний	1	0,057735
Похибка квантування Δк	0	0,288675	∞	Рівномірний	1	0,288675
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини, мм	Сумарна стандартна невизначеність, мм	Ефективне число ступенів свободи	Довірча ймовірність	Коефіцієнт покриття	Розширена невизначеність, мм
Вихід штока	90,2	0,88533	18	0,95	2,109819	1,867886

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Табл. 5. Бюджет невизначеності вимірів виходу штока гальмового циліндра порожнього вагона

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини, мм	Стандартна невизначеність, мм	Число ступенів свободи	Розподіл імовірностей вхідної величини	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності, мм
1	2	3	4	5	6	7
Вихідштока	74,71	0,5566	14	Нормальне	1	0,5566
Основна похибка	0	0,057735		Рівномірне	1	0,057735
Похибка квантування	0	0,288675		Рівномірне	1	0,288675
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини, мм	Сумарна стандартна невизначеність, мм	Ефективне число ступенів свободи	Довірча Імовірність	Коефіцієнт покриття	Розширена невизначеність, мм
Вихідштока	74,71	0,629659	26	0,95	2,055531	1,294284

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial a} = \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bz)) = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial b} = \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bz)) z_i = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Систему розв'язаних рівнянь (6) приводимо до вигляду:

$$\begin{cases} an + \sum_{i=1}^n z_i = \sum_{i=1}^n y_i; \\ a \sum_{i=1}^n z_i + b \sum_{i=1}^n z_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i z_i, \end{cases} \quad (7)$$

коефіцієнти c і d визначалися за формулами:

$$c = Ln(a) = Ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n z_i^2 - \sum_{i=1}^n z_i y_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \sum_{i=1}^n z_i - (\sum_{i=1}^n z_i)^2} \right). \quad (8)$$

$$d = b = \frac{n \sum_{i=1}^n z_i y_i - \sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n z_i - (\sum_{i=1}^n z_i)^2} \quad (9)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Рівняння для визначення розрахункового коефіцієнта сили натиснення композиційних колодок вантажного поїзда на площадці у діапазоні швидкостей руху (40-120) км/год наведені на рис. 3.

Похибка вимірювань розрахункового коефіцієнта сили натиснення композиційних колодок визначалася по модельному рівнянню:

$$\Delta_d = -d \cdot c \cdot S^{-d-1} \cdot \sum \Delta_i^i \quad (10)$$

де c й d - коефіцієнти рівняння (3);

S - гальмівний шлях вагона, перерахований на вантажний поїзд, м;

Δ_i - похибка i -ої складової при вимірюванні гальмівного шляху, м;

$-d \cdot c \cdot S^{-d-1}$ - коефіцієнт чутливості.

Похибка вимірювань гальмівного шляху складається із трьох складових:

Δ_1 - похибка, обумовлена похибкою вимірювань довжини шляху вагона, який пройшов за один оберт колеса, м;

Δ_2 - похибка, обумовлена вимірюванням кількості обертів колеса за час гальмування, м;

Δ_3 - похибка, обумовлена апроксимацією результатів вимірювань гальмівного шляху, м, і швидкості V , км/год, на початку гальмування вагона аналітичною залежністю, при цьому стандартна невизначеність визначалася по формулі:

$$u_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - (aV_i^3 + bV_i^2 + cV_i))^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (11)$$

де a й b - коефіцієнти рівнянь, що виражають аналітичні залежності гальмівного шляху порожнього й навантаженого вагона на площадці від швидкості руху на початку гальмування (див. рис. 1);

n - число інтервалів розбивки діапазону швидкостей.

Невизначеність вимірювань розрахункового коефіцієнта сили натиснення композиційних колодок для вантажного поїзда на площадці з порожніх і навантажених вагонів визначалася в діапазоні швидкостей (40-120) км/год.

Для прикладу, у таблицях 7 і 8 наведений розрахунок невизначеності вимірювань розрахункового коефіцієнта для швидкості 120 км/год.

Підсумкові значення зміни гальмівних характеристик при довірчій імовірності 0,95 наведені в таблиці 9.

Для подальшого аналізу гальмівної системи дослідного вагона на предмет появи повзунів приймалися статистичні дані про пошкоджуваність колісних пар в експлуатації (див. рис. 1).

