

УДК 621.3
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).12](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).12)

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FUEL RAIL PRESSURE PULSATIONS FOR ENGINE FUEL SYSTEM DIAGNOSTICS

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ТИСКУ ПАЛИВА В ПАЛИВНІЙ РАМПІ ДВИГУНА ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ

Oleh U. Linkov
Oleh.Linkov@khp.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2780-2412

Oleksii S. Shevchenko
shevchcross@gmail.com
ORCID: 0009-0007-3722-7873

О. Ю. ЛІНЬКОВ,
канд. техн. наук, доцент

О. С. ШЕВЧЕНКО,
аспірант

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Abstract. Purpose. The purpose of this study is the experimental investigation of fuel pressure pulsations in the fuel rail of a gasoline internal combustion engine and the assessment of their applicability as an independent diagnostic parameter of fuel system technical condition without access to electronic control unit data. The relevance of the research is determined by the need to develop fast and informative injector diagnostics methods suitable for real operating conditions, where the use of specialized test benches is limited or economically impractical.

Method. To conduct the experimental study, an autonomous hardware–software data acquisition system was developed based on the high-performance Arduino Portenta H7 microcontroller. The system provides synchronous high-speed recording of fuel rail pressure, injector control current, and crankshaft position reference signals with a sampling rate of 32 kHz. Signal acquisition was performed under real engine operating conditions without interference with the standard electrical circuits. Experimental tests were carried out on a Z18XE gasoline engine under idle conditions, medium load operation, and fault simulation modes achieved by disabling one injector.

Results. The obtained time-domain waveforms of fuel pressure pulsations exhibit a stable and clearly defined periodic structure corresponding to fuel injection cycles. It was established that an increase in engine load results in a proportional growth of pulsation amplitude and noticeable changes in frequency characteristics. In operating modes with a disabled injector, distinct waveform distortions were observed, including missing pressure drops, asymmetry of the waveform structure, and a reduction in the amplitude of individual components. These features enable unambiguous identification of abnormal fuel system operation.

Scientific novelty. For the first time, this study experimentally confirms that dynamic fuel pressure pulsations in the fuel rail of a gasoline internal combustion engine can be used as an independent and informative diagnostic parameter without relying on electronic control unit signals.

Practical importance. The obtained results provide a scientific and methodological basis for the development of automated injector condition assessment algorithms and the creation of practical diagnostic systems suitable for vehicle operation and service maintenance.

Key words: fuel pressure pulsations; fuel rail; injector diagnostics; internal combustion engine; fuel system.

Анотація. Мета – експериментальне дослідження пульсацій тиску палива в паливній рейці бензинового двигуна внутрішнього згоряння та оцінювання можливості їх використання як незалежного діагностичного параметра технічного стану паливної системи без доступу до даних штатного електронного блока керування двигуном. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю створення простих та інформативних методів оперативної діагностики форсунок в експлуатаційних умовах, коли використання спеціалізованого стендового обладнання є неможливим або економічно недоцільним.

Методика. Для проведення експериментальних досліджень розроблено автономний апаратно-програмний комплекс на базі високопродуктивного мікроконтролера Arduino Portenta H7, який забезпечує синхронізований високошвидкісний запис сигналів тиску в паливній рейці, струму керування форсункою та фазового сигналу датчика положення колінчастого валу з частотою дискретизації 32 кГц. Реєстрація сигналів здійснювалась у реальних умовах роботи двигуна без втручання у штатні електричні ланцюги. Експеримент виконано на бен-

зиновому двигуні Z18XE у режимах холостого ходу, середнього навантаження, а також у режимах з імітацією несправності шляхом відключення однієї форсунки.

Результати. Отримані часові осцилограми пульсацій тиску мають чітко виражену та стабільну періодичну структуру, що безпосередньо відповідає циклам упорскування палива. Встановлено, що зі зростанням навантаження двигуна спостерігається закономірне збільшення амплітуди пульсацій та зміна їх частотних характеристик. У режимах з відключеною форсункою зафіксовано характерні спотворення форми сигналу, зокрема пропуски імпульсів, асиметрію хвильової структури та зменшення амплітуди окремих компонентів, що дозволяє однозначно ідентифікувати порушення у роботі паливної системи.

