

УДК 53.08:006.9:629.018

Г.О. Черепашук, О.П. Потильчак, Т.В. Бикова

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПІД ЧАС ВИПРОБУВАНЬ РЕСОРНИХ ПІДВІСІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

В статті проаналізована методика визначення середнього коефіцієнта відносного тертя фрикційних гасників коливань ресорних підвісів вантажних вагонів, розроблена методика розрахунку невизначеності вимірювання цього коефіцієнта. В роботі проведено аналіз методики і запропоновано спосіб її спрощення. Зроблено розрахунки невизначеності вимірювань на основі експериментальних даних і доведено, що вони співпадають з теоретичними.

Ключові слова: середній коефіцієнт відносного тертя, сумарна стандартна невизначеність, опосередковані вимірювання, крива навантаження, випробування вагонів.

Вступ

На сьогодні досить гостро стоїть задача підвищення якості залізничного транспорту України, що вимагає проведення великого комплексу досліджень з метою визначення показників надійності конструкції. При цьому постає задача розрахунку показників точності вимірювань [1, 2]. Одним із параметрів, що визначається під час випробувань вагонів є середній коефіцієнт відносного тертя фрикційних демпферів [3-6], що характеризує якість демпфера і, відповідно, якість умов перевезення вантажу.

Коефіцієнт відносного тертя фрикційних гасників коливань – це відношення середньої на ході розтягнення і на ході стискання сили тертя, яка створюється фрикційним гасником коливань у вертикальному напрямку, до величини статичного навантаження на ресорний підвіс. В умовах експериментальних досліджень дійсний коефіцієнт відносного тертя знаходять шляхом побудови функціональної залежності прогину ресорного підвісу від навантаження на ресорний комплект в певному діапазоні навантаження в ході стискання пружин і в ході їх розтягнення. При цьому постає необхідність оцінки результатів експериментів. На сьогодні якість результатів вимірювань при випробуваннях вантажних вагонів ґрунтується на понятті «похибка», що є застарілим і не відповідає сучасним вимогам науки і техніки. Коли виникає потреба у визнанні і порівнянні результатів вимірювання на міжнародному рівні, постає необхідність у використанні підходів до оцінок у термінах «невизначеності». Закон України «Про зміну до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» дозволяє існування двох підходів до оцінки результатів вимірювань [7]. Така ситуація спричинює те, що оцінки просто перераховуються із одних в інші, що часто призводить до одержання некоректних результатів. Аналіз літератури показує, що зроблено кілька спроб оцінювання невизначеності вимірювання параметрів

автомобільних конструкцій [8 – 10], але публікацій щодо оцінки невизначеності вимірювань при випробуваннях вантажних вагонів майже немає. Таким чином, вирішення питання щодо оцінки невизначеності вимірювань параметрів випробувань конструкцій залізничного транспорту, зокрема коефіцієнта відносного тертя фрикційних демпферів, є актуальною задачею.

Метою статті є розробка методики оцінки невизначеності вимірювання середнього коефіцієнта відносного тертя фрикційних демпферів.

Методика вимірювання середнього коефіцієнта відносного тертя

Крива навантаження ресорного підвісу в ході його стискання і розтягнення має вигляд функціональної залежності величини навантаження від прогину. За рахунок поглинання демпфером енергії, що вивільняється під час гальмування вагона, утворюється так звана петля гістерезису (див. рис. 1).

Крива навантаження реєструється спеціальними засобами вимірювальної техніки, потім у потрібних точках, які відповідають деформаціям порожнього і навантаженого вагонів, розраховується середній коефіцієнт відносного тертя за формулою:

$$\phi = \frac{P_{\text{пх}} - P_{\text{зх}}}{P_{\text{пх}} + P_{\text{зх}}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{пх}}$ – сила, що діє на ресорний комплект під час його стискання (прямий хід); $P_{\text{зх}}$ – сила, що діє на ресорний комплект під час його розтягнення (зворотний хід).

Найбільша проблема, яка виникає під час обчислення коефіцієнта відносного тертя, це отримання значень $P_{\text{пх}}$ та $P_{\text{зх}}$ для однієї і тієї ж величини деформації, оскільки процеси стискання та розтягнення не синхронізуються, а є послідовними у часі. Оскільки характеристики прямого і зворотного хо-

дів мають приблизно вид лінійних функцій, то дослідники часто апроксимують їх функціями виду $P(f) = af + b$ і розраховують за ними значення $P(f)$. При цьому, крім інструментальної невизначеності, результат розрахунків коефіцієнта відносного тертя містить невизначеність, зумовлену апроксимацією.

