

УДК 681.269

О. М. Галузінський, студент гр. ПМ-81мп, старший викладач Зайцев В. М.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПОЛОЖЕННЯ ЦЕНТРУ ВАГИ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. Зазначається вплив позацентрального розміщення вантажів на економічні показники експлуатації рухомого складу та колійної інфраструктури залізничного транспорту. Для об'єктивного визначення відхилення центру ваги від поперечної та поздовжньої симетрії вагону вимагається розробка вимірювальних систем положення центру ваги рухомого об'єкта відносно рейок платформи. Метрологічні якості визначаються алгоритмічним забезпеченням функціонування даних систем. Проведені експериментальні дослідження для перевірки працездатності розроблених алгоритмів.

Ключові слова: ваговимірювальна система, центр ваги.

ВСТУП

Залізничний транспорт сьогодні є стратегічно важливою для економіки артерією перевезення різних видів вантажів з країн Європи та Азії і застосовується практично на будь-якому великому підприємстві. Забезпечення ефективного використання шляхів сполучення одна із головних економічних задач держави. З цього випливає проблема забезпечення безпеки руху, недотримання правил якого призводить до швидкого зносу рухомого парку залізниці та самого залізнично-колійного господарства. Це в свою чергу підвищує затрати на їх експлуатацію та знижує економічну доцільність використання. Таким чином технічний рівень транспорту й самих залізничних шляхів безпосередньо впливає на економічні показники транспортної галузі та економіки України в цілому.[1]

Для залізничних вагонів встановлені правила перевезення і тарифів залізничного транспорту України, за якими загальний центр тяжіння вагонів центр ваги (ЦВ_в) повинен розташовуватися, як правило, на лінії перетину поздовжньої і поперечної площин симетрії вагону. У випадках, коли дану вимогу неможливо виконати з об'єктивних причин, або виконання потребує значних додаткових витрат на обладнання та проведення процедури центрування вантажу допускається нормоване зміщення ЦВ_в щодо поздовжньої і поперечної площин симетрії вагона.[3]

Для контролю їх завантаженості необхідне використання вимірювальних системи визначення положення центру ваги залізничних вагонів. Дане рішення зменшить аварії на шляхах та підвищить строк експлуатації залізничних колій.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою роботи являється експериментальна перевірка функціонування розробленого алгоритмічного забезпечення систем визначення положення центра ваги.

Для перевірки був розроблений експериментальний стенд (рис. 1), який базується на металевій платформі на якій закріплено чотири ваговимірювальні тензорезисторні перетворювачі L6D паралелограмного типу виробництва компанії ZemicUSA (найбільша границя зважування 5 кг, категорія точності С3). До експериментальної установки входять чотири аналого-цифрових

перетворювачів тензосигналів сигма-дельта типу AD105 (АЦП) виробництва компанії НВМ (чутливість $\geq 0,1$ мкВ/поділку, похибки $e < 1/6000$ діапазону вимірювання), конвектор RS-485/USB, та персональний комп'ютер на базі процесору Intel Core i7-7700k під управлінням операційної системи Windows 10 Pro. Вантажоприймальна платформа виконана із скла на яку нанесена координатна сітка. Розроблені алгоритми функціонування вимірювальної системи реалізовані в вигляді програмного забезпечення на високорівневій мові програмування Python. Програмні структурні модулі забезпечують одночасне зчитування кодів з АЦП, їх алгоритмічну обробку та візуалізацію результатів.

Основну увагу було приділено дослідженню метрологічних характеристик вимірювальної системи. Основним критерієм були вибрані абсолютні похибки визначення загальної маси, координат центру мас та параметрів статичної характеристики.

Для цього були проведені експерименти по калібруванню системи, калібруванні кожного датчика та роботі системи в режимі вимірювань.