Наукова новизна. Уперше експериментально підтверджено можливість використання динамічних пульсацій тиску в паливній рейці бензинового двигуна як самостійного та інформативного діагностичного параметра без залучення сигналів електронного блока керування.

Практична значимість. Отримані результати створюють науково-методичну основу для розроблення автоматизованих алгоритмів оцінювання технічного стану форсунок, а також для створення прикладних діагностичних систем, придатних для використання в умовах експлуатації та сервісного обслуговування транспортних засобів.

Ключові слова: пульсації тиску; паливна рейка; діагностика двигуна; інжектор; паливна система.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасні бензинові двигуни внутрішнього згоряння використовують електронно керовані системи впорскування палива [3, 5, 6], у яких від справності форсунок залежить стабільність роботи двигуна, його паливна економічність та рівень токсичності викидів. Традиційні методи діагностики паливної системи базуються на аналізі сигналів електронного блока керування, використанні стендового обладнання або вимірюванні корекцій подачі палива. Проте такі методи потребують спеціалізованих технічних засобів, досвіду оператора або доступу до даних внутрішніх систем керування двигуном. Тому виникає необхідність у розвитку альтернативних підходів до діагностики, що дозволяють отримувати інформацію про роботу паливної системи без втручання у штатну архітектуру електронного керування. Одним із перспективних напрямів є аналіз пульсацій тиску в паливній рампі, які виникають під час циклів упорскування та містять інформацію про режим роботи та можливі відхилення в роботі форсунок.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Існуючі підходи до діагностики паливних систем двигунів внутрішнього згоряння переважно базуються на аналізі параметрів, отриманих із електронного блока керування двигуном, або використанні спеціалізованого діагностичного обладнання. У більшості досліджень діагностичні ознаки визначаються на основі електричних характеристик роботи форсунок, параметрів упорскування, корекцій подачі пального та інших непрямих показників. У ряді праць розглянуто можливість використання математичного та спектрального аналізу сигналів тиску [7] для оцінювання технічного стану паливної системи, однак запропоновані підходи здебільшого передбачають використання складних або дорогих вимірювальних систем.

Зростаючий інтерес до цифрової діагностики та концепції технічного моніторингу сприяє появі публікацій, у яких вивчається потенціал використання

недорогих сенсорів і мікроконтролерів для збору високочастотних параметрів у режимі реального часу. У попередніх роботах автора [1, 2] було обґрунтовано вибір сенсорів тиску та апаратної платформи для реєстрації швидкоплинних процесів у паливній системі, а також проведено експериментальну перевірку точності вимірювального тракту. Отримані результати створили передумови для переходу від дослідження окремих елементів вимірювального комплексу до аналізу форми сигналів, отриманих безпосередньо під час роботи двигуна у реальних умовах.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри наявні дослідження у сфері аналізу характеристик паливних систем, питання використання динамічних пульсацій тиску як самостійного діагностичного параметра залишається недостатньо вивченим. Більшість існуючих робіт зосереджені на використанні даних електронного блока керування або результатів стендових випробувань, тоді як можливості безпосередньої реєстрації високочастотних коливань тиску у паливній рампі у процесі роботи двигуна в реальному часі вивчені неповністю.

Недостатньо дослідженим залишається питання кількісної та якісної інтерпретації хвильових сигналів, отриманих під час різних режимів роботи двигуна, та їх зв'язку з технічним станом форсунок. Відсутня усталена методологія визначення діагностично значущих ознак у сигналі тиску, а також методи класифікації режимів роботи чи виявлення несправностей на основі форми та спектрального складу сигналів. Саме ці аспекти потребують подальшого експериментального дослідження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є експериментальна оцінка інформативності пульсацій тиску в паливній рампі бензинового двигуна внутрішнього згоряння та визначення можливості використання цих сигналів як діагностичного параметра стану паливної системи.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є паливна система бензинового двигуна внутрішнього згоряння із розподіленим упорскуванням палива. Предметом дослідження є високочастотні пульсації тиску в паливній рампі, що виникають унаслідок циклічного відкриття та закриття форсунок під час роботи двигуна.

