



УДК 629.424.1

COMPREHENSIVE EVALUATION OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS IN TENSIOMETRIC STUDIES OF GAS DISTRIBUTION MECHANISMS IN TRANSPORT ENERGY INSTALLATIONS

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ ТРАНСПОРТНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Lohvinenko O.A. / Логвіненко О.А.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-5731-7995

Ukrainian State University of Railway Transport,

Kharkiv, Feuerbach Square, 7, 61050

Український державний університет залізничного транспорту,

Харків, майдан Фейєрбаха, 7, 61050

Анотація. У статті розглянуто питання підвищення достовірності тензометричних вимірювань при дослідженні газорозподільних механізмів транспортних енергетичних установок. Визначено основні фактори, що впливають на похибки вимірювань, зокрема характеристики тензорезисторів, апаратури та умов експерименту. Запропоновано методичний підхід до комплексної оцінки метрологічних характеристик, який враховує систематичні та випадкові складові похибок. Проведено розрахунки для транспортної енергетичної установки ЧН26/27, що підтвердили ефективність підходу. Отримані результати можуть бути використані для підвищення точності експериментів і вдосконалення динамічних моделей газорозподільних систем.

Ключові слова: тензометричні вимірювання, метрологічні характеристики, газорозподільний механізм, транспортні енергетичні установки, похибка вимірювань.

Вступ.

Сучасний розвиток енергетики для транспортної сфери, зокрема у машинобудуванні, вимагає підвищення ефективності та надійності енергетичних установок. Одним із ключових напрямів є вдосконалення газорозподільних механізмів, від коректної роботи яких залежать показники паливної економічності, екологічності та довговічності енергетичних установок транспорту. Динамічні процеси в елементах кулачкового механізму газорозподілу мають складний характер і супроводжуються значними навантаженнями, що зумовлює необхідність їх глибокого експериментального дослідження. Для верифікації відповідних моделей та оцінки робочих процесів широко застосовуються тензометричні методи вимірювання напружено-



деформованого стану деталей. Проте результати таких досліджень значною мірою залежать від метрологічних характеристик вимірювальних каналів. Недостатня увага до комплексного аналізу похибок може призвести до спотворення динамічних параметрів і, як наслідок, до некоректних висновків щодо працездатності механізму. Тому виникає актуальне завдання, щодо проведення всебічної оцінки метрологічних характеристик при тензометричних дослідженнях газорозподільних механізмів транспортних енергетичних установок, що дасть змогу підвищити достовірність результатів та забезпечити обґрунтованість інженерних рішень у процесі модернізації двигунів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У сучасних дослідженнях проблематики динаміки газорозподільних механізмів транспортних енергетичних установок значна увага приділяється створенню адекватних математичних і фізичних моделей. Разом з тим, більшість досліджень зосереджується на окремих складових похибки тензометричних вимірювань, тоді як питання їх комплексного врахування та взаємного впливу залишаються недостатньо висвітленими. Це визначає потребу в удосконаленні методики оцінки метрологічних характеристик тензометричних вимірювань у дослідженнях газорозподільних механізмів.

Дослідження останніх років у світовій практиці підтверджують актуальність цієї проблематики. Так, у роботі [1] проведено теоретичний і експериментальний аналіз динамічних характеристик клапанного механізму, де показано, що гнучкість елементів і монтажні зазори істотно впливають на резонансні частоти та точність відтворення фаз газорозподілу. У оглядовій публікації [2] з проблематики високотемпературних тензорезисторів відзначається, що стабільність гейдж-фактора, температурний дрейф та адгезія клеїв залишаються головними джерелами систематичних похибок під час динамічних випробувань. В роботі [3], що присвячена методам калібрування багатокомпонентних тензорезисторних елементів, підкреслюється необхідність використання частотнозалежних калібрувальних функцій, оскільки сталі коефіцієнти чутливості не забезпечують належної точності у швидкоплинних процесах. У



