УДК 621.317.089.6: 629.3.032

МЕТРОЛОГІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТИ КОЛЕСА З ПНЕВМАТИЧНОЮ ШИНОЮ

М.М. Балака, асистент кафедри будівельних машин
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, e-mail: balaka_maxim@ukr.net

Анотація. В роботі проаналізовано результати стендових випробувань окремого колеса з пневматичною шиною на опорній поверхні руху. Проведено метрологічне оцінювання одержаних результатів вимірювань з використанням методів теорії помилок.

Ключові слова: колесо з пневматичною шиною, експеримент, випробувальний стенд, результати вимірювань, метрологічне оцінювання.

METROLOGICAL ESTIMATION OF RESULTS EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE WHEEL WITH PNEUMATIC TIRE

M. Balaka, Assistant of Building Machinery Department
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: balaka_maxim@ukr.net

Abstract. This paper analyzes the results of bench testing a single wheel with pneumatic tire on the bearing surface of movement. The metrological estimation of the measuring results using the methods of the errors theory.

Keywords: wheel with pneumatic tyre, experiment, test bench, measuring results, metrological estimation.

Вступ. Пневматичні шини для самохідних транспортно-технологічних засобів (автомобілів високої прохідності, землерийно-транспортних машин, тягачів тощо) є трудомісткою продукцією високої одиничної вартості. Від досконалості пневматичної шини як важливого конструктивного елементу ходового обладнання залежать експлуатаційні та техніко-економічні показники зазначеної техніки, тому надзвичайно важливо, щоб експлуатація шин здійснювалася в належних умовах [1]. Водночас, експериментальне дослідження процесів, які виникають під час роботи колеса з пневматичною шиною на опорній поверхні руху, ускладнено впливом багатьох факторів. Повністю врахувати їх вплив на досліджувані закономірності не представляється можливим, оскільки вони носять випадковий характер [2]. Тому метрологічне оцінювання одержаних результатів з використанням методів теорії помилок дозволить підвищити достовірність проводжуваного аналізу.

Мета роботи. Проаналізувати результати експериментальних досліджень роботи колеса з пневматичною шиною і оцінити похибки вимірювань.

Матеріал та результати досліджень. Для метрологічного оцінювання похибок параметрів, що одержані прямими або непрямими методами вимірювань, проводиться попереднє тарування вимірювальної системи [3] стендових випробувань окремого колеса з пневматичною шиною (без урахування енергетичних витрат силової установки випробувального стенда).

Випробувальний стенд представляє собою систему з двох агрегатів (рис. 1): привідного агрегату 1, що забезпечує навантаження і привід колеса при випробуванні, та гальмівного агрегату 2 у вигляді гусеничного трактора типу Т-100МГБ від роторного екскаватора ЭР-7А, який обладнано розширеним гусеничним ходом і ходозменшувачем [2].

Встановлені на стенді датчики (рис. 1) дозволяють вимірювати та фіксувати за допомогою реєструвальної апаратури наступні основні параметри: крутний момент $M_к$, що підводиться до пневмоколісного рушія; силу тяги T; радіальну $\Delta_р$ і тангенційну $\Delta_т$ деформації шини; кутову швидкість колеса $\omega_к$; кутову швидкість мірного колеса $\omega_{мк}$; час досліду t. На рис. 1, зокрема, позначено вертикальне навантаження на колесо P_z, лінійну швидкість колеса $V_{кд}$, радіус колеса $r_к$ та радіус мірного колеса $r_{мк}$.

Оскільки на стендовому обладнанні досліджуються встановлені режими роботи пневмоколісного рушія, тому метрологічне оцінювання похибок здійснюється із врахуванням тільки статичних складових похибок вимірювальної системи. При цьому передбачається, що частотний діапазон вимірювальної системи та реєструвальної апаратури наперед перевищує максимальну частоту спектра вимірюваних параметрів, тобто величина динамічних похибок вимірювальної системи до розрахунку не приймається.

