

characteristics, and adaptability to environmental constraints. The obtained results demonstrate comparable fuel efficiency of both configurations, significant advantage of the series architecture in reducing CO and NO_x emissions, and lower HC levels in the parallel configuration. Meanwhile, the parallel configuration demonstrates higher dynamic flexibility and adaptability under variable driving conditions. The research has practical applications and is aimed at developing energy-efficient technologies in the field of specialized vehicles for military, expeditionary, or commercial purposes, where the combination of reliability, autonomy, and environmental compliance is particularly relevant. It was determined that the 3ChN 8.8/8.2 diesel engine demonstrated satisfactory technical and operational performance and adaptation potential to modern hybridization requirements. Its application is also feasible in the context of specialized transport, where economy, autonomy, and reliability are priorities.

Keywords: diesel; hybrid drive; operating modes; specific fuel consumption; Environmental indicators.

УДК 621.3

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.1.09

О.С. Шевченко, О.Ю. Лінков, А.В. Савченко

АНАЛІЗ ТА КАЛІБРУВАННЯ ДАТЧИКІВ ТИСКУ ДЛЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Забезпечення надійної, стабільної та ефективної роботи дизельного двигуна неможливе без точного контролю ключових параметрів паливної апаратури, серед яких особливу роль відіграє тиск палива в магістралі високого тиску. Динаміка зміни цього тиску дозволяє оперативно оцінювати технічний стан форсунок, паливного насоса високого тиску та інших елементів паливної системи. Сучасні електронні системи керування двигуном (включаючи рішення класу IoT) оперують значними обсягами даних, що вимагає створення високо-точних і швидкодіючих систем збору, обробки й аналізу даних у реальному часі. Одним з критичних елементів таких систем є датчик тиску палива, вибір якого має базуватися на ряді технічних критеріїв: достатній діапазон вимірювання (до 180 МПа і більше), висока частота відгуку (не менше 1 кГц), точність не гірше $\pm 1\%$, стійкість до температурних коливань та вібрацій, а також сумісність з апаратними і програмними засобами мікроконтролерів, зокрема Arduino Portenta H7. Додаткові вимоги обумовлені потребою універсальності — використання одного датчика як у сучасних двигунах із системою Common Rail, так і у старіших дизельних системах. Для коректної діагностики пульсацій тиску, які виникають при відкритті та закритті форсунок, необхідно забезпечити частоту вибірки не менше 24 кГц при максимальній частоті обертання колінчастого валу 4000 хв⁻¹. Це накладає вимоги як до характеристик самого датчика, так і до швидкодії мікроконтролера та АЦП. Для зниження навантаження на комунікаційні канали та сервери застосовано підхід туманних обчислень (edge computing), що дозволяє виконувати попередню обробку сигналів безпосередньо на рівні пристрою збору даних. У статті представлено методику вибору та калібрування н'єзрезистивного датчика Bosch 0281006188 для моніторингу тиску палива, а також результати аналізу лінійності та похибок вимірювання. Показано, що досягнута сумарна похибка становить $\sim 1\text{--}2\%$, що є прийнятним для задачі моніторингу технічного стану паливної апаратури дизельного двигуна в умовах експлуатації.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння; моніторинг тиску палива; вимірювання; діагностика форсунок; IoT; туманні обчислення; Arduino Portenta H7; н'єзрезистивний датчик; точність; похибка.

Вступ

Параметри роботи паливної апаратури безпосередньо впливають на ефективність і ресурс дизельного двигуна. Одним із найінформативніших параметрів є тиск палива у магістралі високого тиску. Аналіз динаміки зміни тиску дозволяє своєчасно виявити несправності форсунок, паливного насоса, фільтрів і інших елементів системи. У сучасних дизельних двигунах, а також у модернізованих старих конструкціях дедалі ширше застосовуються системи моніторингу на базі мікроконтролерів, що дозволяють реалізувати туманні обчислення (edge computing) для попередньої обробки великих обсягів даних безпосередньо на місці збору. Це підвищує ефективність аналізу і знижує навантаження на сервери та мережі. Для забезпечення достовірності вимірювань критично важливим є правильний вибір датчика тиску палива. Однак у ряді випадків публі-

чної документації на обрані промислові автомобільні датчики недостатньо, що вимагає проведення повного калібрування у власних умовах.