публікації [4] наголошено на важливість урахування динамічних ефектів у калібрувальних методиках, що особливо актуально для вимірювань у системах із високими швидкостями навантаження, до яких належать кулачкові механізми газорозподілу. В науковій праці [5] розглянуто конструктивні рішення для підвищення стабільності сигналів у бездротових динамометричних системах, що також демонструє значний вплив конструкції вимірювального елемента на метрологічні характеристики. У дослідженні [6] обґрунтовано методичний підхід до вивчення динаміки газорозподільного механізму транспортних енергетичних установок, що поєднує тензометричні вимірювання з математичним моделюванням. Показано, що коректний вибір параметрів вимірювального ланцюга та оцінка впливу похибок на результати аналізу дозволяють підвищити достовірність експериментальних даних і точність верифікації динамічних моделей. У роботі [7] підкреслено потребу уніфікації процедур метрологічної оцінки тензометричних досліджень для забезпечення відтворюваності та порівнянності результатів. В патентному рішенні [8] описуються практичні схеми інтеграції тензодатчиків у елементи клапанного механізму, що дозволяє мінімізувати похибки вимірювань завдяки скороченню додаткових ланок у вимірювальному колі.

Таким чином, сучасні наукові результати авторів свідчать про те, що ключовим напрямком розвитку є комплексна оцінка метрологічних характеристик у тензометричних дослідженнях газорозподільних механізмів, що передбачає одночасний аналіз систематичних і випадкових похибок, а також врахування впливу конструктивних, температурних і динамічних факторів. Так на рисунку 1 наведено структурну схему, яка ілюструє вплив метрологічних характеристик на результати тензометричних досліджень газорозподільних механізмів.

Метою дослідження є підвищення достовірності результатів тензометричних вимірювань при експериментальному дослідженні роботи газорозподільних механізмів транспортних енергетичних установок шляхом комплексної оцінки метрологічних характеристик вимірювального ланцюга.



Основна увага приділяється аналізу та кількісній оцінці систематичних і випадкових похибок, зумовлених властивостями тензорезисторів, параметрами апаратури та умовами проведення експерименту. Реалізація цього підходу дозволить сформувати методичну базу для підвищення точності та відтворюваності експериментальних даних, що є необхідним для подальшої верифікації динамічних моделей і удосконалення конструкцій газорозподільних механізмів транспортних енергетичних установок.