Для проведення дослідження використано експериментальний вимірювальний комплекс на основі мікроконтролера Arduino Portenta H7, датчика тиску та синхронізуючих сигналів системи керування двигуном. Реєстрація сигналів виконувалася з частотою дискретизації 32 кГц у трьох режимах роботи двигуна: холостий хід, підвищене навантаження та режим із штучним відключенням форсунки для моделювання несправності.

Методика аналізу базувалася на порівнянні часових форм сигналів, оцінюванні зміни амплітуди пульсацій та ідентифікації характерних особливостей хвильової структури, що відповідають зміні технічного стану паливної системи.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Опис вимірювального комплексу. Для проведення експериментального дослідження було розроблено вимірювальний комплекс для реєстрації швидкоплинних пульсацій тиску в паливній рампі бензинового двигуна Opel Z18XE. Комплекс побудовано на базі мікроконтролера Arduino Portenta H7, який оснащений 16-бітним аналого-цифровим перетворювачем і забезпечує синхронний запис кількох каналів із частотою дискретизації 32 кГц. Це дозволило реєструвати як загальні зміни тиску, так і локальні високочастотні коливання, що виникають у момент відкриття та закриття форсунок.

Вимірювання тиску. Для визначення тиску використано недорогий автомобільний датчик китайського виробництва з аналоговим виходом 0,5–4,5 В, встановлений через перехідник у штатний порт паливної рейки. Незважаючи на нижчу точність порівняно з оригінальними сенсорами, його швидкодія та лінійність виявилися достатніми для фіксації динамічних

пульсацій тиску. Сигнал датчика додатково згладжувався RC-фільтром із ємністю 1 нФ, підключеною паралельно входу АЦП.

Синхронізація роботи двигуна. Щоб прив'язати пульсації тиску до фази робочого циклу двигуна, застосовано датчик Холла SS495A, розміщений поряд із зубчастим шківом розпредвалу. Це забезпечило отримання синхронізуючого сигналу, який дозволив встановити співвідношення між подіями у циліндрах та коливаннями тиску.

Контроль електричного сигналу форсунки. Для визначення фактичного моменту відкриття форсунки використовувався датчик струму ACS712, який фіксує форму та амплітуду струму живлення інжектора. Аналіз цього сигналу дозволяє відокремити логічний момент керування від реального часу спрацювання електромагнітної котушки та встановити точний час відкриття й закриття форсунки.

Схема підключення вимірювального комплексу. На рисунку 1 наведено структурну схему системи збору даних, що включає всі використані сенсори, канали АЦП та інтерфейси зв'язку з комп'ютером.

Система включає три вимірювальні канали, підключені до 16-бітного АЦП плати Portenta H7:

- A0 – вхід аналогового сигналу тиску (0,5–4,5 В) від китайського автомобільного датчика тиску. Для зменшення високочастотних шумів використано RC-фільтр із конденсатором 1 нФ.
- A1 – сигнал з датчика Холла SS495A, встановленого для фіксації фази обертання колінчастого вала (додатковий синхросигнал).
- A3 – сигнал датчика струму ACS712, що використовувався для визначення фактичних моментів відкриття форсунок.

Плата Portenta H7 здійснює одночасний збір трьох сигналів із частотою 32 кГц та передає їх у форматі UART у ноутбук, який виступає реєстратором та джерелом живлення 5 В для всієї системи.

Програмне забезпечення та алгоритми збору даних. Для забезпечення синхронного зчитування сигналів тиску, струму форсунки та датчика фазового положення було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для мікроконтролера Portenta H7.

