

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО

ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Дослідження характеристик паливних форсунок типу Common
Rail»**

Виконав: студент VI курсу групи Ат-61

Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Аркадій Попко

(ім'я та прізвище)

Керівник: Юрій Габрієль

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 621.436.038

Попко Аркадій Аркадійович . «Дослідження характеристик паливних форсунок типу Common Rail.»

//Кваліфікаційна робота. – Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025. – 60 с.

Проведено комплексне тестування форсунок у діапазоні тисків від 30 до 130 МПа та тривалості імпульсів від 0,2 до 2,0 мс .

Експериментально підтверджено наявність зони значної нелінійності паливоподачі при тривалості імпульсів менше 0,5 мс, що критично для режимів попереднього впорскування (Pilot Injection).

Виявлено критичну нерівномірність паливоподачі між форсунками досліджуваного комплексу на рівні 21,92%, що свідчить про необхідність їх відновлення або заміни.

Визначено заходи безпеки при роботі з обладнанням високого тиску та розроблено алгоритм першої допомоги при гідравлічних травмах.

Виконано техніко-економічне обґрунтування, згідно з яким собівартість діагностики однієї форсунки становить 239,16 грн, а термін окупності інвестицій у діагностичне обладнання складає 2,1 року.

Рис. 15, табл. 10, бібліогр. джерел 23.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАЛИВНИХ СИСТЕМ COMMON RAIL ТА ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ СУЧАСНИХ ДИЗЕЛІВ.....	9
1.1 Концепція гідравлічної акумуляції та незалежність параметрів.....	9
1.2 Стратегія багатофазного впорскування (Rate Shaping).....	10
1.3 Паливні насоси високого тиску (ПНВТ).....	12
1.3.1 Конструктивні особливості насосів Bosch CP1 та CP3.....	12
1.3.2 Проблематика та конструктивні дефекти насосів Bosch CP4	13
1.3.3 Порівняльний аналіз з системами Denso та Delphi.....	15
1.4 Інжектори Common Rail: електрогідравліка та прецизійна механіка	15
1.4.1 Електромагнітні форсунки (Solenoid Actuated)	15
1.4.2 П'єзоелектричні форсунки (Piezo Actuated)	16
1.4.3 Взаємозамінність та кодування (IMA/ISA/QR-коди)	17
1.5 Повітряний тракт та системи наддуву	18
1.5.1 Турбокомпресори зі змінною геометрією (VGT/VNT).....	18
1.5.2 Вихрові заслінки (Swirl Flaps)	19
1.5.3 Феномен "Дизельного Розносу" (Runaway Diesel).....	20
1.6 Системи нейтралізації відпрацьованих газів.....	21
1.6.1 Рециркуляція (EGR) та проблеми впуску.....	21
1.6.2 Сажовий Фільтр (DPF)	22
1.6.3 Свічки розжарювання.....	22
1.7 Експлуатація та діагностика	23
1.7.1 Якість палива.....	23
1.7.2 Двомасовий маховик.....	23
1.7.3 Комплексна стратегія діагностики.....	24
1.8 Висновки по розділу	24
2 ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ COMMON RAIL ...	26
2.1 Концептуальна архітектура та призначення лабораторного комплексу	26
2.2 Характеристика підсистеми генерації високого тиску та гідравліки	27

	5
2.2.1 Електромеханічний привід та кінематика	29
2.2.2 Конструкція та термодинаміка насоса "Radialjet"	30
2.2.3 Паливна рампа та інжектори.....	31
2.2.4 Система вимірювання витрат та термостабілізації	31
2.3 Електронна архітектура керування та симуляції	32
2.3.1 Модуль драйвера CR-5 (Moduł sterujący CR).....	32
2.3.2 Симулятор системи керування двигуном (System sterowania silnikiem ZS).....	34
2.4 Методологія діагностичних досліджень та інтерфейси зв'язку	37
2.4.1 Послідовна діагностика (OBDII)	37
2.4.2 Паралельна діагностика (Breakout Box)	37
2.4.3 Симуляція несправностей	37
2.5 Протокол безпеки та експлуатаційні обмеження	38
2.6 Висновки до розділу	39
3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРСУНОК	40
3.1 Планування та програмування параметрів експерименту	40
3.2 Аналіз залежності подачі палива від часу впорскування	41
3.3 Аналіз залежності подачі палива від тиску впорскування	42
3.4 Аналіз нерівномірності паливоподачі між форсунками	43
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	46
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	46
4.2 Заходи безпеки при роботі з гідравлічною системою високого тиску	46
4.3 Електробезпека та експлуатація стенда.....	47
4.4 Вимоги до пожежної безпеки та виробничої санітарії.....	47
4.5 Порядок допуску до роботи	47
4.6 Моделювання травмонебезпечних ситуацій та заходи щодо їх ліквідації	48
4.7 Перша допомога при специфічних травмах	49
4.8 Регламент технічного обслуговування для безпеки	49
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ	51
5.1 Методологія розрахунку основних економічних показників.....	51
5.1.1 Розрахунок витрат на електроенергію	51
5.1.2 Розрахунок амортизаційних відрахувань	51