Аналіз публікацій та постановка задач дослідження

За даними фахових публікацій у галузі моніторингу паливних систем та діагностики двигунів, для адекватної фіксації швидкоплинних процесів необхідна частота вибірки не менше 10...250 кГц [1–3]. Так, у дослідженні Domenico Crescenzo [1] повідомляється, що сигнали від датчиків тиску в дизельних двигунах знімають при частоті до 250 кГц. Інші роботи [2] показують, що відносна похибка при невисоких частотах вибірки до 5 % виникає, коли нормована частота перевищує певний поріг ($\sim 20\%$ від резонансної частоти датчика). Окрім того, обґрунтовується важливість динамічного калібрування тиску (не лише статичного) — саме для таких швидкоплинних процесів, як у паливних магістралях дизеля

[3]. Ці дослідження визначають ключові вимоги до датчиків.

На основі аналізу, мета цього дослідження полягає в наступному:

1. Систематизувати технічні вимоги до датчика тиску у паливній системі дизельного двигуна (частота вибірки не менше 24 кГц, точність $\leq \pm 1\%$, діапазон і вихідний сигнал);
2. Провести порівняльний аналіз аналогових і цифрових датчиків, враховуючи легкість інтеграції з платою Arduino Portenta H7;
3. Вибрати оптимальний датчик (Bosch 0281006188);
4. Розробити та реалізувати методику динамічного калібрування датчика, включаючи вимірювальні параметри й програмне забезпечення;
5. Оцінити лінійність та похибки вимірювань;
6. Підготувати систему для подальших експериментів на реальному дизельному двигуні, з можливістю синхронізації по кутах колінчастого валу.

Викладення основного матеріалу

Постановка вимог до датчика тиску

При розробці системи моніторингу тиску в паливній магістралі дизельного двигуна було сформовано такі основні технічні вимоги до датчика тиску:

- Діапазон вимірювань: від 0 до не менше ніж 180 МПа (1800 бар), що відповідає типовим робочим тискам у сучасних системах дизельного уприскування з урахуванням можливого зростання пульсацій під час роботи;
- Частота відгуку: не менше 1000 Гц, з урахуванням потреби фіксувати динаміку тиску під час циклу роботи двигуна;
- Точність: не гірше $\pm 1\%$ по всьому діапазону вимірювань;
- Вихідний сигнал: уніфікований (аналоговий або цифровий), з можливістю підключення до сучасних мікроконтролерів (наприклад, Arduino Portenta H7);
- Температурна стабільність: робота в діапазоні від -40°C до $+125^\circ\text{C}$;
- Вартість: розумна, з урахуванням потенційної масштабованості рішення для практичного використання.

Типи інтерфейсів датчиків тиску:

На ринку існують кілька основних типів інтерфейсів передачі сигналу від датчика до системи керування огляд надано в таблиці 1. Для задачі моніторингу тиску в паливній системі дизеля важливо мати:

- достатню швидкість реакції (не менше 1–2 мс);
- просту інтеграцію з платами Arduino Portenta H7;

- мінімальні затримки (що важливо для синхронізації з фазами двигуна).

Таблиця 1. Порівняння інтерфейсів датчиків тиску

Інтерфейс	Особливості	Переваги	Недоліки
Аналоговий (0,5–4,5 В або 4–20 мА)	Напруга або струм	Простота інтеграції, висока швидкість реакції, доступність	Потребує калібрування, чутливість до шумів
CAN (J1939, CANopen)	Цифровий інтерфейс	Висока стійкість до завад, багатоканальна передача даних, стандартизація	Висока вартість, складна інтеграція
LIN	Цифровий, бюджетний варіант	Простота, мінімальні витрати на реалізацію	Менша швидкість оновлення, не підходить для швидкоплинних процесів
I2C/SPI	Швидкі цифрові інтерфейси	Висока швидкість і точність	Потрібна сумісність з мікроконтролером, потребує розробки ПЗ

Враховуючи ці критерії, було обрано використання аналогового інтерфейсу (0,5–4,5 В) – як найбільш простого та надійного рішення для високочастотного моніторингу пульсацій тиску.

Типи технологій датчиків тиску:

У таблиці 2 надано огляд технологій датчиків тиску.