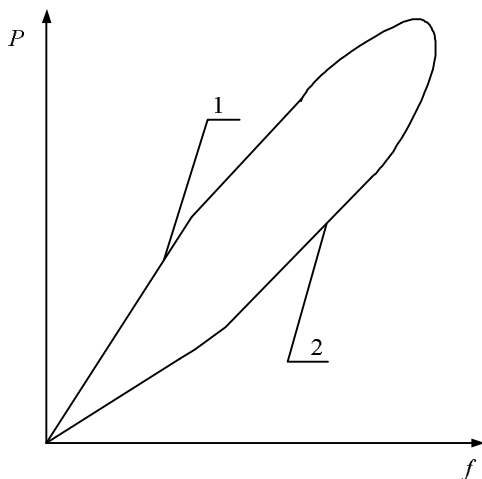


Рис. 1. Крива навантаження ресорного комплекту: прямий хід (крива 1), зворотній хід (крива 2), P – сила навантаження на ресорний комплект; f – величина деформації пружини

Сучасний рівень технічного обладнання дозволяє автоматизувати процес випробувань ресорних підвісів, підвищити роздільну здатність реєстрації кривої навантаження і зменшити невизначеність вимірювання шляхом переходу від апроксимації всієї характеристики до її інтерполяції в околицях потрібних значень деформацій.

Фактично характеристика навантаження має вигляд, зображений на рис. 2.

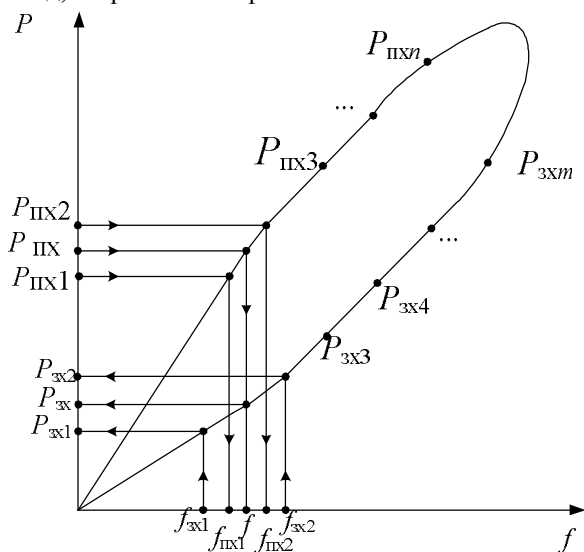


Рис. 2. Крива навантаження ресорного комплекту

Нехай, наприклад, значення ваги порожнього вагона, яке для даного випадку відповідає величині $P_{вх}$

в формулі (1) знаходиться між відліками $P_{пх1}$ і $P_{пх2}$, тоді деформація, що відповідає цій силі дорівнює

$$f = f_{пх1} + \frac{f_{пх2} - f_{пх1}}{P_{пх2} - P_{пх1}} \cdot (P_{вх} - P_{пх1}), \quad (2)$$

Визначаємо силу, що відповідає цій деформації на зворотному ході:

$$P_{зх} = P_{зх1} + \frac{P_{зх2} - P_{зх1}}{f_{зх2} - f_{зх1}} \cdot (f - f_{зх1}). \quad (3)$$

Підставивши формулу (3) у вираз (1), отримаємо залежність середнього коефіцієнта відносного тертя від параметрів, що вимірюються:

$$\varphi = \frac{x_1 x_3 x_5 - x_2 x_4 x_6}{x_1 x_3 x_5 + x_2 x_4 x_6}, \quad (4)$$

- де $x_1 = \Delta P_{пз} = P_{пх} - P_{зх1}$,
- $x_2 = \Delta P_{пп} = P_{пх} - P_{пх1}$,
- $x_3 = \Delta P_{пх} = P_{пх2} - P_{пх1}$,
- $x_4 = \Delta P_{зх} = P_{зх2} - P_{зх1}$,
- $x_5 = \Delta f_{зх} = f_{зх2} - f_{зх1}$,
- $x_6 = \Delta f_{пх} = f_{пх2} - f_{пх1}$.

Таким чином, невизначеність середнього коефіцієнта відносного тертя буде розраховуватись за методикою розрахунку невизначеності опосередкованих вимірювань.