	6
5.1.3	Визначення річного економічного ефекту 52
5.1.4	Розрахунок терміну окупності..... 52
5.1.5	Оцінка ризику збитків від аварії двигуна 52
5.2	Аналіз капітальних витрат на облаштування діагностичного поста 53
5.3	Розрахунок собівартості діагностики однієї форсунки..... 53
5.4	Порівняльний аналіз із ринковими цінами..... 54
5.5	Оцінка економічних ризиків відмови паливної системи 55
5.6	Висновки по розділу 55
ВИСНОВКИ..... 57	
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 59	

ВСТУП

Сучасний етап розвитку автомобілебудування та сільськогосподарської техніки характеризується жорсткими вимогами до екологічних показників двигунів внутрішнього згоряння та їх паливної економічності. Забезпечення норм токсичності відпрацьованих газів рівня Євро-5, Євро-6 та вище неможливе без застосування високоточних систем паливоподачі. На сьогодні безальтернативним рішенням для дизельних двигунів стала акумуляторна паливна система типу Common Rail, яка дозволяє гнучко керувати параметрами впорскування незалежно від частоти обертання колінчастого вала.

Ключовим елементом системи Common Rail є електрогідравлічна форсунка, яка працює в умовах надвисоких тисків (до 2500 бар і вище) та з мікросекундною швидкодією. У процесі експлуатації характеристики форсунок неминуче змінюються внаслідок зносу прецизійних пар, зміни жорсткості пружин та деградації електричних параметрів. Це призводить до дисбалансу роботи циліндрів, підвищення димності, втрати потужності та виходу двигуна з ладу. Тому дослідження характеристик впорскування та вдосконалення методів діагностування форсунок є важливим науково-практичним завданням, що має значний економічний ефект.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації та діагностування дизельних двигунів шляхом експериментального дослідження вихідних характеристик електрогідравлічних форсунок Common Rail на спеціалізованому стенді.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз конструктивних особливостей та робочих процесів сучасних паливних систем Common Rail.
2. Обґрунтувати методику експериментальних досліджень та описати будову стенду для випробування форсунок (Розділ 2).
3. Експериментально дослідити залежність циклової подачі палива від часу керуючого імпульсу та тиску в паливній рейці.
4. Проаналізувати отримані характеристики та визначити критерії оцінки технічного стану форсунок.

5. Виконати техніко-економічне обґрунтування розробки та використання діагностичного обладнання.

Об'єкт дослідження — процес дозування та подачі палива в акумуляторних системах живлення дизельних двигунів.

Предмет дослідження — робочі характеристики (продуктивність, швидкодія, гідрощільність) електрогідравлічних форсунок системи Common Rail.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи теоретичного аналізу науково-технічної літератури для вивчення стану питання, а також експериментальні методи дослідження на фізичній моделі паливної системи (стенді) з використанням сучасних засобів вимірювальної техніки та подальшою статистичною обробкою отриманих даних.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методика та спроектований діагностичний стенд можуть бути використані на спеціалізованих автосервісних підприємствах для входного контролю та дефектування компонентів паливної апаратури, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців автомобільного профілю.

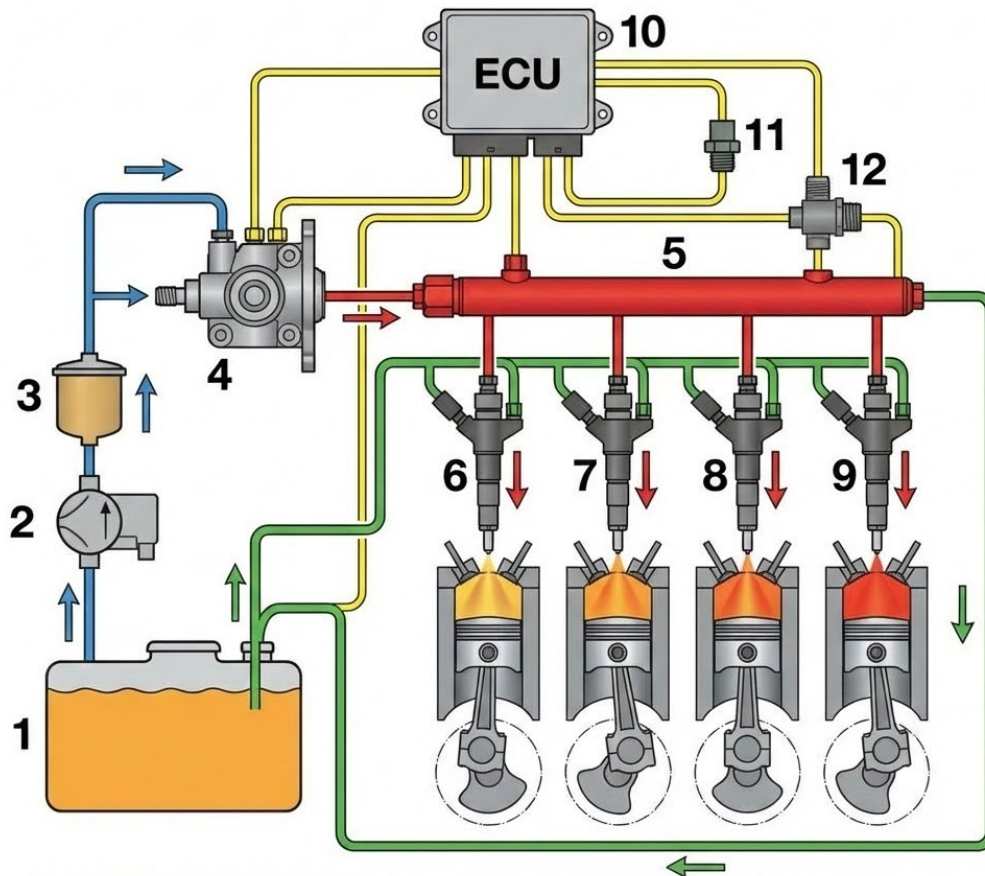
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАЛИВНИХ СИСТЕМ COMMON RAIL ТА ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ СУЧАСНИХ ДИЗЕЛІВ