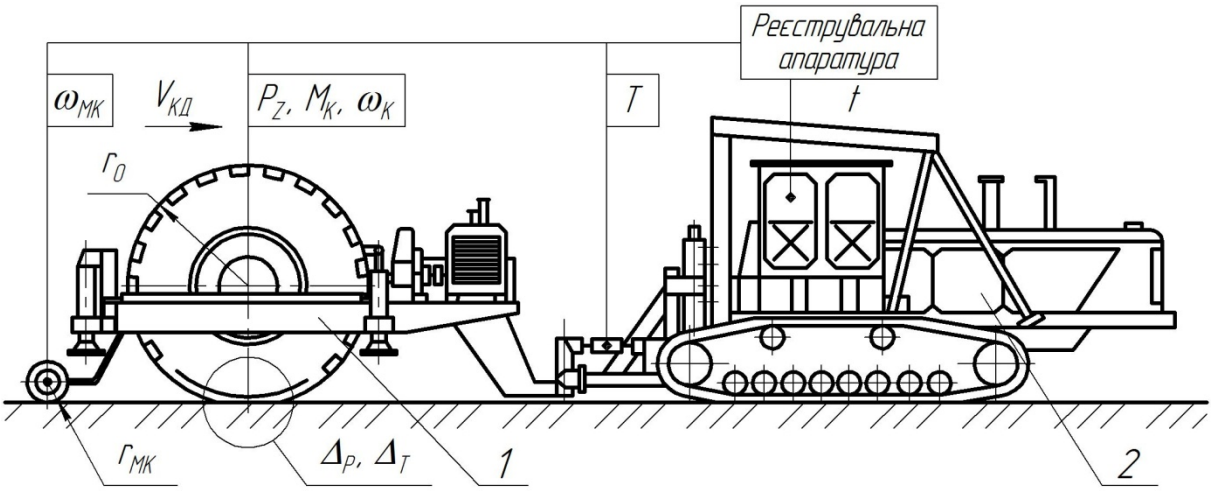

Рисунок 1 – Схема розміщення вимірювально-реєструвальної апаратури на випробувальному стенді: 1 – привідний агрегат; 2 – гальмівний агрегат

Статичну похибку вимірювань деякого параметра x можна представити у вигляді сукупності систематичної та випадкової складових [4, 5].

Систематична похибка виявляється при калібруванні вимірювального каналу та враховується в подальшому під час оброблення результатів. Випадкові складові похибок визначаються і нормуються методами теорії помилок у припущенні нормального закону розподілення щільності ймовірності їх появи [4], допустимість чого підтверджується дослідженнями [5, 6].

Існує декілька способів задавання основної похибки вимірювальної системи [6]. Враховуючи те, що аналіз одержаних результатів, в основному, здійснюється з використанням графічного представлення залежностей, тому використовується задавання основної похибки в формі відносної приведеної похибки вимірюваного параметру (ГОСТ 8.207-76). При цьому, в якості нормуючого, приймається максимальне значення градуювання вимірювального каналу.

Величина приведеної відносної похибки параметру $\delta(x)$ при прямому методі вимірювань визначається за виразом

$$\delta(x) = [\Delta / x_{max}] \cdot 100\%, \tag{1}$$

де Δ – очікуване значення похибки параметра x з надійністю α; x_{max} – нормуюче значення.

Очікуване значення похибки Δ оцінюється шириною довірчого інтервалу середнього значення параметру x з надійністю α та визначається

$$\Delta = t_i S_X / \sqrt{n}, \tag{2}$$

де t_i – коефіцієнт Стьюдента [4] для надійності (довірчої ймовірності) a ($p = 1 - \alpha$); S_X – вибіркове середньоквадратичне відхилення похибки параметру x; n – число паралельних вимірювань параметру.