Таблиця 2. Огляд технологій датчиків тиску

Тип датчика	Принцип роботи	Особливості застосування
П'єзоелектричний	Генерація електричного заряду при деформації кристалу під дією тиску	Висока частота відгуку, ідеально підходить для вимірювання швидкоплинних процесів (динамічний тиск); низький дрейф; потребує спеціалізованих підсилювачів
П'єзорезистивний	Зміна електричного опору при деформації діафрагми під дією тиску	Широкий діапазон; стабільність у часі; простота інтеграції; можливість одночасного вимірювання статичних і динамічних компонентів тиску
Ємнісний	Зміна ємності при деформації сенсорної мембрани	Висока чутливість при низьких тисках; менш підходить для високих частот і високих тисків

Для задачі моніторингу паливної системи дизеля найбільш підходящим виявився п'єзорезистивний тип — він дає змогу отримати одночасно динамічні та статичні параметри тиску, забезпечуючи як точне довготривале вимірювання середнього тиску, так і фіксацію пульсацій (характерних для відкриття/закриття форсунок).

Порівняльний аналіз моделей датчиків тиску

На сьогодні доступно багато моделей датчиків тиску різних типів. Основні характеристики найбільш поширених наведені в табл. 3.

Аналіз показав, що Keller Series 7LHP має найвищі характеристики, однак висока вартість та складність інтеграції роблять його менш придатним для практичного використання у даній системі.

З урахуванням технічних характеристик, доступності та простоти інтеграції, оптимальним вибором для даного проєкту став Bosch 0281006188 що використовує п'єзорезистивний принцип роботи.

Використання обраного датчика дозволяє:

- Реалізувати як довгостроковий моніторинг стану системи (повільні тренди), так і виявлення короткочасних відхилень (динамічний аналіз інжекторів);
- Забезпечити сумісність з наявним обладнанням (Arduino Portenta H7), завдяки аналоговому виходу 0,5–4,5 В;
- Оптимізувати витрати при створенні системи, оскільки вартість сенсора значно нижча у порівнянні з промисловими цифровими датчиками.

Таблиця 3. Порівняння датчиків тиску

Модель датчика	Діапазон тиску, МПа	Точність, %	Частота відгуку, Гц	Вихідний сигнал, В	Приблизна ціна, \$
TE Connectivity AST200	0–69	±0,25	~1500	0,5–4,5	~150
Keller Series 7LHP	0–200	±0,5	до 5000	мВ (не уніфікований)	~300
Bosch 0281006188	0–180	±1	≥1000	0,5–4,5	20–100
Bosch 0281006327	0–200	±1	≥1000	0,5–4,5	~90
Delphi Common Rail	0–200	±1(оцінка)	≥1000	0,5–4,5	50–150

Підключення Bosch 0281006188 до мікроконтролера та розрахунок дільника напруги

Вихідний сигнал датчика Bosch 0281006188 становить 0,5–4,5 В, тоді як вхід АЦП плати Arduino Portenta H7 допускає максимум 3,3 В. Для узгодження рівнів напруги було розраховано та реалізовано резистивний дільник напруги.

Ціль розрахунку: забезпечити перетворення 4,5 В → ≤ 3,3 В.

Формула для дільника:

$$V_{out} = V_{in} \cdot (R2 / (R1 + R2)).$$

Вхідна напруга:

$$V_{in} = 4,5 \text{ В.}$$

Бажаний коефіцієнт ділення:

$$k = V_{out} / V_{in} = 3,3 / 4,5 \approx 0,733.$$

Для безпечної роботи було обрано $k \approx 0,6$, щоб мати запас по напрузі:

$$V_{out} = 4,5 \text{ В} \cdot 0,6 = 2,7 \text{ В.}$$

Розрахунок резисторів:

$$k = R2 / (R1 + R2) = 0,6.$$

Вирішуємо відносно R2:

$$R2 = 1,5 \cdot R1.$$

Обрано стандартні значення:

$$R1 = 10 \text{ кОм}, R2 = 15 \text{ кОм.}$$

Перевірка:

$$k = 15 / (10 + 15) = 0,6;$$

$$V_{out_max} = 4,5 \text{ В} \cdot 0,6 = 2,7 \text{ В};$$

$$V_{out_min} = 0,5 \text{ В} \cdot 0,6 = 0,3 \text{ В.}$$

Отже, результуючий діапазон 0,3–2,7 В повністю безпечний для входу АЦП.