Технологічна еволюція дизельних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) за останні два десятиліття зазнала фундаментальних змін, зумовлених необхідністю вирішення складної інженерної дилеми: одночасного підвищення питомої потужності, зниження витрати палива та кардинального зменшення токсичності відпрацьованих газів. Ключовим елементом, що уможливив цей технологічний стрибок, стала система акумуляторного впорскування палива Common Rail (CR). На відміну від традиційних систем з кулачковим приводом плунжерів, де тиск впорскування був лінійно залежним від частоти обертання колінчастого вала, архітектура Common Rail базується на принципі розділення процесів створення тиску та безпосереднього впорскування. Це дозволило реалізувати гнучке електронне керування характеристиками впорскування, забезпечуючи стабільний високий тиск у всьому діапазоні навантажень та обертів[1-2].

1.1 Концепція гідравлічної акумуляції та незалежність параметрів

Фундаментальною відмінністю системи Common Rail від попередніх поколінь (рядних ПНВТ, розподільних насосів типу VE, насос-форсунок UI) є наявність паливної рампи (рейки), яка виконує роль гідравлічного акумулятора. У класичних системах стиснення палива відбувалося безпосередньо перед моментом впорскування, що призводило до пульсуючого характеру тиску та неможливості досягнення пікових значень на низьких обертах двигуна.[3]

У системі CR паливний насос високого тиску (ПНВТ) безперервно подає паливо в рампу, де підтримується заданий електронним блоком керування (ЕБК) тиск, незалежно від фази впорскування. Це дозволяє досягати тиску впорскування від 1600 до понад 2500 бар (у системах 4-го покоління), що є критичним для атомізації палива.[4-5]



1 – Паливний бак; 2 – паливний насос низького тиску (підкачувальний насос); 3 – паливний фільтр; 4 – паливний насос високого тиску (пнвт); 5 – акумулятор тиску (Common Rail); 6..9 – форсунки (циліндр 1-4); 10 – електронний блок управління (ECU); 11 – датчик тиску палива; 12 – клапан регулювання тиску палива

Рисунок 1.1 – Схема системи Common Rail

Високий тиск забезпечує дроблення палива на краплі мікронного розміру, що експоненціально збільшує площу поверхні контакту палива з окислювачем (повітрям). Результатом є більш повне згоряння, підвищення термічного ККД циклу та зниження утворення твердих частинок (сажі).

1.2 Стратегія багатофазного впорскування (Rate Shaping)

Можливість керувати відкриттям форсунки незалежно від положення поршня насоса дозволила реалізувати стратегію багатофазного впорскування (Multiple Injection Strategy). Сучасні електромагнітні та п'єзоелектричні форсунки здатні виконувати до 5-7 впорскувань за один робочий цикл, кожне з яких виконує специфічну термодинамічну функцію(табл.1.1).[6,7]

Таблиця 1.1 – Фази впорскування та їх вплив на робочий процес.

Фаза впорскування	Термодинамічна функція та вплив на робочий процес
Попереднє впорскування (Pilot Injection)	Подача надмалої дози палива (1-2 мм ³) за 10-40 градусів до ВМТ. Це ініціює локальні осередки горіння, підвищуючи тиск і температуру в камері згорання. Основний ефект: скорочення періоду затримки займання основної дози, що усуває різке наростання тиску і характерний "дизельний стук", а також знижує пікову температуру, зменшуючи викиди NOx.
Основне впорскування (Main Injection)	Забезпечує основне виділення енергії для створення крутного моменту. Завдяки підготовці камери пілотним впорскуванням, горіння протікає більш плавно та контрольовано.
Післявпорскування (Post Injection)	Відбувається на лінії розширення або такту випуску. Паливо не створює корисної роботи, а використовується для підвищення температури вихлопних газів (Exhaust Gas Temperature Management). Критично важливо для регенерації сажового фільтра (DPF) та керування ефективністю каталізаторів (DOC/SCR).