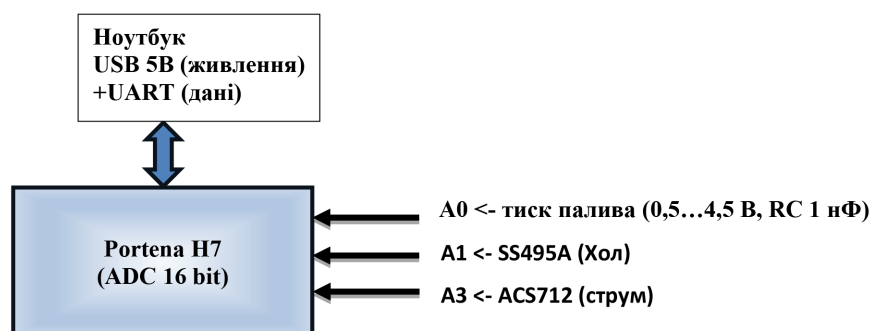


Рис. 1. Схема системи збору сигналів

У роботі використано розширену бібліотеку Arduino AdvancedAnalog, яка забезпечує паралельне семплювання кількох каналів за допомогою прямого доступу до пам'яті (DMA). Це дозволило зменшити навантаження на центральне ядро та забезпечити стабільну частоту вибірки незалежно від процесів передавання даних.

Первинна частота семплювання становила 160 кГц для кожного каналу, після чого значення усереднювалися за п'ятьма відліками, що забезпечило ефективну вихідну частоту 32 кГц. Такий підхід зменшив рівень шуму, підвищив точність вимірювань і дозволив коректно фіксувати швидкоплинні процеси під час відкриття форсунок. Буферизація даних реалізована через кільцевий буфер DMA з глибиною 64 відліки, що виключило ризик втрати даних при короточасних затримках у передачі через UART.

Обмін даними між контролером і ноутбуком здійснювався у бінарному форматі, що забезпечило високу швидкість передавання (до 20 000 пакетів за секунду) та збереження повної 16-бітної розрядності АЦП. Кожен пакет містив часову мітку та усереднені значення трьох каналів: тиску, струму та сигналу датчика Холла.

Для приймання і візуалізації даних було створено програму CalibrationServer, що реалізує функції обробки потоку, декодування пакетів, запису CSV-файлів та відображення сигналів у режимі реального часу. Програма дозволяє виконувати попередню фільтрацію, масштабування сигналів та базовий спектральний аналіз для подальшої інтерпретації отриманих результатів.

Розроблене апаратно-програмне забезпечення забезпечило точну синхронізацію сигналів і дозволило провести експериментальні дослідження у реальних умовах роботи двигуна.

Умови проведення досліджень. Експериментальні вимірювання виконувалися на бензиновому

двигуні Opel Z18XE у штатних умовах роботи автомобіля. Вимірювальний комплекс працював автономно, отримуючи живлення від ноутбука через інтерфейс USB 5 В. Підключення сенсорів здійснювалося без змін у штатних ланцюгах керування двигуном, що дозволило провести дослідження без втручання у роботу електронних систем автомобіля.

Для аналізу поведінки пульсацій тиску було обрано два основних режими роботи двигуна:

- Холостий хід – приблизно 781 хв^{-1} .
- Режим середнього навантаження – приблизно 2489 хв^{-1} .
- Імітація несправності № 1 – відключення однієї форсунки при роботі на холостому ході.
- Імітація несправності № 2 – відключення однієї форсунки при підвищеній частоті обертання.

У кожному режимі одночасно реєструвалися три вимірювальні сигнали, отримані з розробленого апаратно-програмного комплексу:

- тиск у паливній рампі,
- струм спрацювання форсунки,
- сигнал датчика Холла, який використовувався для визначення фазового положення колінчастого вала.

Отримані дані дозволили провести порівняльний аналіз динаміки пульсацій тиску залежно від режиму роботи двигуна та оцінити чутливість системи до можливих порушень у роботі форсунок.

Результати вимірювань та аналіз графіків

Режим холостого ходу. У режимі холостого ходу двигуна ($\approx 781 \text{ хв}^{-1}$) форма сигналу тиску в паливній рампі має чітко виражену періодичну структуру, що відповідає черговості відкриття форсунок. Кожен цикл упорскування супроводжується короточасним зниженням тиску, після чого насос високого тиску компенсує падіння та повертає тиск до номінального рівня. Амплітуда коливань у цьому режимі є стабільною,



Рис. 2. Сигнал тиску у паливній рампі на холостому ході

а частота пульсацій безпосередньо пов'язана зі швидкістю обертання колінчастого вала.