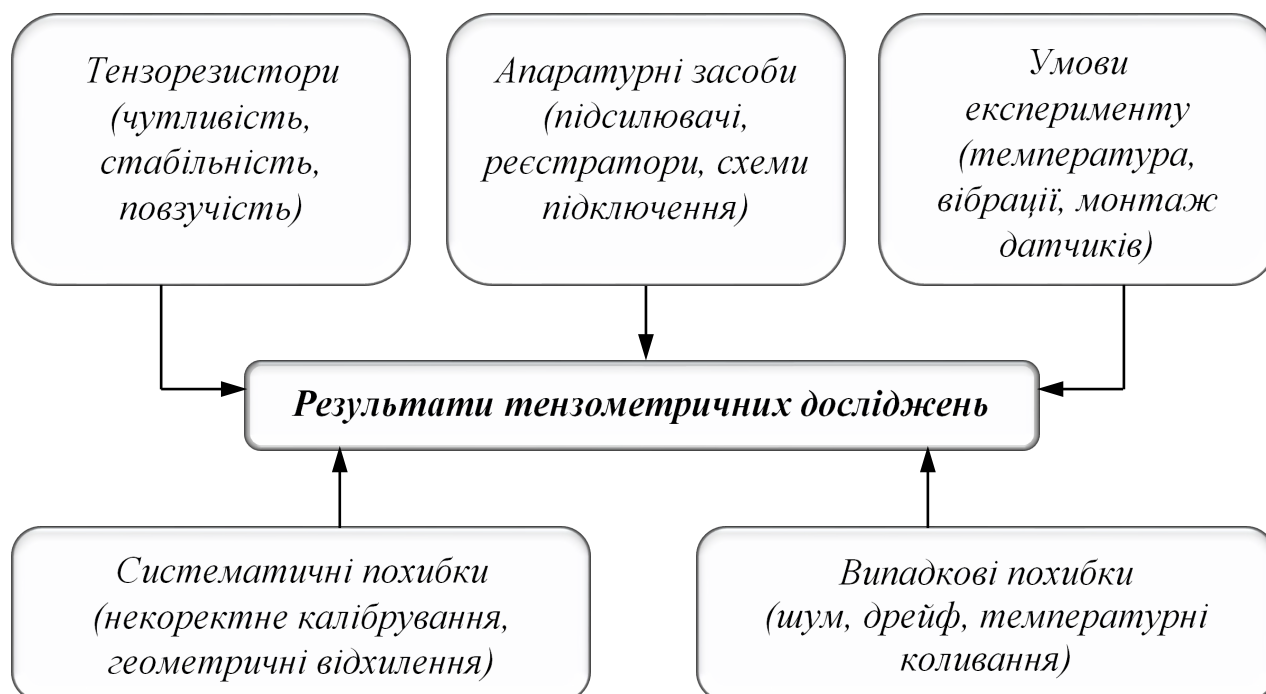


Рисунок 1 – Вплив метрологічних факторів на результати тензометричних досліджень

Авторська розробка

Основний текст.

Дотепер у дослідженнях динаміки газорозподільних механізмів широке використання одержали одномасові та багатомасові динамічні моделі, для яких першочерговою необхідністю є визначення імовірних значень їх відповідних параметрів і, у першу чергу, коефіцієнтів жорсткості та демпфірування. Одним із шляхів їх отримання є проведення тензометричних досліджень в рамках яких особливого значення набуває оцінка погрішностей тензометричних вимірювань. Складність виділеної задачі полягає в тому, що на шукану погрішність впливає



велика кількість факторів, основними з яких є: 1) параметри метрологічних характеристик (МХ) тензорезисторів (наведені в нормативно технічній документації – паспорті, технічних умовах та ін.); 2) параметри МХ тензорезисторів, які додатково обумовлені для реальних умов їх застосування; 3) характеристики погрішності тензометричної апаратури (приладів, вимірювальних систем, вимірювально-обчислювальних комплексів), які приведені в технічній документації за результатами метрологічної атестації; 4) параметри ліній зв'язку; 5) умови проведення експерименту; 6) застосована схема виміру. На даний час досить складним завданням є визначення характеристик, що наведені у пунктах 1-3. Насамперед зазначене визначається тим, що тензорезистор можна закріпити на конструкції лише один раз. Це зумовлює необхідність оцінки МХ не для кожного окремого тензорезистора, а на основі вибірки з усієї партії. При цьому значення МХ, отримані для партії, вважаються типовими для кожного окремого тензорезистора, тобто індивідуальні характеристики елемента (які є детермінованими) визначають через статистичні показники, отримані з випадкової вибірки. Це повністю стосується і до ліній зв'язку.

Що відноситься до значення деформації, яку вимірює прилад, то її слід розглядати як випадкову величину з дисперсією рівною квадрату середнього квадратичного відхилення. При цьому найбільша погрішність може розглядатися як сума відповідних систематичної $\Delta \varepsilon_C$ та випадкової $\Delta \varepsilon_B$ складових

$$\Delta \varepsilon_{\Sigma} = \Delta \varepsilon_C + \Delta \varepsilon_B.$$

Однією з ключових особливостей визначення систематичної похибки, яка переважно зумовлена відхиленням фактичних геометричних параметрів тарувальної балки рівного опору від їх розрахункових значень, є необхідність отримання тарувальних характеристик для всієї вимірювально-реєструючої системи. Це охоплює всі компоненти ланцюга – від первинного перетворювача розташованого на балці до фіксації результатів на реєструючому пристрої



тензометра, що застосовується під час експериментальних досліджень.