У табл.1.1 наведено порівняння параметрів паливних систем різних поколінь.[8]

Таблиця 1.2 – Порівняння параметрів паливних систем різних поколінь

Параметр	Рядний ПНБТ (Mechanical Inline)	Common Rail (Solenoid)	Common Rail (Piezo)
Максимальний тиск (Bar)	800 - 1200	1600 - 1800	2000 - 2700+
Керування тиском	Залежне від обертів (Linear)	Незалежне (Closed Loop)	Незалежне (Closed Loop)
Кількість впорскувань за цикл	1	2-5 (Pilot, Main, Post)	5-7+ (Multiple Pilots)
Час відгуку форсунки	Механічний	~200-300 мкс	<100 мкс
Вплив на шум (NVH)	Високий	Середній/Низький	Низький (плавне горіння)
Чутливість до палива	Низька	Середня	Надвисока
Ремонтопридатність	Висока	Висока (Bosch), Низька (Denso)	Низька (часто заміна)

Дослідження показують, що розділення дози палива дозволяє гнучко керувати компромісом між викидами NO_x та сажі (NO_x-PM trade-off). Збільшення кількості пілотних впорскувань дозволяє знизити шум згоряння на 3-5 дБ, наближаючи акустичний комфорт дизеля до бензинових аналогів.

1.3 Паливні насоси високого тиску (ПНБТ)

ПНБТ у системі Common Rail виконує виключно функцію генерації тиску і не бере участі у розподілі палива по циліндрах. Це дозволило спростити кінематику приводу, але суттєво підвищило вимоги до гідравлічної щільності та прецизійності виготовлення плунжерних пар[9,10].

1.3.1 Конструктивні особливості насосів Bosch CP1 та CP3

Насоси Bosch серії CP1 (перше покоління) та CP3 (друге та третє покоління) зарекомендували себе як еталон надійності в індустрії.

Архітектура CP3 (рис.1.2): це радіально-поршневий насос, що зазвичай має три плунжери, розташовані під кутом 120° один до одного. Така схема забезпечує рівномірне навантаження на вал та мінімізує пульсації тиску на виході[11].

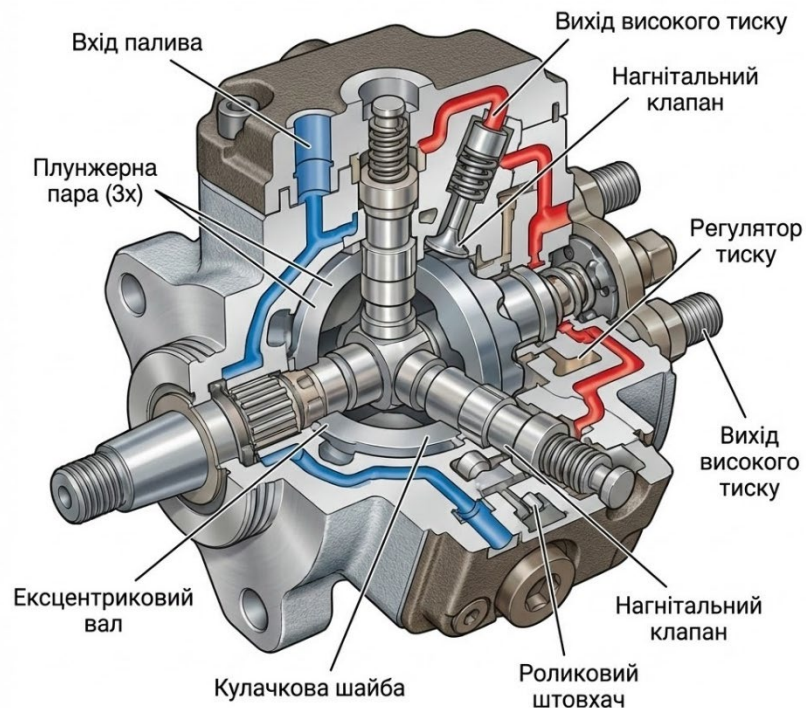


Рисунок 1.2 – Конструкція ПНВТ Bosch CP3

Регулювання продуктивності: у насосах CP3 використовується дозувальний блок (ZME/M-PROP) на лінії всмоктування. Він регулює кількість палива, що потрапляє в надплунжерний простір. Це енергоефективне рішення: насос стискає лише ту кількість палива, яка необхідна двигуну в даний момент, що знижує паразитні навантаження на двигун та запобігає перегріву палива, який був характерний для систем з регулюванням на стороні високого тиску[9].

Матеріалознавство: корпуси CP3 виготовлялися з міцних сортів сталі або чавуну, а пари тертя мали значний запас міцності, що дозволяло їм витримувати роботу на паливі з пониженою змащувальною здатністю[12].