Цей графік демонструє базову форму хвилі, яка використовується як референтна для порівняння з іншими режимами.

Режим середнього навантаження

При підвищенні частоти обертання до $\approx 2489 \text{ хв}^{-1}$ спостерігається зростання частоти пульсацій тиску, що є наслідком збільшення кількості циклів упорскування за одиницю часу. Амплітуда коливань зростає через інтенсивнішу роботу паливного насоса та більшу продуктивність форсунок. У цьому режимі пульсації стають більш щільними, але зберігають характерну повторюваність, яка дозволяє однозначно ідентифікувати кожен цикл упорскування.

Порівняння цього графіка з холостим ходом демонструє закономірне збільшення частоти та амплітуди пульсацій.

На холостому ходу середній тиск у рампі становить близько 3.8 бар. Коливання тиску мають майже синусоїдальний характер з амплітудою близько 0.3 бар. Імпульси струму на форсунки тривають близько 15° кута колінчастого вала. У момент подачі струму спостерігається короткочасне падіння тиску в рампі, що відповідає відкриттю форсунки. Після завершення імпульсу тиск короткочасно зростає вище середнього рівня (≈ 4.0 бар), що пояснюється закриттям регуляторного клапана та гідравлічною інерцією палива.

На навантаженні ($\approx 2489 \text{ хв}^{-1}$) середній тиск підвищується до 4.3–4.4 бар. Імпульси струму тривають близько 40° кута вала, що узгоджується зі збільшенням тривалості впорскування палива при зростанні навантаження. Амплітуда коливань тиску зростає до 0.5–0.6 бар. На графіку видно, що падіння тиску починається практично одночасно з подачею імпульсу, але подальше зростання тиску починається



Рис. 3. Сигнал тиску у паливній рампі при середньому навантаженні

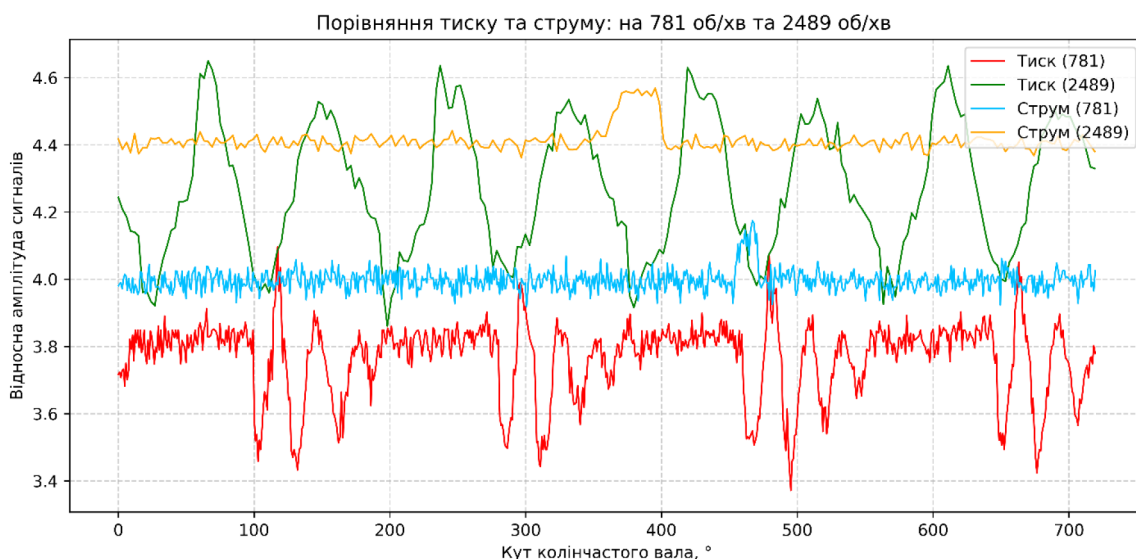


Рис. 4. Порівняння режимів на 781 хв^{-1} та 2489 хв^{-1}

раніше, ніж закінчується імпульс струму, що може бути зумовлено затримкою спрацьовування гідравлічної хвилі та зворотною реакцією клапана регуляції тиску.