Результуючу величину похибки вимірювання параметру можна представити у вигляді суми трьох основних складових [5]: похибки тарування (градуювання) вимірювального каналу S_T; похибки відліку S_B та похибки методики вимірювання, що проявляється у вигляді випадкових вимірювань (шумів) параметру, S_n. З урахуванням цього, величина S_X дорівнюватиме

$$S_X = \sqrt{S_T^2 + S_B^2 + S_n^2}, \tag{3}$$

де S_T^2, S_B^2, S_n^2 – вибіркові дисперсії похибок відповідно: тарування, відліку та самого параметру.

Вираз (3) записано в припущенні того, що між вхідними параметрами немає кореляційного зв'язку. Значення дисперсій S_T^2, S_B^2, S_n^2, а також число паралельних вимірювань параметру n визначається за результатами попередніх випробувань з використанням методів теорії помилок [4, 6, 7].

Аналіз залежностей, що використовуються для одержання значень параметрів при непрямих вимірюваннях, дозволить застосувати для визначення сумарної величини відносної похибки наступний вираз [6]

$$\delta(x)=\sqrt{\sum \delta_i^2(x)}, \tag{4}$$

де $\delta_i(x)$ – відносна похибка *i*-го параметру, що входить до розрахункової залежності визначення параметру x.

У табл. 1 наведено метрологічну характеристику похибок прямих вимірювань, а у табл. 2 – метрологічну характеристику похибок непрямих вимірювань параметрів (одержаних вимірюванням допоміжних параметрів, що пов'язані з основними відомими залежностями).

Таблиця 1 – Метрологічна характеристика похибок прямих вимірювань (для надійності $\alpha = 0{,}95$)

Найменування параметра	Значення, max	Дисперсія			К-ть вимір.	Похибка, %	
		тарування	відліку	параметра		абсолют.	віднос.
Вертикальне навантаження P_Z, кН	150	–	0,02	1,51	5	2,54	1,7
Радіус колеса r_0, мм	1300	–	0,45	2,40	5	3,47	0,3
Ширина профілю шини B_0, мм	1000	–	0,45	2,40	5	3,47	0,3
Радіус мірного колеса r_{MK}, мм	280	–	0,45	87,0	10	9,61	3,5
Відмітки часу t, с	1,0	–	–	–	–	0,02	2,0
Радіальна деформація Δ_P, мм	220	11,0	0,69	83,4	5	20,1	9,1
Тангенційна деформація Δ_T, мм	100	4,10	0,19	37,0	5	13,2	13,2
Сила тяги T, кН	95	4,05	0,04	7,61	10	3,52	3,7

Закінчення таблиці 1

Найменування параметра	Зна-чення, max	Дисперсія			К-ть ви-мір.	Похибка, %	
		тару-вання	від-ліку	пара-метра		абсо-лют.	від-нос.
Крутний момент M_K, кН·м	105	5,13	0,15	3,54	10	3,05	2,9
Кутова швидкість колеса ω_K, с$^{-1}$	1,0	–	0,42	1,9	5	3,13	3,1
Кутова швидкість мір-ного колеса ω_{MK}, с$^{-1}$	3,0	–	0,42	14,9	10	4,02	1,3

Таблиця 2 – Метрологічна характеристика похибок непрямих вимірювань (для надійності $\alpha = 0{,}95$)

Найменування параметра	Зна-чення, max	Формула для визначення похибки	Похибка, %	
			абсо-лют.	від-нос.
Радіус кочення колеса r_K, мм	1400	$\delta^2(r_{MK}) + \delta^2(\omega_K) + \delta^2(\omega_{MK})$	68,6	4,9
Силовий радіус колеса r_C, мм	1300	$\delta^2(r_0) + \delta^2(\Delta_P)$	119,6	9,2
Лінійна швидкість колеса $V_{КД}$, м/с	0,1	$\delta^2(r_{MK}) + \delta^2(\omega_{MK})$	0,004	3,7
Тягова потужність N_T, кВт	8,0	$\delta^2(T) + \delta^2(r_{MK}) + \delta^2(\omega_{MK})$	0,416	5,2
Тяговий ККД η_T	0,9	$\delta^2(T) + \delta^2(M_K) + \delta^2(\omega_K)$	0,060	6,7
Відносна сила тяги ψ	0,9	$\delta^2(P_Z) + \delta^2(T)$	0,037	4,1