1.3.2 Проблематика та конструктивні дефекти насосів Bosch CP4

З метою зниження ваги та собівартості, а також підвищення тиску до 2000+ бар, компанія Bosch представила серію CP4 (CP4.1 - одноплунжерний, CP4.2 - двоплунжерний). Ця конструкція стала предметом численних дискусій та судових позовів через схильність до катастрофічних відмов[13].

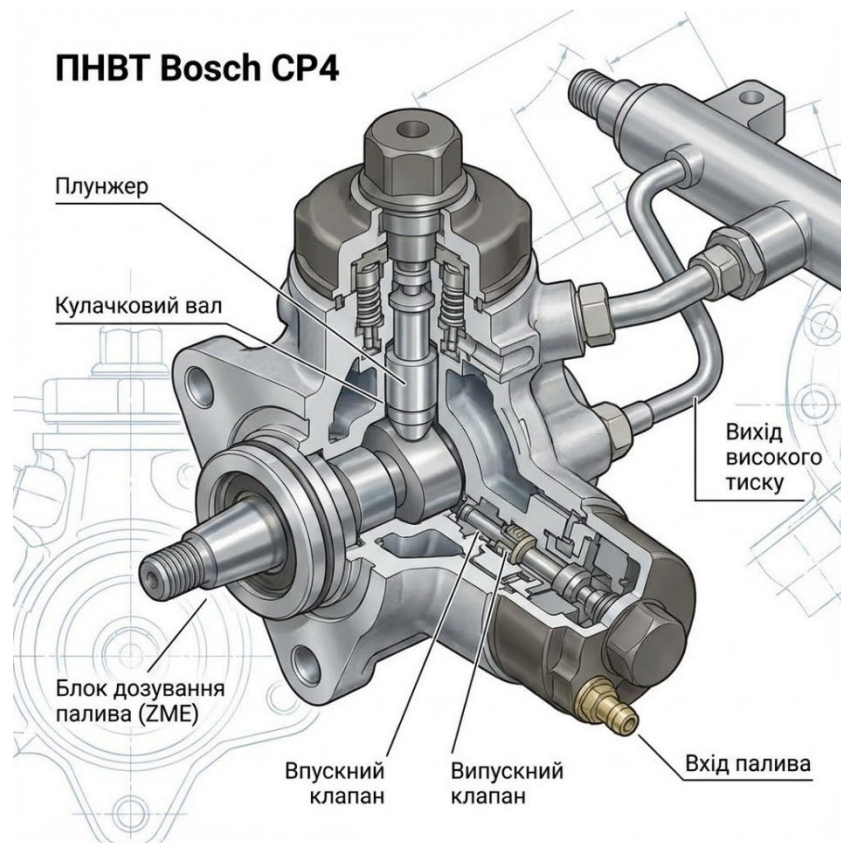


Рисунок 1.3 – Конструкція ПНВТ Bosch CP4

Замість ексцентрикового вала, що штовхає плунжери через "башмаки", CP4 використовує кулачковий вал, по якому котиться ролик штовхача.

Критичним недоліком конструкції CP4 є відсутність механічної фіксації орієнтації ролика відносно кулачка (відсутність шпонки або направляючої лиски). Орієнтація підтримується виключно гідродинамічними силами та пружиною.

У разі потрапляння повітря в систему або використання палива з низькою в'язкістю та змащувальною здатністю (low lubricity), сила тертя між роликом і кулачком зростає. Це може призвести до провороту штовхача на 90 градусів. У такому положенні ролик перестає котитися і починає "фрезерувати" кулачковий вал[7-9].

Процес руйнування генерує велику кількість дрібної металевої стружки (glitter), яка миттєво розноситься зворотними магістралями в бак, а звідти — через фільтр (якщо він не затримує мікрочастинки) знову в насос і форсунки. Це призводить до повного виходу з ладу всієї паливної апаратури (інжекторів, регуляторів, датчиків), що вимагає заміни всіх компонентів та промивки бака.

1.3.3 Порівняльний аналіз з системами Denso та Delphi

Denso (HP2, HP3, HP4). Насоси Denso, зокрема HP3, використовують ексцентриковий вал, що приводить у дію два опозитних плунжери. Особливістю є використання клапана SCV (Suction Control Valve), який може бути нормально відкритим або нормально закритим залежно від модифікації. Насоси Denso відзначаються високою надійністю, однак є чутливими до абразивного зносу клапана SCV, що призводить до плаваючих обертів холостого ходу[15-17].

Delphi. Компанія Delphi часто використовує концепцію роторних насосів з радіальними плунжерами всередині кулачкового кільця (аналогічно до розподільних насосів Lucas DPA/DPS, але для високого тиску). Ці системи (наприклад, DFP1/DFP3) є компактними, але надзвичайно вимогливими до чистоти палива. Знос роликів та кулачкового кільця призводить до утворення металевої пудри, яка забиває форсунки[18].

1.4 Інжектори Common Rail: електрогідравліка та прецизійна механіка

Форсунка є виконавчим елементом системи, що працює в умовах екстремальних навантажень. Сучасна форсунка повинна відкриватися та закриватися за час порядку 0.1-0.2 мілісекунди, дозуючи паливо з точністю до 0.5 мм³ при тиску 2000 бар.