Форми коливань між циліндрами відрізняються – піки просідання тиску не ідентичні, що свідчить про нерівномірність роботи форсунок або відмінності у зношуванні елементів системи живлення.

Режим із відключеною форсункою (імітація несправності). Вимкнення однієї з форсунок призводить до суттєвих змін у формі сигналу. У циклі, де відсутнє впорскування, пропадає характерне падіння тиску, що створює асиметрію загальної хвильової структури. Амплітуда коливань зменшується, оскільки обсяг палива, що подається у систему, частково не споживається. Окрім цього, спостерігається зміна середнього рівня тиску в рампи, що також може бути діагностичною ознакою.

Цей режим демонструє найважливішу практичну властивість методу – можливість виявлення аномалій у роботі паливної системи за формою пульсацій тиску.

Методика обробки. Для кожного циклу визначалися такі характеристики тиску:

$P_{\min} = \min(P(\theta))$ мінімальне значення тиску;

$P_{\max} = \max(P(\theta))$ максимальне значення тиску;

$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$ середнє значення тиску;

$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ амплітуда гідравлічних пульсацій;

$P_{\min}$ – характеризує момент упорскування, коли частина палива витрачається з об'єму рампи;

$P_{\max}$ – відповідає фазі відновлення тиску після завершення подачі;

ΔP – амплітуда гідравлічних пульсацій, яка залежить від інтенсивності упорскування i .

Результати занесено в таблицю 1



Рис. 5. Сигнал тиску при відключенні форсунки на холостому ході

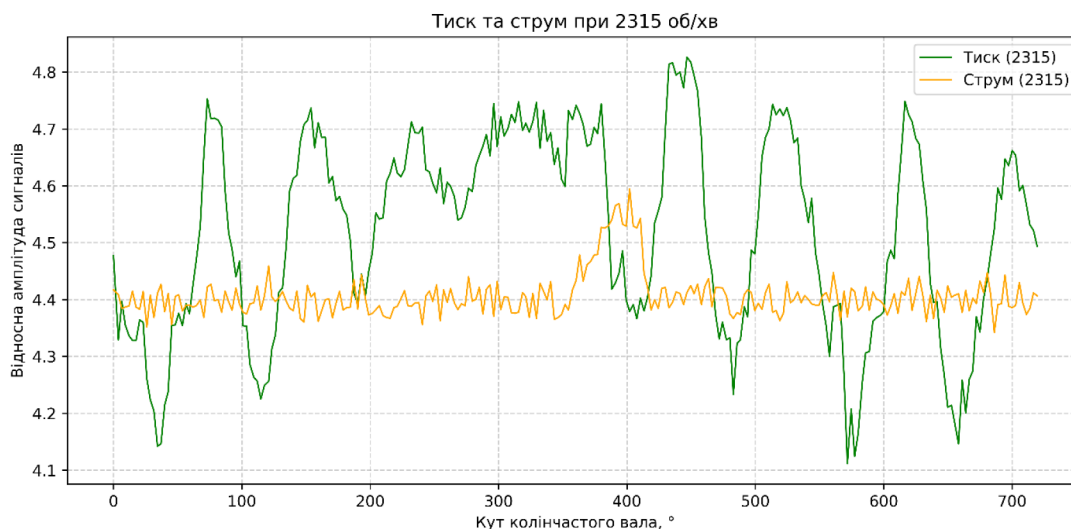


Рис. 6. Графік сигналу тиску та струму з вимкненою форсункою при обертах 2315 хв-1



Рис. 7. Графік порівняння сигналів тиску та струму з вимкненою форсункою

Таблиця 1. Зведена таблиця тисків

Оберти, об · хв	$P_{\min}$, бар	$P_{\max}$, бар	$\bar{P}$, бар	ΔP , бар
781	3,3713	4,0959	3,7668	0,7246
2489	3,8606	4,6499	4,2709	0,7893
799 вимкнена форсунка	3,6330	4,2320	3,9627	0,5990
2315 вимкнена форсунка	4,1114	4,8261	4,5218	0,7147

Аналітичні спостереження

1) Холостий хід ($\sim 780\text{--}800\text{ хв}^{-1}$)

При нормальній роботі тиск коливається з амплітудою ΔP , що відповідає чотирьом імпульсам упорскування за 720° .