Слід відмітити, що тензодатчики підлягають обов'язковому таруванню. Для цього може бути використана, наведена на рисунку 2, балка рівного опору, основною властивістю якої є те, що вона має епюру деформацій у вигляді прямокутника. Це дає можливість точно задати величину деформацій за допомогою навантаження P .

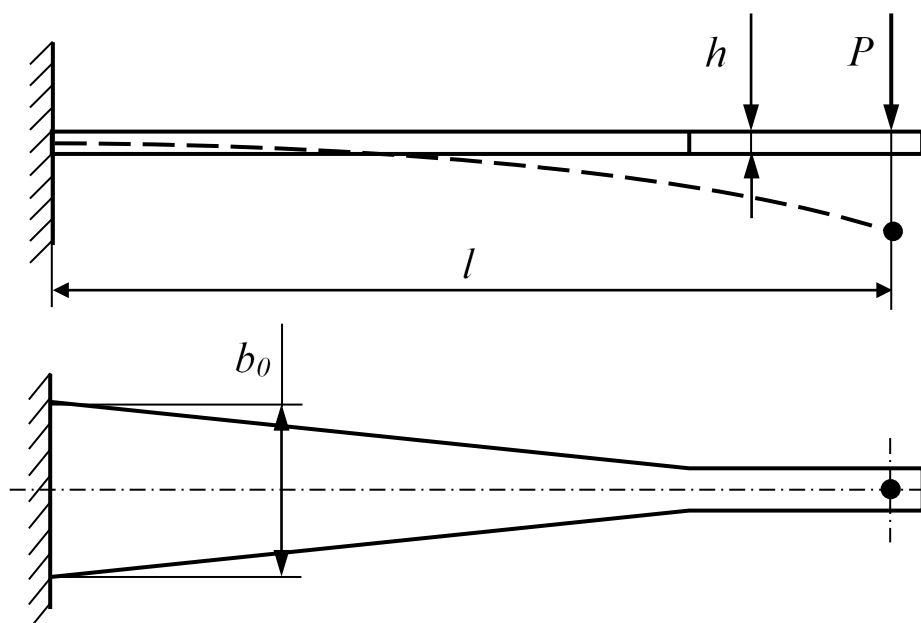


Рисунок 2 – Тарувальна балка

Авторська розробка

Деформація робочої ділянки балки визначається розрахунковим шляхом за формулою

$$\varepsilon = \frac{6lP}{b_0 h^2 E}, \quad (1)$$

де l – довжина балки,

P – зусилля на кінці балки,

b_0 – ширина балки,

h – товщина балки,

E – модуль пружності матеріалу балки.

Стандартна балка рівного опору, яка використовується при тензометричних



іспитах і обов'язково проходить повірку в метрологічних установах має наступні розміри: $l = 0,5 \text{ м}$; $b_0 = 0,06 \text{ м}$; $h = 0,01 \text{ м}$. Підставляючи дані у формулу (1), отримується постійна для балки: $\varepsilon = 0,025 P, \text{овд}$ (одиниць відносної деформації). З урахуванням того, що допуск на непаралельність балки рівного опору складає $\pm 0,0025 \text{ мм}$, а допуск на товщину складає $\pm 0,01 \text{ мм}$ максимальна систематична погрішність вимірювань з урахуванням допуску на товщину балки рівного опору буде складати $\Delta \varepsilon_C = 4 \%$.

Якщо прийняти до уваги, що параметри повзучості та дрейфу вихідного сигналу під час іспиту приймають значення в межах допуску з однаковою довірчою імовірністю і закон їхнього розподілу рівномірний в цих межах, то погрішність вимірювань можна визначити за наступною залежністю