Розробка методики оцінки невизначеності вимірювання середнього коефіцієнта відносного тертя

Сумарна стандартна невизначеність за умови некорельованості результатів розраховується як

$$u_c(\phi) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u_c^2(x_i)}, \quad (5)$$

де c_i – коефіцієнти чутливості, що являють собою

$$\text{часткові похідні } c_i = \frac{\partial \phi}{\partial x_i}.$$

Оскільки

$$\begin{aligned} u_c(x_1) &= u_c(x_2) = u_c(P), \\ u_c(x_3) &= u_c(x_4) = \sqrt{2} u_c(P), \\ u_c(x_5) &= u_c(x_6) = \sqrt{2} u_c(f), \end{aligned}$$

то вираз (5) набуває наступного вигляду:

$$u_c(\phi) = \sqrt{(c_1^2 + c_2^2 + 2c_3^2 + 2c_4^2) u_c^2(P) + (2c_5^2 + 2c_6^2) u_c^2(f)}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{де } c_1 &= \frac{\partial \phi}{\partial x_1} = \frac{2x_2 x_3 x_4 x_5 x_6}{(x_1 x_3 x_5 + x_2 x_4 x_6)^2}, \\ c_2 &= \frac{\partial \phi}{\partial x_2} = \frac{-2x_1 x_3 x_4 x_5 x_6}{(x_1 x_3 x_5 + x_2 x_4 x_6)^2}, \\ c_3 &= \frac{\partial \phi}{\partial x_3} = \frac{2x_1 x_2 x_4 x_5 x_6}{(x_1 x_3 x_5 + x_2 x_4 x_6)^2}, \end{aligned}$$

$$c_4 = \frac{\partial \phi}{\partial x_4} = \frac{-2x_1x_2x_3x_5x_6}{(x_1x_3x_5 + x_2x_4x_6)^2},$$

$$c_5 = \frac{\partial \phi}{\partial x_5} = \frac{2x_1x_2x_3x_4x_6}{(x_1x_3x_5 + x_2x_4x_6)^2},$$

$$c_6 = \frac{\partial \phi}{\partial x_6} = \frac{-2x_1x_2x_3x_4x_5}{(x_1x_3x_5 + x_2x_4x_6)^2}.$$

Розрахуємо коефіцієнти чутливості для ряду експериментальних точок кривої навантаження (див. рис. 3).

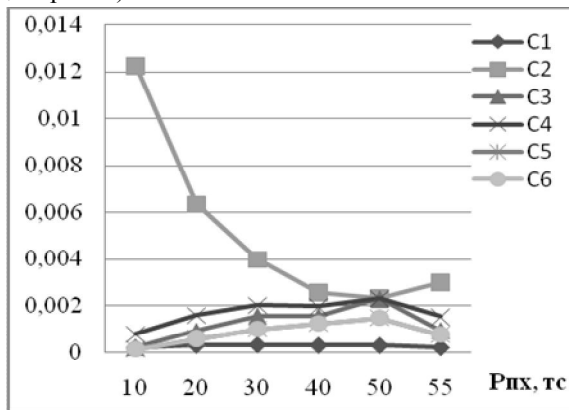


Рис. 3. Графіки залежності коефіцієнтів чутливості від сили, що діє на підвіс

Очевидно, що при малих значеннях сили навантаження, коефіцієнт c_2 значно перевищує інші коефіцієнти, а c_1 набуває досить малих значень в усьому діапазоні вимірювань, тобто кожен із коефіцієнтів по-різному впливає на значення сумарної невизначеності вимірювання коефіцієнта відносного тертя. З метою оптимізації методики її розрахунку дослідимо цей вплив.

Для засобів вимірювання сили в діапазоні від 0 до 100 тс невизначеність вимірювань становить приблизно $u_c(P) = 0,1$ тс, а для засобів вимірювання переміщення $u_c(f)$ не перевищує 0,15 мм. Взявши ці значення, розрахуємо $u_c(\phi)$ для кожного результату вимірювання сили, що діє на підвіс за формулою (6) та за спрощеними формулами (див. табл. 1).