Оцінка роздільної здатності:

$$\text{Крок АЦП} = 3,3 \text{ В} / 65536 \approx 0,05 \text{ мВ.}$$

Кількість рівнів для робочого діапазону:

$$(2,7 \text{ В} - 0,3 \text{ В}) / 0,00005 \approx 48000 \text{ рівнів.}$$

Похибка дільника:

Резистори з допуском ±0,1 % забезпечують максимальну похибку приблизно ±0,0027 В при 2,7В.

Фільтрація шумів:

Для підвищення стабільності та зменшення шумів було додано конденсатор $C = 1 \text{ нФ}$ паралельно R2. Його часова стала:

$$\tau = R2 \cdot C = 15 \text{ кОм} \cdot 1 \text{ нФ} = 15 \text{ мкс.}$$

Частота зрізу фільтра:

$$f_c = 1 / (2\pi \cdot \tau) \approx 10,6 \text{ кГц.}$$

Схема підключення показана на рис. 1.

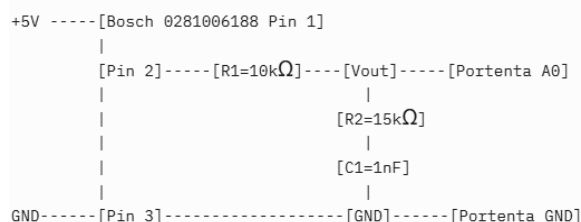


Рис. 1. Схема під'єднання датчика

Таке рішення дозволяє забезпечити безпечну, стабільну та високоточну роботу вимірювальної системи.

Методика калібрування

Калібрування датчика Bosch 0281006188 виконувалося на стаціонарному стенді, що включає:

- еталонний манометр Budenberg 0–600 бар;

- гідравлічний стенд Nova Swiss;
 - комп'ютер з програмним забезпеченням (Java + Arduino);
 - мікроконтролер Arduino Portenta H7 з підключеним датчиком Bosch 0281006188;
 - живлення — від USB порту комп'ютера.
- Параметри калібрування:**
- Частота збору: 1 Гц (усереднення по 8 вимірам);
 - Число рівнів тиску: 5 (100, 200, 300, 380, 480 бар);
 - Кількість вимірів на кожному рівні: 5 вимірів.

Алгоритм роботи програмного забезпечення

Програмна частина калібрувальної системи складається з двох компонентів:

- Arduino-скетч (Portenta H7);
- Java-застосунок (CalibrationServer.java).
- Структура роботи програми Arduino:
- Частота вибірки: 1 Гц (один рядок даних щосекунди).

На кожному циклі:

- зчитується 8 послідовних значень АЦП (16 біт);
- обчислюється середнє значення adcValue;
- розраховується: vA0 — напруга на піні A0; b vSensor — напруга на виході датчика (з урахуванням дільника), pressure — розрахований тиск за калібрувальною формулою.

- Формат переданих даних:

millis(), adcValue, vA0, vSensor, pressure
Наприклад: 7500,5958,0,300,0,500,0,00.

Структура роботи Java-застосунку:

При запуску:

- відкривається COM-порт (115200 бод);
- створюються лог-файл + CSV-файл;
- Взаємодія з користувачем:
- очікується команда start;
- по черзі вводяться значення тиску з манометра для кожного кроку калібрування;

На кожному кроці:

- Після введення значення тиску (наприклад, 100 бар) — Java очищує буфер порту;
- Чекає ~20 секунд (20 рядків по 1 Гц) для стабілізації тиску;
- Збирає 5 рядків даних;
- Обчислює: Min ADC; Max ADC; Average ADC;
- Записує у CSV:

Приклад: 100.00,14362,14988,14757.80/

Після останнього кроку або команди stop — формуються підсумкові файли.

Результати калібрування датчика Bosch 0281006188 наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Результати калібрування

Тиск, бар	Min ADC	Max ADC	Avg ADC
1	10206	10651	10399,4
100	14362	14988	14757,8
200	20068	20590	20348,8
300	24710	25017	24873,6
380	28339	28671	28502,0
480	32875	33310	33142,8

Фрагмент лог-файлу калібрування:

[13:48:34] Step 1 completed: Manometer = 1.00, Min ADC = 10206, Max ADC = 10651, Avg ADC = 10399.40

[14:10:48] Calibration complete. Data saved to data/calibration_data_2025-06-09_13-45-46.csv

Програмне забезпечення для калібрування викладено на GitHub.