$$\Delta \varepsilon = \pm \left\{ \left| 0,01 \cdot \tilde{P}_t \cdot \varepsilon \right| + 2 \sqrt{\varepsilon^2 \left[\left(\frac{S_k}{\tilde{K}} \right)^2 + \left(\frac{S_\phi}{\tilde{\Phi}} \right)^2 + (0,01 \cdot S_{\Pi t})^2 \right]} + \right. \\ \left. + \left(\frac{l}{K\Phi} \right)^2 \times \left\{ 2 \cdot \left[\frac{S_t(t-t_{\text{ноч}})}{t-t_0} \right]^2 + 2S_{\Delta t}^2 + \sigma_\xi^2 + \frac{l}{2} \left(\frac{\xi}{R} \right)^2 \times \left[S_r^2 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{\bar{r}}{R} \right)^2 \times \left(\frac{\delta_{Rn} \bar{R} \cdot 10^{-2}}{2\sqrt{3}} \right)^2 \right] + \left[\beta(t-t_{\text{ноч}}) \frac{l}{R} \times S_{(r_{\text{но1}}-r_{\text{но2}})} \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[2 \frac{\bar{r}_{\text{но}}}{r} \beta(t-t_{\text{ноч}}) \right]^2 \times \frac{l}{4} \left(\frac{l}{R} \right)^2 \times \left[S_{(r_1-r_2)}^2 + \left(\frac{\bar{r}}{R} \right)^2 \times \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times \left(\frac{\delta_{Rr} \bar{R} \cdot 10^{-2}}{2\sqrt{3}} \right)^2 \right] \right] \right\} \right\} \quad (2)$$

де S_k – середнє квадратичне відхилення (СКВ) чутливості; $\tilde{K}, K$ – відповідно, математичне очікування та середнє значення чутливості для партії тензорезисторів; S_ϕ – середня квадратична погрішність функції впливу



температури на чутливість; $\tilde{\Phi}, \Phi$ – відповідно, математичне очікування та середнє значення функції впливу температури на чутливість; $S_{\Pi t}$ – СКВ повзучості при температурі t в момент часу $\tau (\tau \leq 1 \text{ ч.}) \%$; S_t – СКВ температурних характеристик опору; t – розрахункове значення температури, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ноч}}$ – температура початкового звіту на тензометричному приладі, $^{\circ}\text{C}$; t_0 – нормальне значення температури, $^{\circ}\text{C}$; S_d – СКВ дрейфу вихідного сигналу; σ_{ξ} – СКВ погрішності тензорезисторної апаратури, млн^{-1} ; ξ – температурна характеристика опору тензорезистора, млн^{-1} ; $\bar{R}$ – середнє значення опору тензорезисторів, Ом ; S_r – СКВ опору лінії зв'язку, Ом ; $\bar{r}$ – середнє значення опору лінії зв'язку при нормальних умовах, Ом ; δ_{Rn} – відношення різниці граничних значень опорів тензорезисторів у партії до номінального опору, $\%$; β – температурний коефіцієнт опору матеріалу лінії зв'язку, $(^{\circ}\text{C})^{-1}$; $S_{(r_{\text{но1}}-r_{\text{но2}})}$ – СКВ опору ділянці лінії зв'язку, яка проходить зону нагріву, Ом ; $\bar{r}_{\text{но}}$ – середнє значення при нормальних умовах ланки лінії зв'язку, яка знаходиться у зоні нагріву, Ом ; r – опір лінії зв'язку при нормальних умовах, Ом ; $S_{(r_1-r_2)}$ – СКВ різниці опорів ліній зв'язку робочих та компенсаційних тензорезисторів, Ом ; δ_{Rr} – відношення різниці граничних значень опорів тензорезисторів у групі до номінального опору, $\%$.

Нижче в якості прикладу представлені дані щодо комплексної оцінки метрологічних характеристик при тензометричному дослідженні кулачкового механізму газорозподілу транспортної енергетичної установки (ТЕУ) ЧН 26/27.