1.4.1 Електромагнітні форсунки (Solenoid Actuated)

Це найбільш розповсюджений тип форсунок, що використовує класичний електромагніт для керування клапаном.

Форсунка працює за принципом гідравлічного підсилення. У закритому стані тиск палива в камері керування (над голкою) і в камері розпилювача (під голкою) однаковий. Оскільки площа поршня керування більша за площу конуса голки, результуюча сила утримує голку закритою. При подачі напруги на соленоїд відкривається кульковий клапан зливу з камери керування. Тиск над голкою падає, і високий тиск під голкою піднімає її, починаючи впорскування.

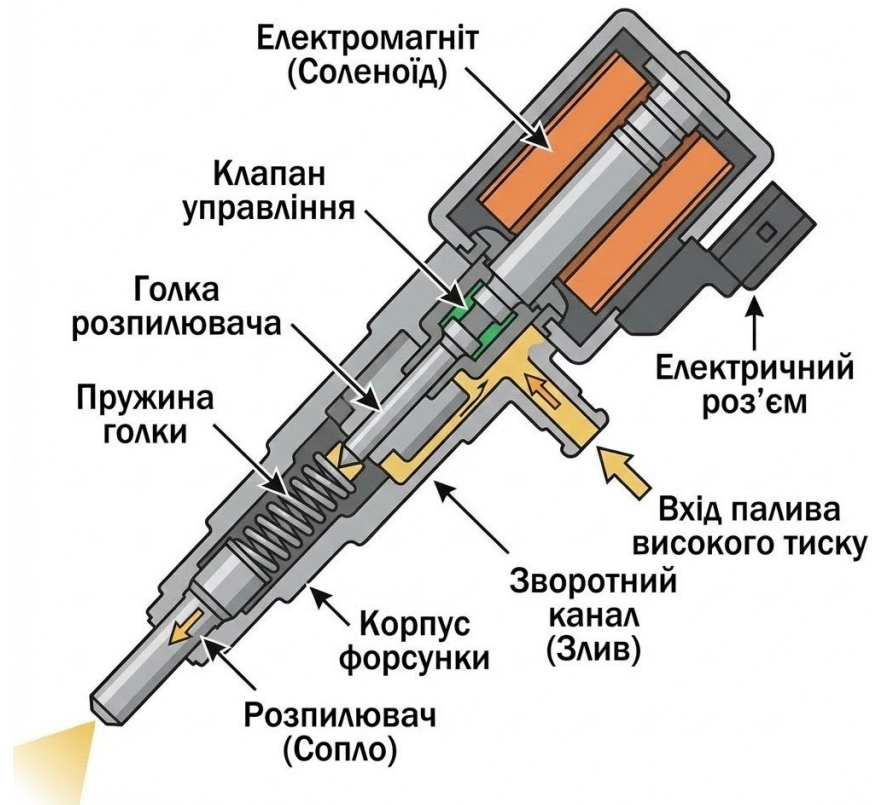


Рисунок 1.4 – Будова електромагнітної форсунки

Електромагнітні форсунки є надійними ("workhorses" дизельної індустрії), ремонтопридатними (можлива заміна клапана-мультиплікатора та розпилювача) та відносно дешевими. Однак їхня інерційність обмежує кількість впорскувань за цикл[7].

1.4.2 П'єзoeлектричні форсунки (Piezo Actuated)

Для реалізації норм Євро-5 і вище, де потрібна максимальна точність дозування, були впроваджені п'єзофорсунки.

Виконавчим елементом є стовпчик (stack) із сотень шарів п'єзокерамічних кристалів. При подачі напруги (зазвичай 110-150В) кристали розширюються, збільшуючи довжину стовпчика.