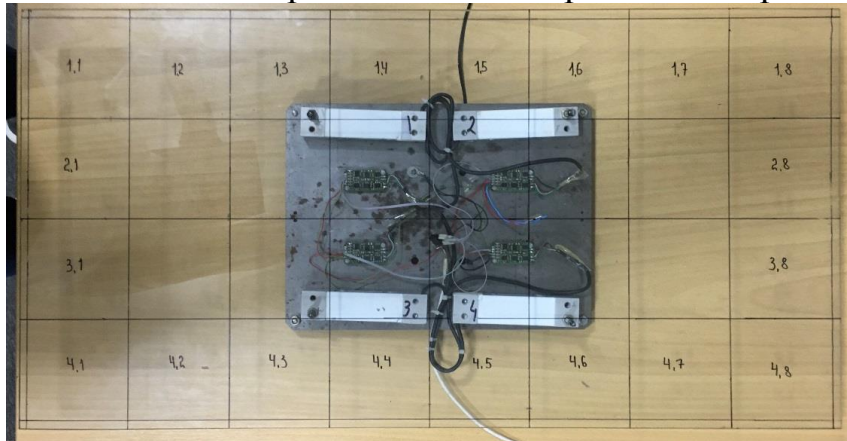


Рисунок 1. Експериментальний стенд

Математичну модель задачі аналізу можна записати у вигляді рівнянь статичної рівноваги:

$$\begin{aligned} G_0 &= R_1 + R_2 + \dots + R_n; \\ X_0 \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n) &= X_1 \cdot R_1 + X_2 \cdot R_2 + \dots + X_n \cdot R_n; \\ Y_0 \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n) &= Y_1 \cdot R_1 + Y_2 \cdot R_2 + \dots + Y_n \cdot R_n, \end{aligned} \quad (1)$$

де:

G_0 – вага;

R_i – приріст зусилля, що викликане дією сили G_0 при координатах центру мас (X_0, Y_0) ;

X_i, Y_i – координати тензодатчиків де $i = 1 \dots 4$;

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Градування датчиків. Методика градування передбачала трикратне послідовне навантаження та розвантаження кожного окремо датчика 12 мірами маси. Результати регресійного аналізу отриманих даних представлені нижче на рис. 2 та рис 3.

Визначені чутливості датчиків становили для першого датчика – 200,08, другого – 192,74, третього – 193,13 і четвертого – 196,13, а відносні похибки

вимірювання приведені до верхньої границі зважування датчиків (5 кг) не перевищували 0,025%.

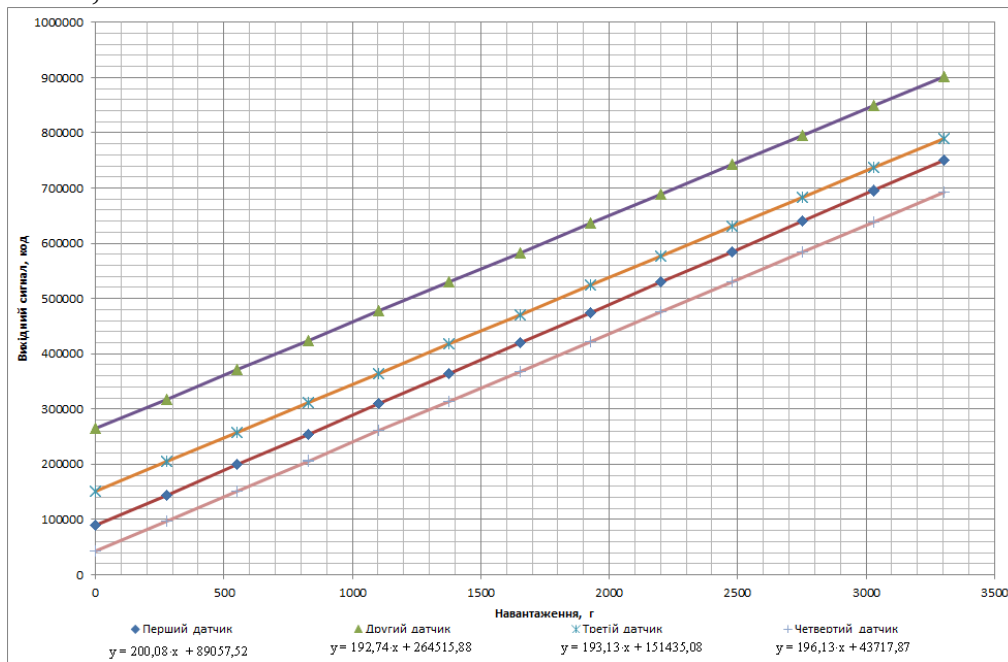


Рисунок 2. Статичні характеристики датчиків

Графіки похибок датчиків представлено нижче (рис. 3):