Як критерій використався коефіцієнт k , що визначає відношення граничного коефіцієнта зчеплення колеса з рейкою до реалізованого коефіцієнта зчеплення:

$$k = \frac{[y]}{d \cdot j_{\text{ед}}} \quad (12)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

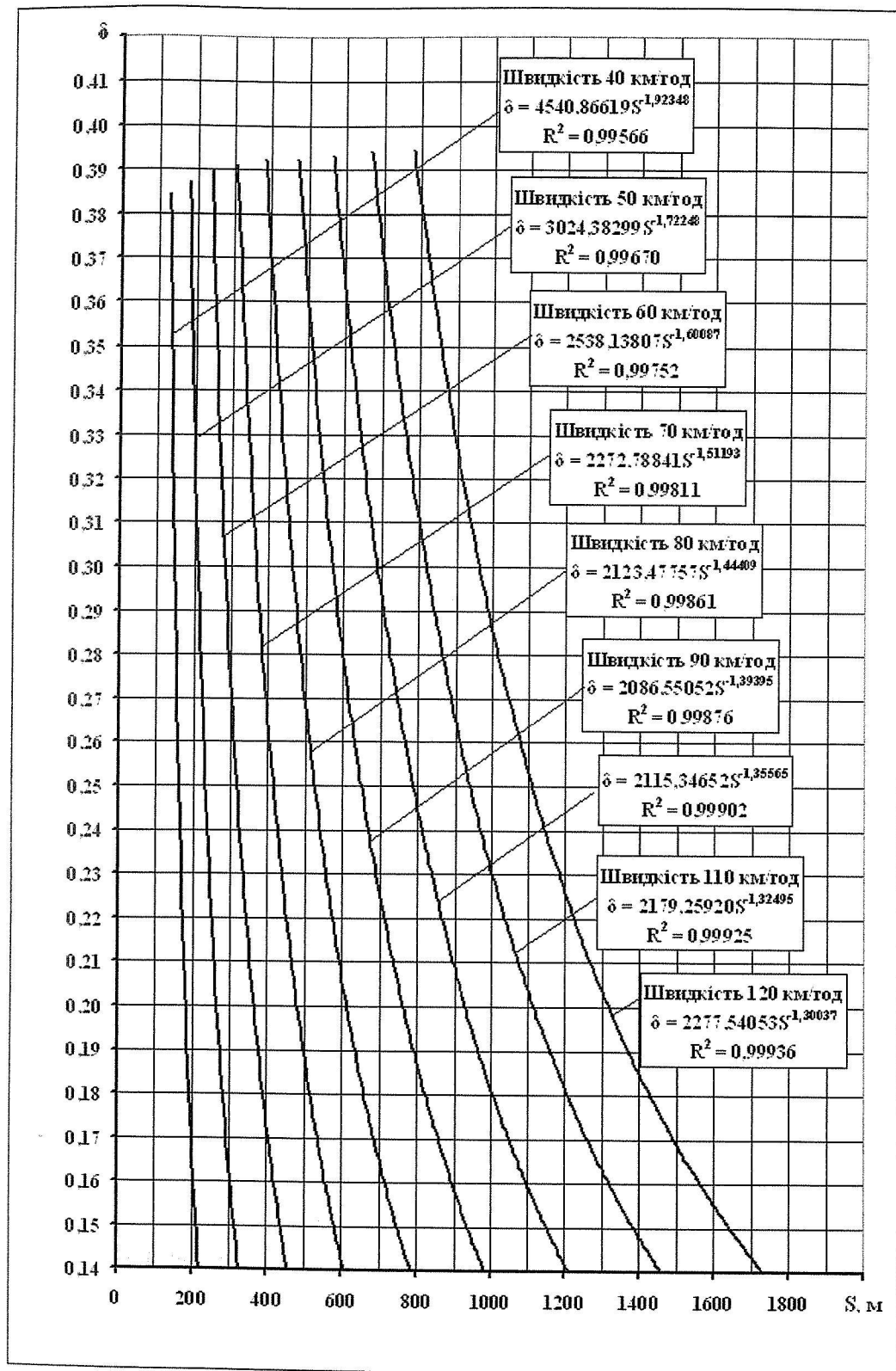


Рис. 3. Номограма й формули для визначення розрахункового коефіцієнта сили натиснення композиційних колодок вантажного поїзда на площадці