Формула для визначення $u_{c1}(\phi)$ має вигляд:

$$u_{c1}(\phi) = \sqrt{(c_2^2 + 2c_3^2 + 2c_4^2)u_c^2(P) + (2c_5^2 + 2c_6^2)u_c^2(f)}; \quad (7)$$

для $u_{c2}(\phi)$ відповідно

$$u_{c2}(\phi) = \sqrt{(c_2^2 + 2c_4^2)u_c^2(P) + (2c_5^2 + 2c_6^2)u_c^2(f)}; \quad (8)$$

$u_{c3}(\phi)$ дорівнює

$$u_{c3}(\phi) = \sqrt{(c_2^2 + 2c_3^2)u_c^2(P) + (2c_5^2 + 2c_6^2)u_c^2(f)}; \quad (9)$$

$u_{c4}(\phi)$ розраховується за формулою

$$u_{c4}(\phi) = \sqrt{(c_2^2 + 2c_3^2 + 2c_4^2)u_c^2(P) + (2c_6^2)u_c^2(f)}; \quad (10)$$

а $u_{c5}(\phi)$ відповідно

$$u_{c5}(\phi) = \sqrt{(c_2^2 + 2c_4^2)u_c^2(P) + (2c_5^2)u_c^2(f)}. \quad (11)$$

Відповідні похибки $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_5$ розрахунку невизначеності за спрощеними формулами теж наведені у табл. 1.

Аналіз похибок показує, що під час розрахунків можна знехтувати коефіцієнтом c_1 , тобто використовувати для обчислення невизначеності коефіцієнта відносного тертя вираз (7). Крім цього, у випадку вимірювання середнього коефіцієнта відносного тертя в діапазоні сил до 20 тс для приблизних розрахунків можна скористатись формулою

$$u_{c1}(\phi) = \sqrt{c_2^2u_c^2(P) + (2c_5^2 + 2c_6^2)u_c^2(f)}. \quad (12)$$

Похибка розрахунків невизначеності в цих умовах не перевищуватиме 17%.

Описані вище розрахунки виконувались для одного випадку реєстрації кривої навантаження. В загальних умовах значення коефіцієнтів чутливості залежать від величини різниць x_i , тобто від частоти вимірювань параметрів кривої навантаження. Чисельне моделювання показує, що вигляд характеристик залежності коефіцієнтів чутливості співпадає з експериментальними даними в усьому можливому діапазоні значень цих різниць (рис. 4).

Таблиця 1

Розрахунок невизначеності $u_c(\phi)$ за відповідними виразами

Значення сили, що діє на підвіс, тс	10	20	30	40	50	55
$u_c(\phi)$	0,0124	0,0129	0,0142	0,0145	0,0158	0,0121
$u_{c1}(\phi)$	0,0124	0,0128	0,0141	0,0144	0,0157	0,0121
$\delta_2, \%$	0	0,78	0,7	0,69	0,63	0
$u_{c2}(\phi)$	0,0122	0,0121	0,013	0,0133	0,0142	0,0113
$\delta_2, \%$	1,6	6,2	8,5	8,3	10,1	6,6
$u_{c3}(\phi)$	0,0117	0,0115	0,0126	0,013	0,0142	0,0107
$\delta_3, \%$	5,6	10,9	11,3	10,3	10,1	11,6
$u_{c4}(\phi)$	0,0121	0,0118	0,0125	0,0123	0,0134	0,0106
$\delta_4, \%$	2,4	8,5	12	15,2	15,2	12,4
$u_{c5}(\phi)$	0,0119	0,0106	0,0105	0,0097	0,0107	0,0089
$\delta_5, \%$	4	17,8	26,1	33,1	32,3	26,4

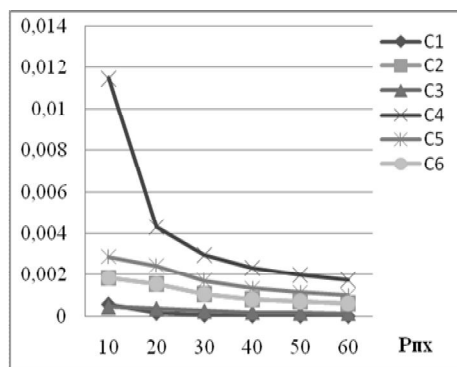


Рис.4. Залежності коефіцієнтів чутливості від сили, що діє на підвіс в загальному випадку

Отже, для розрахунку невизначеності середнього коефіцієнта відносного тертя в загальному випадку можна користуватися спрощеною методикою.

Висновки

Один із параметрів, що підлягає визначенню під час випробувань вантажних вагонів – середній коефіцієнт відносного тертя фрикційних демпферів ресорних підвіс – вимірюється за допомогою опосередкованих вимірювань. Сумарна стандартна невизначеність вимірювання цього коефіцієнта потребує обчислення шести коефіцієнтів чутливості за досить складними формулами. Аналіз виразів для цих коефіцієнтів, проведений в роботі, показав, що для оцінки невизначеності їх кількість можна зменшити, що дозволить спростити методику її розрахунку. Подальші дослідження мають бути направлені на визначення оптимальної частоти зняття відліків кривої навантаження і пошук шляхів зменшення невизначеності вимірювання середнього коефіцієнта відносного тертя.