Аналіз даних, що наведено в табл. 1 і 2, показує достатньо високу точність вимірювань, одержаних в результаті проведення експериментальних досліджень. Приміром, максимальна величина відносної похибки вимірювань для тангенційної деформації пневматичної шини не перевищує 13,2%, а для більшої частини параметрів – 5%, що є цілком задовільним для випробувань пневмоколісного рушія в умовах, близьких до реальних [2, 6, 8].

Максимальна помилка у відліку показань при використанні в якості силовимірювального приладу динамометра розтягу ДОРМ-10 системи Токарєва з індикатором годинникового типу під час стендових випробувань пневмоколісного рушія не перевищувала 0,5 поділки або 77,74 Н.

Довжина мірної ділянки та обмірювання пневматичних шин виконувалася за допомогою мірної рулетки, максимальна помилка при відліку якої не перевищувала 0,5 мм. Тиск повітря в шинах вимірювався взірцевим манометром з поділкою 0,002 МПа, при цьому максимальна помилка у відліку складала 0,5 поділки або 0,001 МПа.

Під час стендових випробувань колеса з пневматичною шиною, його параметри реєструються на екрані ПК типу notebook через АЦП і за допомогою спеціальної програми отримані числові дані передаються в пакети програм MathCad і Microsoft Excel для їхньої подальшої обробки. Подальша обробка результатів передбачає відсіювання промахів та апроксимацію одержаних залежностей методами теорії помилок і регресійного аналізу [4].

Висновки. Метрологічне оцінювання результатів експериментальних досліджень роботи колеса з пневматичною шиною здійснювалося із врахуванням тільки статичних складових похибок вимірювальної апаратури, оскільки на випробувальному стенді досліджувалися встановлені режими.

Аналіз метрологічних характеристик вимірювальної апаратури показав, що максимальна величина відносної приведеної похибки вимірювань більшої частини основних параметрів силової взаємодії колеса з пневматичною шиною в контакті з опорною поверхнею руху не перевищує 5%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Балака М. М. Тенденції розвитку колісних землерийно-транспортних машин / М. М. Балака // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів, 6 – 8 листоп. 2012 р. : Тези доп. – К. : Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт., 2012. – Ч. 1. – С. 83 – 84.

2. Експериментальні дослідження роботи колеса з пневматичною шиною на опорній поверхні, що деформується / М. М. Балака, Л. Є. Пелевін, Г. О. Аржаєв [та ін.] // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 1(8). – С. 132 – 139.

3. Пелевін Л. Є. Інформаційно-вимірювальне забезпечення стендових випробувань окремого колеса з пневматичною шиною / Л. Є. Пелевін, Г. О. Аржаєв, М. М. Балака // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2007. – № 70. – С. 65 – 71.

4. Болтян А. В. Теория инженерных исследований : учеб. пособие / А. В. Болтян, И. А. Горобец. – Севастополь : Вебер, 2001. – 140 с.

5. Тензометрия в машиностроении : справ. пособие / Макаров Р. А., Ренский А. Б., Боркунский Г. Х., Этингоф М. И. – М. : Машиностроение, 1975. – 287 с.

6. Василенко А. В. Методика расчета тяговых качеств колесного движителя с крупногабаритными пневматическими шинами землеройно-транспортных машин : дис. … канд. техн. наук : 05.05.04 / Василенко Андрей Владимирович. – Воронеж, 2000. – 244 с.

7. Завадский Ю. В. Планирование эксперимента в задачах автомобильного транспорта / Ю. В. Завадский. – М. : МАДИ, 1978. – 156 с.

8. Скорняков Е. С. Крупногабаритні шини автомобілів та тракторів : монографія / Е. С. Скорняков. – Дніпропетровськ : Пороги, 2000. – 264 с.