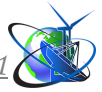
Вихідні дані:

$$\bar{R} = 200 \text{ Ом}; \delta_{Rr} = 0,1 \%; \delta_{Rn} = 0,2 \%; \tilde{K} = 2,13; S_k = 0,01;$$

$$\tilde{P}_t = -2,0 \%; S_{\Pi t} = 0,3 \%; \tilde{\Phi} = 1,01; S_{\Phi} = 0,01;$$

$$D_t = 43 \text{ мкОм} / \text{Ом}; S_{D_t} = 20 \text{ мкОм} / \text{Ом}; \xi_{tm} = 290 \text{ мкОм} / \text{Ом};$$

$$S_t = 90 \text{ мкОм} / \text{Ом}; t_m = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$



Характеристика погрішності тензометричної апаратури:

$$\sigma_{\xi} = 20 \text{ мкОм} / \text{Ом}.$$

Параметри лінії зв'язку:

$$\bar{r} = 2,5 \text{ Ом}; \quad S_z = 0,005 \text{ Ом}; \quad S_{(r_1-r_2)} = 0,007 \text{ Ом};$$

$$\bar{r}_{no} = 0,3 \text{ Ом}; \quad S_{(r_{no1}-r_{no2})} = 0,0006 \text{ Ом}; \quad \beta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ 1} / ^\circ\text{C}.$$

Умови проведення експерименту:

$$\tau \leq 1 \text{ год.}; \quad t_{ноч.} = t_0 = 20 ^\circ\text{C}; \quad t = 25 ^\circ\text{C}.$$

Абсолютна погрішність проведення тензометричних досліджень ТЕУ ЧН26/27 з урахуванням даних, що розрахована за допомогою формули (2), склала $\Delta\varepsilon = 85 \text{ овод}$. Отже максимальна відносна випадкова погрішність тензометричних досліджень кулачкового механізму газорозподілу ТЕУ ЧН26/27 з урахуванням усіх перелічених вище параметрів, складає:

$$\Delta\varepsilon_B = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \times 100 = \pm \frac{85}{2000} \times 100 = \pm 4,25 \%. \quad (3)$$

При цьому загальна погрішність тензометричних вимірювань $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ знаходиться в межах від 0 до 8,25%.

Висновки.

В статті наведені матеріали щодо комплексної оцінки метрологічних характеристик тензометричних вимірювань газорозподільних механізмів транспортних енергетичних установок. Отримані залежності для оцінки систематичних і випадкових похибок дозволяють підвищити достовірність вимірювань і забезпечити ефективну верифікацію динамічної моделі механізму. Запропонований в роботі підхід, методичні особливості проведення тарировочних експериментів та розрахункові формули можуть бути рекомендовані до використання при оцінці погрішностей тензометричних вимірювань в дослідженнях механізмів газорозподілу енергетичних установок транспорту.



Література:

1. Hu B., Li Y., Yin L. (2024). Theoretical and experimental analysis of dynamic characteristics for a valve train system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 21 (19), 6328. <https://doi.org/10.3390/s21196328>
2. Xiang L., Zhongkai Z., Jiaying W., Meng W., Tao L., Yantao L., Qing T., Rui Q., Zhaojun L., Bian T. (2025). Future development directions of high-temperature strain gauges: a comprehensive review of structure and performance characteristics. *Nanoscale Advances*, Issue 14, 7, 4232-4251. <https://doi.org/10.1039/D5NA00039D>
3. Santamaría L., Vega M., Garcia D.M., Argüelles D.K., Oro J. (2024). Different calibration methods for a three-component strain gauge balance to measure aerodynamic forces on airfoils. *Sensors and Actuators A Physical*, 374, 115511. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115511
4. Prato A., Improta A., Di Lernia M., Nobile S., Facello A., Mazzoleni F., Germak A., Schiavi A. (2024). Static, continuous and dynamic calibration of force transducers: A comparative study on a low-force strain-gauge measuring device. *Measurement: Sensors*, 38, 101337. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101337>
5. Wang Q., Wu W., Zhao Y., Cheng Y., Liu L., Yan K. (2024). Design and research of a strain elastic element with a double-layer cross floating beam for strain gauge wireless rotating dynamometers. *Micromachines*, 15, 857. <https://doi.org/10.3390/mi15070857>
6. Логвіненко О.А. (2024). Особливості методичного підходу до дослідження динаміки механізму газорозподілу транспортних енергетичних установок. *SWorldJournal*, Issue №24, Part 1, 144–150. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-24-00-011>
7. Shahnawaz S., Mufti R.A., Ali M.A., Uz Zaman U.K., Baqai A.A., Zahid R., Aslam J., Bhutta M.U. (2025). A comprehensive review of experimental methods for the tribological evaluation of internal combustion engine valve-train. *ASME Journal of Tribology*, 148(2), 020801. <https://doi.org/10.1115/1.4069031>
8. U.S. Patent No. US20230234567A1. (2023). *Valvetrain testing using*