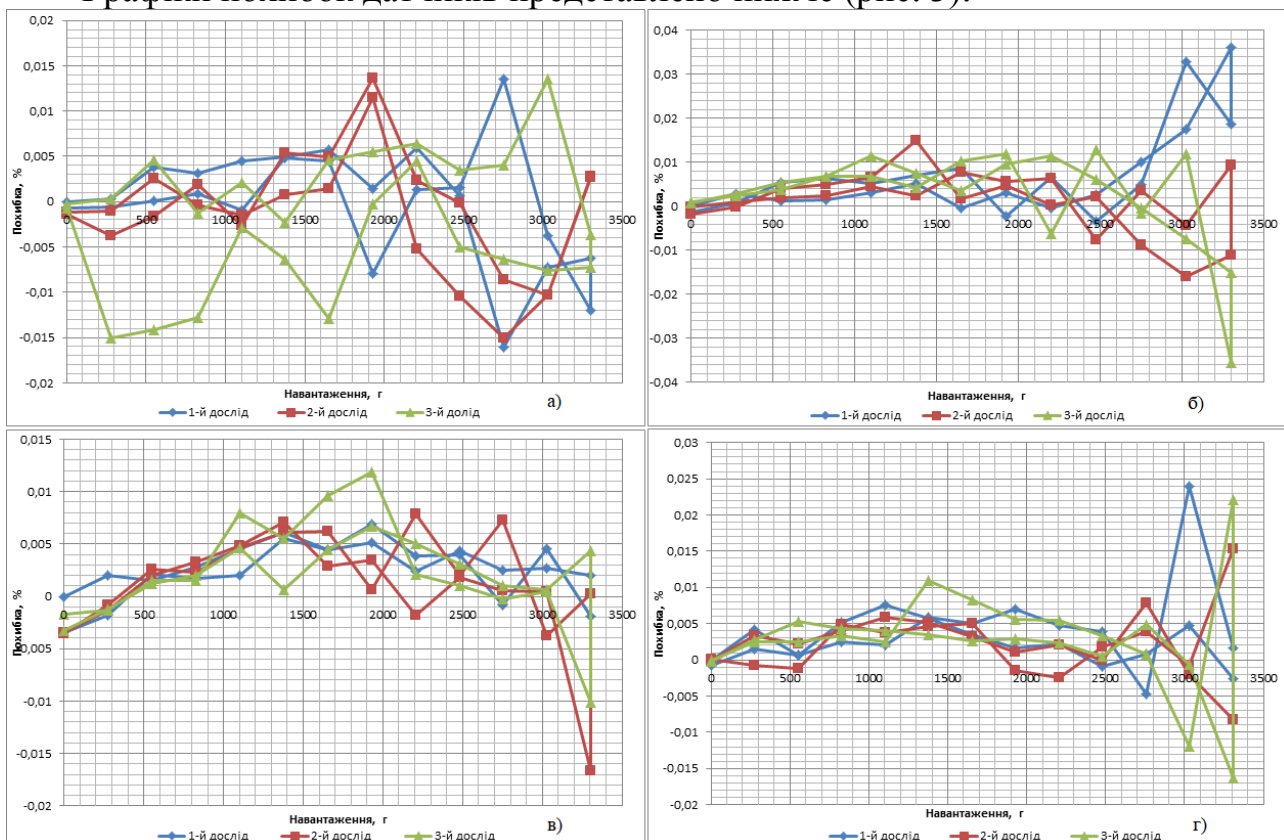


Рисунок 3. Похибки датчиків: а) похибка першого датчика, б) похибка другого датчика, в) похибка третього датчика, г) похибка четвертого.