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Табл. 7 Бюджет невизначеності вимірювань розрахункового коефіцієнта сили натиснення композиційних колодок вантажного поїзда з навантажених вагонів на площадці для швидкості руху на початку гальмування 120 км/год

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність, м	Число ступенів волі	Розподіл імовірностей	Коефіцієнт чутливості, м ⁻¹	Внесок невизначеності
1	2	3	4	5	6	7
Похибка вимірювань рулеткою гальмівного шляху, пройденого колесом за один оберт	0	0,000953	∞	Рівномірне	0,000217	2,07E-07
Похибка, обумовлена неточністю оцінки початку й кінця вимірювань рулеткою	0	0,005774	∞	Рівномірне	0,000217	1,25E-06
Похибка, обумовлена неточністю вимірювань числа обертів колеса	0	1,71473	∞	Рівномірне	0,000217	0,000373
Невизначеність, обумовлена побудовою графіка		5,256839	14	Нормальне	0,000217	0,001143
δ	0,2117	0,001202	2,448	0,95	4,302656	0,005171

Табл. 8. Бюджет невизначеності вимірів розрахункового коефіцієнта сили натиснення композиційних колодок вантажного поїзда з порожніх вагонів на площадці для швидкості руху на початку гальмування 120 км/год.

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність, м	Число ступенів волі	Розподіл імовірностей	Коефіцієнт чутливості, м ⁻¹	Внесок
1	2	3	4	5	6	7
Похибка вимірювань рулеткою гальмівного шляху, пройденого колесом за один оберт	0	0,000953	∞	Рівномірний	0,000543	5,17E-07
Похибка, обумовлена неточністю оцінки початку й кінця вимірювань рулеткою	0	0,005774	∞	Рівномірне	0,000543	3,13E-06
Похибка, обумовлена неточністю вимірювань обертів колеса	0	1,71473	∞	Рівномірне	0,000543	0,000931
Похибка, обумовлена побудовою графіка		4,4982	15	Нормальне	0,000543	0,002442
δ	0,354205	0,002614	2,624	0,95	4,302656	0,011246

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Табл. 9. Гальмівні характеристики вантажного поїзда на площадці, отримані за результатами поїзних гальмівних випробувань

Назва характеристики	Величина й довірна імовірність
1	2
Порожні вагони	
Тиск у гальмівному циліндрі, кгс/см ²	1,34±0,1180 при P=0,95
Вихід штока, мм	74,71±1,2943 при P=0,95
Розрахунковий коефіцієнт сили натиснення композиційних колодок при швидкості:	
40 км/год	0,269±0,0680 при P=0,95
50 км/год	0,287±0,0472 при P=0,95
60 км/год	0,301±0,0352 при P=0,95
70 км/год	0,313±0,0274 при P=0,95
80 км/год	0,323±0,0219 при P=0,95
90 км/год	0,332±0,0181 при P=0,95
100 км/год	0,340±0,0152 при P=0,95
110 км/год	0,347±0,0130 при P=0,95
120 км/год	0,354±0,0112 при P=0,95
Навантажені вагони	
Тиск у гальмівному циліндрі, кгс/см ²	3,20±0,1171 при P=0,95
Вихід штока, мм	90,20±1,8679 при P=0,95
Розрахунковий коефіцієнт сили натиснення композиційних колодок при швидкості:	
40 км/год	0,254±0,0716 при P=0,95
50 км/год	0,234±0,0395 при P=0,95
60 км/год	0,224±0,0251 при P=0,95
70 км/год	0,218±0,0173 при P=0,95
80 км/год	0,215±0,0127 при P=0,95
90 км/год	0,213±0,0097 при P=0,95
100 км/год	0,212±0,0077 при P=0,95
110 км/год	0,211±0,0062 при P=0,95
120 км/год	0,211±0,0052 при P=0,95

де δ - розрахунковий коефіцієнт сили натиснення композиційних колодок;

$\varphi_{кр}$ - розрахунковий коефіцієнт тертя гальмівних колодок, визначається за формулою для композиційних колодок [2]:

$$j_{\delta\delta} = 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150} \quad (13)$$

$[\Psi_{\epsilon}]$ - граничний коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою, визначена за формулою [2]:

$$[\Psi_{\epsilon}] = \Psi(q_0) \cdot \Psi(V) \quad (14)$$

$$\Psi(q_0) = 0,17 - 0,000153 \cdot (q_0 - 49) \quad (15)$$

$$\Psi(V) = \frac{V + 81}{2,4 \cdot V + 81} \quad (16)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

q_0 - навантаження на колісну пару (осьове навантаження), тс;

V - швидкість, км/г.