При відключенні однієї форсунки:

- один із провалів тиску зникає або різко зменшується, що призводить до асиметрії форми сигналу;
- середній тиск підвищується, оскільки насос продовжує підтримувати тиск на той самий рівень, але витрата палива зменшується;
- амплітуда пульсацій ΔP зменшується, оскільки загальний об'єм упорскуваного палива за цикл зменшується.

2) Навантаження ($\approx 2300\text{--}2500\text{ хв}^{-1}$)

При збільшенні частоти обертання:

- середній тиск зростає через збільшене навантаження на насос та корекцію регулятора тиску.
- амплітуда ΔP зазвичай зростає, оскільки кількість і тривалість імпульсів упорскування збільшується.
- При відключенні однієї форсунки на навантаженні:
 - амплітуда ΔP зменшується, оскільки один із впорсків відсутній $\rightarrow$ падіння тиску коротше та менш глибоке;
 - на графіку чітко видно «розрив шаблону» форми сигналу, тобто одна фаза циклу відрізняється від інших.

Сигнал тиску в паливній рампі містить інформативну періодичну компоненту, пов'язану з роботою форсунок.

Відключення однієї форсунки приводить до закономірної деформації сигналу:

- змінюється середній тиск,
- падає амплітуда пульсацій,

зникає або змінюється один із характерних провалів.

Отримані результати підтверджують можливість використання сигналу тиску як діагностичного параметра для виявлення несправностей системи упорскування.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані в ході дослідження часові форми сигналів підтверджують, що пульсації тиску у паливній рампі несуть виразну інформацію про роботу системи упорскування бензинового двигуна. Аналіз сигналів у різних режимах дозволив виявити низку закономірностей, що можуть бути використані як діагностичні ознаки.

У режимі холостого ходу пульсації мають стабільну періодичну структуру з чітко окресленими мінімальними значеннями, що відповідають моментам відкриття форсунок. Амплітуда ΔP у цьому режимі залишається майже постійною, що свідчить про рівномірність подачі палива всіма інжекторами. Співставлення тиску та імпульсів струму показує однозначний причинно-наслідковий зв'язок між електричним відкриттям форсунки та гідравлічним падінням тиску [3, 7].

При роботі під навантаженням спостерігається закономірне збільшення середнього рівня тиску та амплітуди пульсацій. Зростання ΔP зумовлене збільшенням об'ємом подачі та тривалістю імпульсів упорскування. Форма коливань у цьому режимі демонструє більшу неоднорідність між циліндрами, що може бути пов'язано зі зношенням форсунок або відмінностями у їх продуктивності. Однак такі відмінності не призводять до втрати періодичності сигналу, що підтверджує стабільність роботи системи.

Найбільш показовими є результати режимів з відключеною форсункою. У цих режимах структура хвилі зазнає істотної деформації: один із характерних провалів тиску зникає або різко змінює амплітуду. Це створює асиметрію циклу та зменшує загальну амплітуду ΔP . При підвищених обертах двигуна такі спотворення проявляються ще чіткіше, що робить метод особливо чутливим до аномалій у роботі форсунок під навантаженням.

Порівняння графічних даних та параметрів таблиці підтверджує, що пульсації тиску можуть використовуватись для кількісної та якісної оцінки технічного стану інжекторів. Навіть при використанні недорогих сенсорів та мікроконтролера вдалося отримати сигнал достатньої точності для виявлення несправностей. Це відкриває можливість подальшої автоматизації аналізу та створення алгоритмів діагностики на основі часових та спектральних характеристик сигналу.

ВИСНОВКИ

1. У ході дослідження розроблено та реалізовано апаратно-програмний вимірювальний комплекс

на базі мікроконтролера Arduino Portenta H7, який забезпечує високошвидкісний синхронний запис тиску, струму форсунки та сигналу датчика положення колінчастого валу.