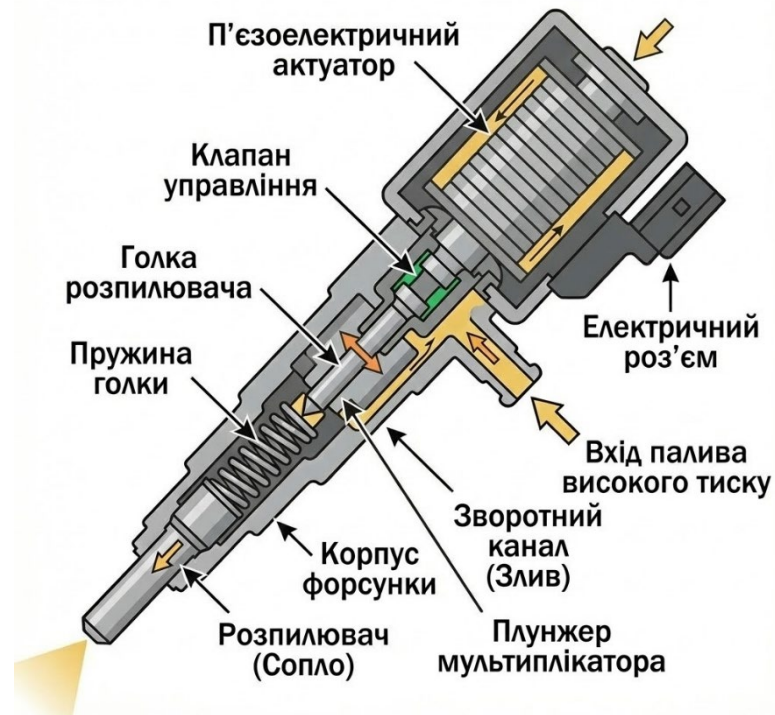


Рисунок 1.5 – Будова п'єзoeлектричної форсунки

Час реакції п'єзoeлемента становить менше 100 мікросекунд, що в 2-3 рази швидше за електромагніт. Це дозволяє реалізувати дуже короткі інтервали між впорскуваннями та прецизійне дозування пілотних доз. У деяких конструкціях (Direct Acting) п'єзoeлемент безпосередньо штовхає голку, усуваючи гідравлічну затримку.

П'єзофорсунки вимагають специфічної діагностики. Окрім перевірки на гідрощільність (злив у зворотну магістраль), критично важливими є електричні параметри:

Для форсунок Bosch типове значення становить 170–210 кОм. Падіння опору свідчить про внутрішнє коротке замикання в шарах кераміки.

Справний п'єзoeлемент діє як конденсатор ємністю 2.0–2.5 мкФ (для Bosch). Зниження ємності вказує на деградацію кристалічної структури.¹⁷

Опір ізоляції повинен перевищувати 300 МОм, оскільки пробій на корпус може пошкодити високовольтний драйвер в ЕБК[18].

1.4.3 Взаємозамінність та кодування (IMA/ISA/QR-коди)

Через неминучі виробничі допуски, кожна форсунка має індивідуальні характеристики продуктивності. На стенді заводу-виробника кожній форсунці

присвоюється унікальний код (IMA, QR, C2I), який містить інформацію про поправки до базової карти впорскування. Введення цього коду в ЕБК є обов'язковим при заміні форсунок для забезпечення рівномірної роботи двигуна[19].

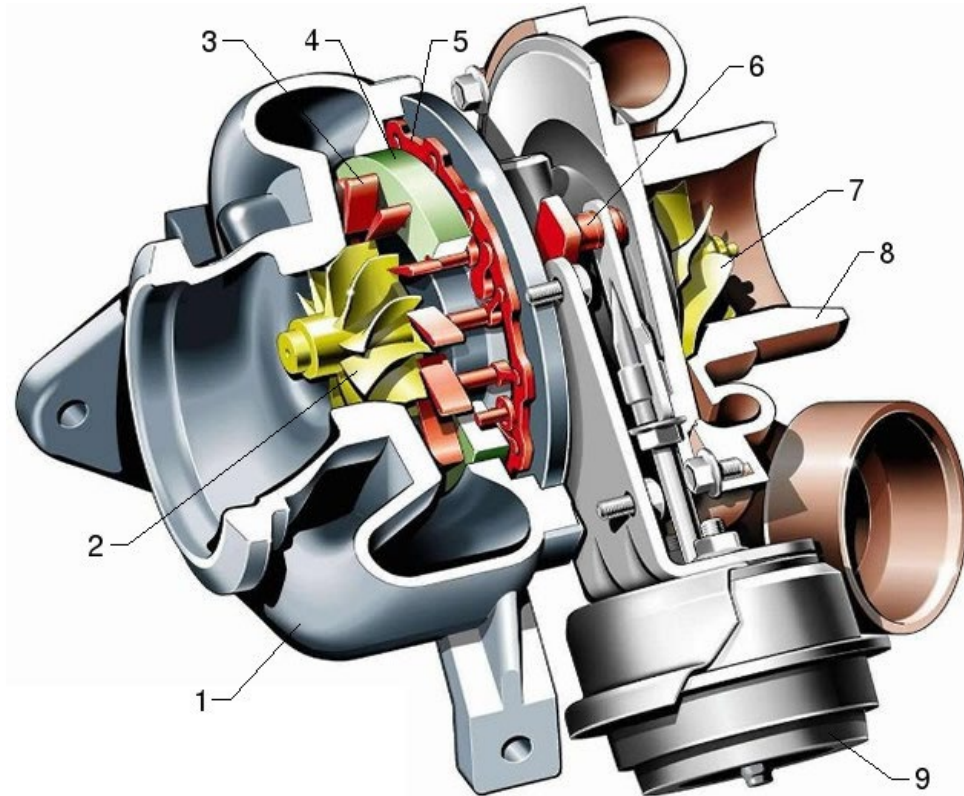
1.5 Повітряний тракт та системи наддуву

Ефективність згоряння в дизельному двигуні лімітується не кількістю палива, а кількістю доступного повітря. Паливна система Common Rail працює в тісній інтеграції з системами керування повітряним потоком.