instrumented pushrod and strain gauge integration. U.S. Patent and Trademark Office.

<https://patents.google.com/patent/US20230213325A1/fr>

References.

1. Hu B., Li Y., Yin L. Theoretical and experimental analysis of dynamic characteristics for a valve train system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2024. 21 (19). 6328. <https://doi.org/10.3390/s21196328>
2. Xiang L., Zhongkai Z., Jiaxing W., Meng W., Tao L., Yantao L., Qing T., Rui Q., Zhaojun L., Bian T. Future development directions of high-temperature strain gauges: a comprehensive review of structure and performance characteristics. *Nanoscale Advances*. 2025. Issue 14. 7. 4232-4251. <https://doi.org/10.1039/D5NA00039D>
3. Santamaría L., Vega M., Garcia D.M., Argüelles D.K., Oro J. Different calibration methods for a three-component strain gauge balance to measure aerodynamic forces on airfoils. *Sensors and Actuators A Physical*. 2024. 374. 115511. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115511
4. Prato A., Improta A., Di Lernia M., Nobile S., Facello A., Mazzoleni F., Germak A., Schiavi A. Static, continuous and dynamic calibration of force transducers: A comparative study on a low-force strain-gauge measuring device. *Measurement: Sensors*. 2024. 38. 101337. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101337>
5. Wang Q., Wu W., Zhao Y., Cheng Y., Liu L., Yan K. Design and research of a strain elastic element with a double-layer cross floating beam for strain gauge wireless rotating dynamometers. *Micromachines*. 2024. 15. 857. <https://doi.org/10.3390/mi15070857>
6. Lohvinenko O.A. Osoblyvosti metodychnoho pidkhodu do doslidzhennia dynamiky mekhanizmu hazorozpodilu transportnykh enerhetychnykh ustanovok [Features of the methodological approach to studying the dynamics of the gas distribution mechanism of transport power plants]. *SWorldJournal*. 2024. Issue №24. Part 1. 144–150. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-24-00-011>
7. Shahnawaz S., Mufti R.A., Ali M.A., Uz Zaman U.K., Baqai A.A., Zahid R., Aslam J., Bhutta M.U. A comprehensive review of experimental methods for the tribological evaluation of internal combustion engine valve-train. *ASME Journal of Tribology*. 2025. 148(2). 020801. <https://doi.org/10.1115/1.4069031>
8. U.S. Patent No. US20230234567A1. *Valvetrain testing using instrumented pushrod and strain gauge integration*. U.S. Patent and Trademark Office. 2023. <https://patents.google.com/patent/US20230213325A1/fr>

Abstract. The article discusses the issue of improving the reliability of strain gauge measurements in the study of gas distribution mechanisms in transport power plants. The main factors affecting measurement errors are identified, the characteristics of strain gauges, equipment, and experimental conditions. A methodological approach to the comprehensive assessment of metrological characteristics is proposed, which considers systematic and random components of errors. Calculations were performed for the CH26/27 transport power plant, confirming the effectiveness of the approach. The results obtained can be used to improve the accuracy of experiments and refined dynamic models of gas distribution systems.

Key words: strain gauge measurements, metrological characteristics, gas distribution mechanism, transport power plants, measurement error.

Стаття відправлена: 18.10.2025 р.

© Логвіненко О.А.