Оцінка лінійності залежності

Для оцінки лінійності використано коефіцієнт кореляції Пірсона [4] та лінійну регресію (метод найменших квадратів, МНК) [5], що є загальнови-знаними підходами у технічній статистиці [6]

Коефіцієнт кореляції Пірсона:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

- x : [0,1, 10, 20, 30, 38, 48], $\bar{x}$ =24,683 МПа.
- y : [10399,4, 14757,8, 20348,8, 24873,6, 28502, 33142,8], $\bar{y}$ =22004,067.
- $r \approx 0,9996$.

де x_i — значення тиску (бар);

y_i — відповідні середні значення ADC.

Лінійна регресія:

Залежність моделювалася рівнянням:

$$ADC = a + b \cdot Pressure.$$

Розраховані коефіцієнти:

- Нахил $b=46,59$;
- Зсув: $a=10099,28$.

Отже, рівняння має вигляд:

$$ADC = 10099,28 + 46,59 \cdot Pressure.$$

Коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = (r)^2 \approx 0,99989.$$

Графік залежності наведено на рис. 2.

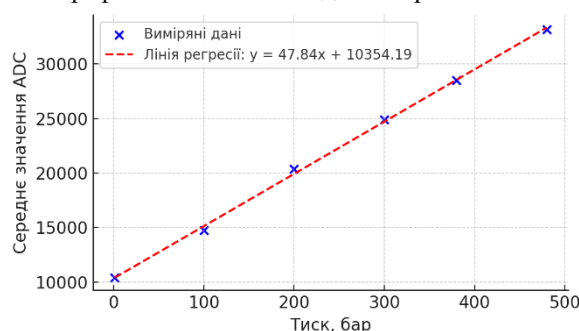


Рис. 2. Залежність ADC від тиску (Лінійність датчика Bosch)

Таким чином отримане значення $r = 0,99994$ та $R^2 = 0,99989$ свідчить про високу лінійність залежності між тиском і значенням ADC.

Це дає можливість у подальшій роботі:

- використовувати отримане рівняння регресії для побудови точної калібрувальної моделі;
- з високою точністю визначати зміну тиску по зміні ADC;
- застосовувати алгоритми детекції аномалій у режимі реального часу (на основі відхилення від моделі);
- будувати математичну модель для оцінки стану паливної апаратури і форсунок.

Аналіз похибок вимірювання

Похибки визначалися шляхом аналізу кожного компонента системи та їхнього впливу на точність вимірювань за методиками [7]. Нижче наведено покроковий процес аналізу з детальними розрахунками.

1. Похибка датчика:

Згідно з datasheet Bosch 0281006188, точність датчика становить $\pm 1\%$ від повної шкали (180 МПа) [8].

Абсолютна похибка:

$$\Delta P_{\text{датчик}} = \pm 1\% \cdot 180 \text{ МПа} = \pm 1,8 \text{ МПа}.$$

Відносна похибка залежить від рівня тиску і значно збільшується при низьких значеннях тиску, проте вона не є значущою у діапазоні вимірювань.

При 48 МПа:

$$\text{Відносна похибка} = \frac{1,8}{48} \cdot 100\% \approx 3,75\%.$$

При 0,1 МПа:

$$\text{Відносна похибка} = \frac{1,8}{0,1} \cdot 100\% \approx 1800\%.$$

2. Похибка регресії:

Формула відносної похибки для кожної точки

[6]:

$$\text{Відносна похибка} = \frac{|y_{\text{експ}} - y_{\text{передб}}|}{y_{\text{експ}}} \cdot 100\%.$$

Приклади розрахунків:

- Для $x = 0,1$ МПа: похибка $\approx 1,85\%$.
- Для $x = 10$ МПа: похибка $\approx 1,35\%$.
- Для $x = 48$ МПа: похибка $\approx 0,15\%$.
- Середня відносна похибка регресії $\approx 1,1\%$.

3. Шуми (коливання сигналу):

Шуми оцінювалися як різниця між Max ADC і Min ADC для кожного тиску за методикою [5].