Список літератури

1. Донченко, А.В. Стратегія розвитку транспортного машинобудування залізниць України [Текст] / А.В. Донченко // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2013. – Вып. 139. – С. 16 – 24.
2. До питання оцінки надійності гальмівних систем рухомого складу [Текст] / А.В. Донченко, Ю.Я. Водяников,

А.В. Гречко, О.Л. Корабельников // Рейковий рухомий склад. – Х. : ГП „УкрНИИВ”, 2013. – Вып. 9. – С. 57 – 59.

3. Губачева, Л.О. Моделирование динамических процессов транспортных средств [Текст] : навчальний посібник / Л.О. Губачева. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2009. – 120 с.

4. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия (ГОСТ 9246 – 2013). – [Введен 01.07.2014]. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; М. : Стандартинформ, 2014. – 24 с.

5. Конструирование и расчет вагонов : учеб. для вузов ж.-д. трансп. [Текст] / В.В. Лукин [и др.]; под ред. В.В. Лукина. – М. : УМК МПС России, 2000. – 731 с.

6. Соколов, М.М. Гасители колебаний подвижного состава : справочник [Текст] / М.М. Соколов, В.И. Варавва, Г.М. Левит. – М. : Транспорт, 1985. – 215 с.

7. Закон України № 1314-VII від 05.06.2014 «Про метрологію та метрологічну діяльність» [Електронний ресурс] // Офіційний веб-портал Верховної Ради України. – Електрон. дан. (2 файли). – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>.

8. Мерджієвська, В.В. Оцінювання невизначеності вимірювання параметрів автомобільних двигунів під час стендового випробування [Текст] / В.В. Мерджієвська // Системи обробки інформації. – Х. : ХУПС, 2008. – N 4 (71). – С. 112-116.

9. Жарко, Ю.Г. Испытания автотранспорта: стандартизация, сертификация, оценивание неопределенности измерений [Текст] / Ю.Г. Жарко // Системи обробки інформації. – Х. : ХУПС, 2008. – N 4 (71). – С. 108-111.

10. Каишканов, А.А. Оцінювання невизначеності значень коефіцієнта зчеплення та її вплив на результати автотехнічної експертизи дорожньо-транспортних пригод [Текст] / А.А. Каишканов // Вісник НТУ «ХПИ». – 2014. – № 8 (1051). – С. 61-66.

11. Guide to the Expression Uncertainty in Measurement / First Edition – ISO/Switzerland. 1993/–101 p. Руководство по выражению неопределенностей измерения. – СПб. – НПО ВНИИМ им. Менделеева, 1999. – 134 с.

12. Захаров, И.П. Теория неопределенности в измерениях: учеб. пособ. [Текст] / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Х. : Консум, 2002. – 256 с.

13. Дорожжовець, М. Опрацювання результатів вимірювань / М. Дорожжовець – Львів: НУ «ЛП», 2007. – 624 с.

Надійшла до редколегії 24.12.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. І.В. Руженцев, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Г.А. Черепашчук, А.П. Потыльчак, Т.В. Быкова

В статье проанализирована методика определения среднего коэффициента относительного трения фрикционных гасителей колебаний рессорного подвешивания грузовых вагонов, разработана методика расчета неопределенности измерений этого коэффициента. В работе проведено анализ методики и предложен способ ее упрощения. Сделаны расчеты неопределенности измерений на основании экспериментальных данных и доказано, что они совпадают с теоретическими.

Ключевые слова: средний коэффициент относительного трения, суммарная стандартная неопределенность, косвенные измерения, кривая нагрузки, испытания вагонов.

ESTIMATION OF MEASUREMENTS UNCERTAINTY DURING TESTS OF FRICTION SHOCK ABSORBER OF FREIGHT CARRIAGES

G.O. Cherepashchuk, O.P. Potilchak, T.V. Bykova

Determination methodology of average coefficient of relative friction of freight carriages is analysed in the article methodology of uncertainty calculation of this coefficient measurements is worked out. The analysis of methodology is made and the method of its simplification is offered. Uncertainty of measurements is calculated on the basis of experimental data and it is proved that they coincide with theoretical ones.

Keywords: mid-coefficient of relative friction, combined standard uncertainty, indirect measuring, curve of loading, carriage test.