Калібрування системи. Система рівнянь (1) для n перетворювачів по відношенню до координат точок силових реакцій (X_i, Y_i) $2 \cdot (n-1)$ раз статично невизначена. Для розкриття невизначеності її потрібно доповнити, наприклад

для $n = 4$, ще шістьма рівняннями. Таким чином модель прийме вигляд (2):

$$\begin{cases} R_{11} \cdot X_1 + R_{21} \cdot X_2 + R_{31} \cdot X_3 + R_{41} \cdot X_4 = G_1 X_{11} \\ R_{11} \cdot Y_1 + R_{21} \cdot Y_2 + R_{31} \cdot Y_3 + R_{41} \cdot Y_4 = G_1 Y_{11} \\ R_{12} \cdot X_1 + R_{22} \cdot X_2 + R_{32} \cdot X_3 + R_{42} \cdot X_4 = G_2 X_{22} \\ R_{12} \cdot Y_1 + R_{22} \cdot Y_2 + R_{32} \cdot Y_3 + R_{42} \cdot Y_4 = G_2 Y_{22} \\ R_{13} \cdot X_1 + R_{23} \cdot X_2 + R_{33} \cdot X_3 + R_{43} \cdot X_4 = G_3 X_{33} \\ R_{13} \cdot Y_1 + R_{23} \cdot Y_2 + R_{33} \cdot Y_3 + R_{43} \cdot Y_4 = G_3 Y_{33} \\ R_{14} \cdot X_1 + R_{24} \cdot X_2 + R_{34} \cdot X_3 + R_{44} \cdot X_4 = G_4 X_{44} \\ R_{14} \cdot Y_1 + R_{24} \cdot Y_2 + R_{34} \cdot Y_3 + R_{44} \cdot Y_4 = G_4 Y_{44} \\ R_{11} \cdot X_1 + R_{21} \cdot X_2 + R_{31} \cdot X_3 + R_{41} \cdot X_4 = G_1 X_{11} \\ R_{11} \cdot Y_1 + R_{21} \cdot Y_2 + R_{31} \cdot Y_3 + R_{41} \cdot Y_4 = G_1 Y_{11} \\ R_{12} \cdot X_1 + R_{22} \cdot X_2 + R_{32} \cdot X_3 + R_{42} \cdot X_4 = G_1 X_{22} \\ R_{12} \cdot Y_1 + R_{22} \cdot Y_2 + R_{32} \cdot Y_3 + R_{42} \cdot Y_4 = G_1 Y_{22} \\ R_{13} \cdot X_1 + R_{23} \cdot X_2 + R_{33} \cdot X_3 + R_{43} \cdot X_4 = G_1 X_{33} \\ R_{13} \cdot Y_1 + R_{23} \cdot Y_2 + R_{33} \cdot Y_3 + R_{43} \cdot Y_4 = G_1 Y_{33} \\ R_{14} \cdot X_1 + R_{24} \cdot X_2 + R_{34} \cdot X_3 + R_{44} \cdot X_4 = G_1 X_{44} \\ R_{14} \cdot Y_1 + R_{24} \cdot Y_2 + R_{34} \cdot Y_3 + R_{44} \cdot Y_4 = G_1 Y_{44} \end{cases} \quad (2)$$

де:

$R_{1i}, R_{2i}, R_{3i}, R_{4i}$ – значення навантажень перетворювачів в i -ому експерименті де $i = 1 \dots 4$;

X_i, Y_i – координати тензодатчиків де $i = 1 \dots 4$;

$G_i = R_{1i} + R_{2i} + R_{3i} + R_{4i}$ – значення тестової ваги;

X_{ii}, Y_{ii} – координати прикладання тестового навантаження.

Значення навантажень R_{ij} в системі рівнянь (2) визначаються згідно статичних характеристик тензоперетворювачів

$$R_{ij} = (K_{ij} - K_{0i}) / S_i, \quad (3)$$

де:

S_i – чутливість i -го перетворювача;

K_{i0} – початковий вихідний код i -го перетворювача;

K_{ij} – вихідний код i -го перетворювача при j -ом навантаженні.