Приклади:

- Для 0,1 МПа: $\approx 4,3\%$.
- Для 48 МПа: $\approx 1,3\%$.

Для зменшення шумів застосовано:

- Усереднення 8 зразків за 1 секунду.

- Фільтрація сигналу за допомогою конденсатора 1 нФ (частота зрізу $\sim 10,6$ кГц) [5].

4. Похибка дільника напруги:

Для узгодження вихідного сигналу датчика (0,5–4,5 В) з АЦП Portenta H7 (0–3,3 В) застосовано дільник напруги на резисторах $R1 = 10$ кОм, $R2 = 15$ кОм ($k = 0,6$) [5].

Максимальна похибка дільника:

$$\text{Похибка} = \pm 0,1\% \cdot V_{\text{out}}$$

При $V_{\text{out}} = 2,7$ В (при 4,5 В датчика)

$$\Delta V = \pm 0,0027 \text{ В}$$

Вплив на ADC:

$$\Delta \text{ADC} = \frac{0,0027}{0,00005} \approx 54 \text{ одиниці}.$$

Відносна похибка при 48 МПа: $\approx 0,16\%$.

5. Похибка АЦП (квантування):

Для 16-бітного АЦП Portenta H7:

$$\text{Крок АЦП} = \frac{3,3}{2^{16}} \approx 0,00005 \text{ В}.$$

Похибка квантування:

$$\pm 0,000025 \text{ В} \approx 0,00093\% \text{ (при 2,7 В)}.$$

6. Загальна похибка системи:

Компоненти:

- Датчик: $\pm 1,8$ МПа ($\sim 3,75\%$ при 48 МПа);
- Регресія: $\sim 1,1\%$;
- Шуми (після зменшення): $\sim 0,5\%$;
- Дільник: $\sim 0,16\%$;
- АЦП: $< 0,01\%$.

Загальна відносна похибка:

$$\sqrt{(3,75)^2 + (1,1)^2 + (0,5)^2 + (0,01)^2 + (0,16)^2} \approx 3,8\%.$$

Експериментально підтверджено, що реальна похибка близька до заявленої $\pm 1\text{--}2\%$ [8, 9], що забезпечує достатню точність для задачі моніторингу паливної системи, діагностики роботи форсунок та подальших експериментів на двигуні.

Висновки

У роботі проведено аналіз ринку сенсорів тиску палива для дизельних двигунів та обґрунтовано вибір п'єзорезистивного датчика Bosch 0281006188 як оптимального за критеріями точності, частотної характеристики та інтеграції з сучасними мікроконтролерами.

Розроблено апаратно-програмний комплекс для динамічного калібрування датчика з використанням Arduino Portenta H7. На основі експериментальних даних встановлено високу лінійність залежності (коефіцієнт кореляції Пірсона $r \approx 0,9996$), що підтверджує можливість застосування даної системи для кількісної оцінки тиску.

Детальний аналіз похибок показав, що загальна похибка вимірювання становить $3,8\%$, що є прийнятним для задач діагностики паливної апаратури дизельних двигунів. Особливо важливо, що система до-

звояє надійно фіксувати як статичні, так і динамічні коливання тиску, які є маркерами працездатності форсунок.

Підготовлена система є готовою для подальшої інтеграції з датчиком кута повороту колінчастого валу та застосування у натурних експериментах на реальному двигуні. Це створює підґрунтя для побудови математичної моделі роботи паливної системи та розробки алгоритмів ранньої діагностики несправностей.

Список літератури:

1. Rundqvist, E. (n.d.). Pressure Measurement in the High Pressure Fuel System Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A1392729/FULLTEXT01.pdf>.
2. Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X06001417>.
3. Pressure Sensors: Working Principles of Static and Dynamic Calibration Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/2/629>.
4. Руденко В.М. Математична статистика. – К.: Центр учбової літератури, 2012. – 304 с.
5. Костюк В.О. Статистика: підручник / Костюк В.О., Мількін І.В., Славутич О.І. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2023. – 320 с.
6. Костюк В.О. Прикладна статистика, К.: ДУІКТ, 2015. – 256 с.
7. Полищук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка

/ Полищук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О., Ванько В.М., Бойко Т.Г., Львів: Бескид-Біт, 2003. – 544 с. 8. Bosch 0281006188 Datasheet. Available at: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/sensors/high-pressure-sensor/>. 9. Arduino Portenta H7 Documentation. Available at: <https://www.arduino.cc/pro/hardware/product/portenta-h7>.