За допомогою коефіцієнта K отримані розрахункові коефіцієнти сили натиснення колодок проектувалися на розподіл імовірності появи повзунів в експлуатації.

Розподіл імовірності пошкоджуваності колісних пар при гальмуванні показали, що для порожнього дослідного вагона імовірність появи повзунів трохи нижче в порівнянні із загальносільською (рис. 4). Виконаний аналіз свідчить, що гальмівна система дослідного вагона не має істотної переваги по відношенню до середньостатистичних вагонів.

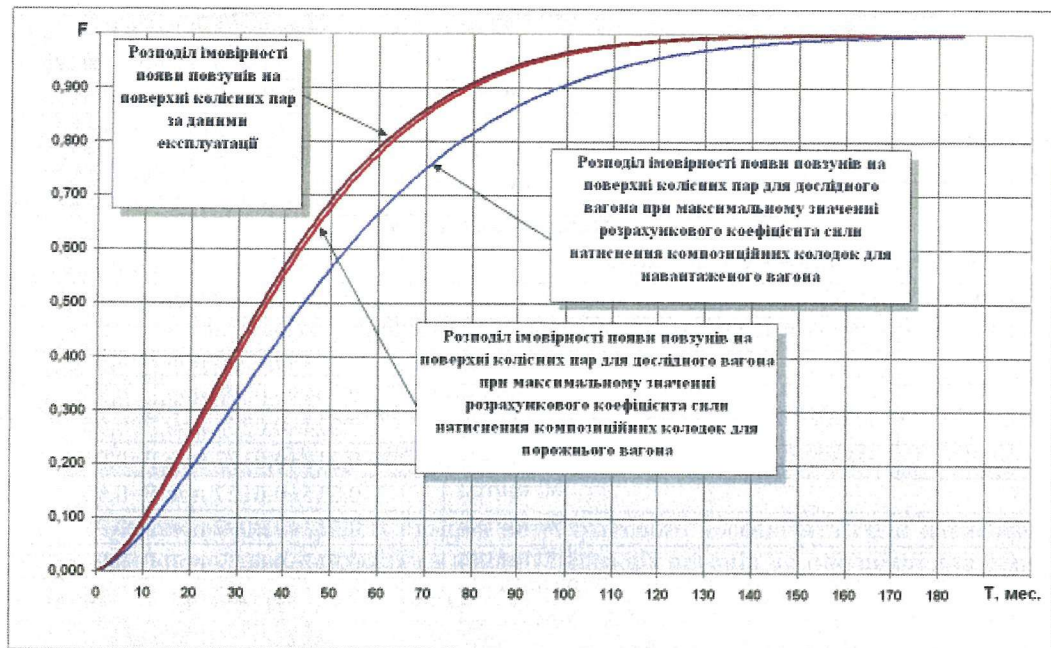


Рис. 4. Розподіл імовірності появи повзунів на поверхні кочення колісних пар вантажного поїзда з порожніх та навантажених вагонів при швидкості 100 км/г.

Висновки

Оцінка гальмівних характеристик з урахуванням невизначеності вимірювань з довірчою імовірністю 0,95, дозволяє визначати інтервал зміни гальмівних характеристик дослідного вагона за результатами поїзних гальмівних випробувань, а як основний критерій — статистичні дані про пошкоджуваність поверхні коліс в експлуатації.

Однак, відсутність даних про пошкодження поверхні кочення коліс в експлуатації вагона-прототипу не дозволяє одержати прогнозований висновок про вплив досліджуваної гальмівної системи на пошкоджуваність колісних пар.

ЛІТЕРАТУРА

1. РМГ 43-2001 Державна система забезпечення єдності вимірів. Застосування «Посібника з вираження невизначеності вимірів».