В загальному випадку визначення чутливостей та початкових вихідних кодів входять до процедур калібрування. Тому кількість коефіцієнтів, які потрібно визначити, і як наслідок кількість рівнянь збільшується до $2 \cdot (2n-1)$. При доекспериментальному визначенні K_{0i} , та $n = 4$ кількість рівнянь системи становить 12.

Методика калібрування включала наступні процедури: 1) визначення K_{0i} кодів з датчиків ненавантажених ваг; 2) навантаження платформи ваг мірами мас відомих значень в точки з відомими координатами; 3) фіксація значень координат (X_{0j}, Y_{0j}) розташування мір навантажень, вихідних кодів K_{ij} для $i = 1 \dots 4$ датчиків, в $j = 1 \dots 6$ навантаженнях; 4) визначення з системи дванадцяти рівнянь (2)-(3) восьми координат (X_i, Y_i) та чотирьох значень S_i .

В нашому випадку отримали в мм: $X_1 = 28,014$, $Y_1 = 31,483$; $X_2 = 54,394$, $Y_2 = 29,410$; $X_3 = 28,175$, $Y_3 = 9,012$; $X_4 = 54,567$, $Y_4 = 10,070$.

Задача вимірювання. Із рівнянь статички (1) можна отримати систему рівнянь вимірювання ваги G_0 та координати центра ваги вантажу (X_0, Y_0) . Із

першого рівняння можна знайти вагу вантажу. Оскільки вага дорівнює сумі реакції датчиків, то:

$$G_0 = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (4)$$

Із другого та третього можна знайти відповідно координати центру ваги X_0 , Y_0 , таким чином маємо:

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{R_1}{G_0} \cdot X_1 + \frac{R_2}{G_0} \cdot X_2 + \frac{R_3}{G_0} \cdot X_3 + \frac{R_4}{G_0} \cdot X_4 \\ Y_0 &= \frac{R_1}{G_0} \cdot Y_1 + \frac{R_2}{G_0} \cdot Y_2 + \frac{R_3}{G_0} \cdot Y_3 + \frac{R_4}{G_0} \cdot Y_4 \end{aligned} \quad (5)$$

Підставивши координати датчиків отриманих на етапі калібрування та покази з датчиків за (5) можна отримати координати центру ваги.

Оцінку точності функціонування вимірювальної системи проводили:

- за відхиленнями значень отриманих з виразу (4) G_{0j} та значень ваги мір мас, які використовувалися при навантаженні платформ;
- за відхиленням значень отриманих з виразу (5) (X_{0j}, Y_{0j}) , та координат встановлення тестових навантажень (X_{ii}, Y_{ii}) ;
- за відхиленням значень S_i отриманих при рішенні системи рівнянь (2) та значень чутливостей, які отримані при індивідуальному градуванні кожного датчика окремо.

Основними складовими похибки визначення координат центру мас являються похибки вимірювання силового навантаження кожного датчика та похибок просторового розташування калібрувальних навантажень у вибраній системі координат.

За всіма критеріям відносні похибки не перевищили 0,025%.

ВИСНОВОК

Експериментальні дослідження показали працездатність розроблених алгоритмів функціонування системи визначення загальної маси та координат центру ваги рухомих об'єктів в системі координат пов'язаних з вимірювальними перетворювачами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Швець А. О. Вплив позовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах на їх динамічні показники [Текст] // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту – 2018. - № 5. – С. 115-128.
- [2] Романов А. Н. Определение смещение центра тяжести груза в железнодорожном вагоне / А. Н. Романов, Ф. И. Гиревка, Д. Г. Заворотный // ПИКАД – 2007. – № 3. — С. 34-35.
- [3] Збірник № 17 Правил перевезення і тарифів залізничного транспорту України. – Київ : САМ, 2005. – 176 с.
- [4] Інструкція про порядок застосування засобів ваговимірювальної техніки на залізничному транспорті України: Наказ Міністерства інфраструктури України 31.07.2012 № 442.

Науковий керівник – старший викладач Зайцев В. М.