2. Отримані осцилограми пульсацій тиску у паливній рампі двигуна Opel Z18XE демонструють чітку відповідність між моментами відкриття форсунок та локальними провалами тиску, що підтверджує можливість використання тиску як інформативного діагностичного параметра.

3. Досліджено поведінку паливної системи у чотирьох режимах роботи двигуна. Зі збільшенням частоти обертання відбувається закономірне зростання амплітуди та частоти пульсацій тиску, що відображає інтенсивнішу роботу системи упорскування.

4. Режими з відключенням форсунки продемонстрували суттєві порушення структури сигналу тиску: зникнення характерного провалу, асиметрію циклу та зміну амплітуди пульсацій. Це підтверджує здатність методу однозначно ідентифікувати несправності інжекторів за формою пульсацій тиску.

5. Незважаючи на використання недорогих сенсорів та спрощеного вимірювального обладнання, отримані сигнали мають достатню якість для аналізу, що свідчить про практичну придатність підходу для бюджетних діагностичних систем.

6. Результати дослідження створюють підґрунтя для подальшого розвитку методів автоматизованої діагностики паливних систем на основі аналізу часових та частотних характеристик пульсацій тиску, а також формування алгоритмів виявлення несправностей у режимі реального часу.

REFERENCES

- [1] Linkov, O. Yu., & Shevchenko, O. S. (2024). Vykorystannia tekhnolohii IIoT v systemakh monitorynhu ta keruvannia dvyhunom [Use of IIoT technologies in engine monitoring and control systems]. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia – Internal Combustion Engines*, 2, 42–45. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.2.06> [in Ukrainian].
- [2] Linkov, O. Yu., Shevchenko, O. S., & Savchenko, A. V. (2025). Analiz ta kalibruvannia datchykyv tysku dlia systemy diahnostryky palyvnoi aparatury dyzelnykh dvyhuniv [Analysis and calibration of pressure sensors for diagnostics of diesel fuel systems]. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia – Internal Combustion Engines*, 1, 74–79. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.1.09> [in Ukrainian].
- [3] Guzzella, L., & Onder, C. (2010). Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems. Berlin : Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10775-7>
- [4] Bosch. (2011). Automotive handbook (10th ed.). Stuttgart: Robert Bosch GmbH. ISBN 978-0-8376-1686-5
- [5] Stone, R. (1999). Introduction to internal combustion engines (4th ed.). London: Macmillan Education. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-15079-3>
- [6] Payri, F., Bermúdez, V., Payri, R., & Salvador, F. J. (2004). The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles. *Fuel*, 83, 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2003.09.010>
- [7] Chen, S., Shuai, S., & Li, R. (2019). Rail pressure estimation for fault diagnosis in high pressure fuel supply and injection system. *IFAC-PapersOnLine*, 52(5), 297–302. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.673>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Лінков, О. Ю., Шевченко, О. С. (2024). Використання технологій IIoT в системах моніторингу та керування двигуном. *Двигуни внутрішнього згоряння*, № 2, 42–45. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.2.06>
- [2] Лінков, О. Ю., Шевченко, О. С., Савченко, А. В. (2025). Аналіз та калібрування датчиків тиску для системи діагностики паливної апаратури дизельних двигунів. *Двигуни внутрішнього згоряння*, № 1, 74–79. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.1.09>

- [3] Guzzella, L., Onder, C. (2010). *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Berlin : Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10775-7>
- [4] Bosch (2011). *Automotive Handbook* (10th ed.). Stuttgart: Robert Bosch GmbH. ISBN 978-0-8376-1686-5
- [5] Stone, R. (1999). *Introduction to Internal Combustion Engines* (4th ed.). London: Macmillan Education. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-15079-3>
- [6] Payri, F., Bermúdez, V., Payri, R., Salvador, F. J. (2004) *The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles* Fuel, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2003.09.010>
- [7] Chen, S., Shuai, S., Li, R. (2022). *Rail Pressure Estimation for Fault Diagnosis in High Pressure Fuel Supply and Injection System*. IFAC-PapersOnLine, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.673>

© Ліньков О. Ю., Шевченко О. С.

Дата надходження статті до редакції: 16.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 04.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0