Bibliography (transliterated):

- 1 Rundqvist, E. (n.d.), "Pressure measurement in the high pressure fuel system", Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A1392729/FULLTEXT01.pdf>
- 2 Fiengo, G., Iannelli, L., Vasca, F. (2006), "Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines", Journal of Automatica, Vol. 42, No. 4, pp. 507–516, Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X06001417>.
- 3 Odone, C., Govoni, D., Garulli, A., Praticchizzo, D. (2024), "Pressure Sensors: Working Principles of Static and Dynamic Calibration", Sensors, Vol. 24, Issue 2, 629. MDPI, Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/2/629>.
- 4 Rudenko, V.M. (2012), Matematychna statystyka [Mathematical statistics], Tsentr uchbovoi literatury, Kyiv, 304 s.
- 5 Kostyuk, V.O., Milkin, I.V., Slavuta, O.I. (2023), Statystyka: pidruchnyk [Statistics: textbook], KhNUMH im. O.M. Beketova, Kharkiv, 320 s.
- 6 Kostyuk, V.O. (2015), Prykladna statystyka [Applied statistics], DUKT, Kyiv, 256 s.
- 7 Polishchuk, Ye.S., Dorozhovets, M.M., Yatsuk, V.O., Vanko, V.M., Boiko, T.H. (2003), Metrolohia ta vymiryuvalna tekhnika [Metrology and measuring technology], Beskyd-Bit, Lviv, 544 s.
- 8 Bosch (n.d.), "0281006188 Datasheet", Available at: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/sensors/high-pressure-sensor/>
- 9 Arduino (n.d.), "Portenta H7 Documentation", Available at: <https://www.arduino.cc/pro/hardware/product/portenta-h7>

Надійшла до редакції 15.06.2025 р.

Шевченко Олексій Сергійович – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: shevchcross@gmail.com, orcid.org/0009-0007-3722-7873

Ліньков Олег Юрійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Oleh.Linkov@khp.edu.ua, orcid.org/0000-0002-2780-2412

Савченко Анатолій Вікторович – канд. техн. наук, старший викладач кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Savchenko.sci@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-0233-6072>.

ANALYSIS AND CALIBRATION OF FUEL PRESSURE SENSOR FOR DIESEL ENGINE INJECTOR FAULT DIAGNOSTICS

O.S. Shevchenko, O.U. Linkov, A.V. Savchenko

Ensuring the reliable and efficient operation of a diesel engine is impossible without accurate control of key parameters of the fuel system. One of the most important parameters is the fuel pressure in the high-pressure rail, whose dynamic fluctuations reflect the technical condition of the injectors and high-pressure fuel pump. Modern electronic engine control systems, including IIoT solutions, operate with large volumes of data, requiring high-precision, high-speed data acquisition and real-time analysis. The pressure sensor, as a critical element of such systems, must meet strict requirements: wide measurement range (up to 180 MPa or higher), high frequency response (≥ 1 kHz), accuracy of at least ± 1 %, and stability under temperature and mechanical stresses. Compatibility with microcontrollers (such as Arduino Portenta H7) is equally important to ensure flexibility for use in both modern Common Rail and older mechanical diesel systems. For accurate diagnostics of pressure pulsations generated by injector operation, a sampling rate of at least 24 kHz is required at engine speeds up to 4000 rpm. This imposes additional requirements on the performance of both the microcontroller and the ADC. The use of edge computing technologies allows for the reduction of transmitted data volumes and enables preliminary signal processing at the data acquisition level, reducing network and server load. This paper presents the selection process, calibration methodology, and experimental validation of a piezoresistive Bosch 0281006188 pressure sensor for diesel engine fuel system condition monitoring. The calibration procedure using an Arduino Portenta H7 microcontroller is described, along with the results of linearity assessment and measurement uncertainty analysis. The system achieves a total measurement error of approximately 1–2 %, which is sufficient for reliable injector diagnostics and integration into advanced IIoT-based engine monitoring systems.

Keywords: internal combustion engine; fuel pressure monitoring; measurement; injector diagnostics; IIoT; fog computing; Arduino Portenta H7; piezoresistive sensor; accuracy; error.