1.5.1 Турбокомпресори зі змінною геометрією (VGT/VNT)

Для забезпечення високого тиску наддуву в широкому діапазоні обертів використовуються турбіни зі змінною геометрією соплового апарату (Variable Geometry Turbocharger).

Принцип роботи. Навколо турбінного колеса розташоване кільце з рухомими лопатками. На низьких обертах двигуна актуатор (вакуумний або електронний сервопривід) повертає лопатки, звужуючи переріз каналу. Це збільшує швидкість потоку вихлопних газів, розкручуючи турбіну швидше і усуваючи "турбо-яму" (turbo lag). На високих обертах лопатки розкриваються, запобігаючи перекручуванню турбіни та знижуючи протитиск вихлопу.



- 1 – Корпус турбіни; 2 – колесо турбіни; 3 – лопатки (направляючі);
 4 – унісонне кільце (кільце синхронізації); 5 – регульоване кільце;
 6 – система важелів; 7 – колесо компресора; 8 – корпус компресора;
 9 – актуатор

Рисунок 1.6 – Турбіна із змінною геометрією.

Взаємозв'язок з паливною системою. Несправність паливної системи (багата суміш, "ллючі" форсунки) призводить до утворення надмірної кількості сажі. Ця сажа осідає на механізмі геометрії, викликаючи його заклинювання.

Симптоми несправностей: "передув" (Overboost) призводить до аварійного режиму роботи двигуна, "недодув" (Underboost) — до втрати потужності та чорного диму (нестача повітря для згоряння палива)[20].

1.5.2 Вихрові заслінки (Swirl Flaps)

У впускному колекторі багатьох сучасних дизелів (BMW, Mercedes, Opel) встановлені вихрові заслінки.

На низьких навантаженнях заслінки перекривають один з впускних каналів на циліндр. Це збільшує швидкість потоку в другому каналі та створює

тангенціальний вихор (swirl) у камері згоряння, покращуючи сумішоутворення та згоряння при бідних сумішах[21].

Поєднання сажі з системи EGR та масляного туману з системи вентиляції картера (CCV) утворює густий шлам у впускному колекторі. Цей шлам блокує рух заслінок, викликаючи помилки сервоприводу.

У деяких двигунах (наприклад, ранні BMW M47/M57) кріплення заслінок втомлювалося, і металеві елементи потрапляли в циліндр, знищуючи поршень, клапани та турбіну[22]. Сучасні колектори частіше використовують інтегровані пластикові заслінки, які менш схильні до відриву, але все ще страждають від забруднення.

1.5.3 Феномен "Дизельного Розносу" (Runaway Diesel)

Це один з найнебезпечніших сценаріїв відмови дизельного двигуна, пов'язаний з системою наддуву.

Якщо турбокомпресор має значний знос підшипників та ущільнень, моторне мастило під тиском потрапляє у впускний тракт і накопичується в інтеркулері (охолоджувачі наддувочного повітря). При різкому прискоренні потік повітря підхоплює це мастило і подає його в циліндри.

Оскільки моторне мастило є чудовим паливом для дизеля, двигун починає працювати на ньому. Вимкнення запалювання та перекриття подачі дизельного палива форсунками не зупиняє двигун, оскільки "паливо" надходить з повітрям. Двигун неконтрольовано набирає оберти вище червоної зони до моменту механічного руйнування або заклинювання[4-6].

Єдиний спосіб зупинити рознос — фізично перекрити доступ повітря (заслонка "глушилка" на впуску або вуглекислотний вогнегасник). Регулярна перевірка патрубків інтеркулера на наявність мастила є обов'язковою процедурою.

1.6 Системи нейтралізації відпрацьованих газів

1.6.1 Рециркуляція (EGR) та проблеми впуску

Клапан EGR (Exhaust Gas Recirculation) перепускає частину інертних вихлопних газів назад у впуск. Це знижує локальну температуру пікового горіння, запобігаючи утворенню оксидів азоту (NO_x).



Рисунок 1.7 – Схематичне зображення клапану EGR.

Цей процес контролюється електронним блоком керування і зазвичай відбувається за умов неповного навантаження. Вихлопні гази, які майже не містять кисню, змішуються зі свіжим повітрям і надходять у циліндри, витісняючи частину свіжого заряду. Головний ефект полягає у зниженні локальної температури пікового горіння. Оскільки оксиди азоту (NO_x) утворюються переважно за високих температур, зниження температури горіння кардинально зменшує їхні викиди, що є основною метою системи EGR для дотримання екологічних норм. Водночас, система EGR є головним джерелом забруднення впускного тракту, оскільки поєднання сажі та масляного туману призводить до утворення густого шламу. Заклинювання клапана у відкритому положенні викликає втрату потужності та чорний дим через нестачу кисню[12].

1.6.2 Сажовий Фільтр (DPF)

Сажовий фільтр вловлює тверді частинки. Процес його очищення (регенерація) повністю залежить від системи Common Rail.

Для випалювання сажі потрібна температура близько 600°C . Дизельний вихлоп зазвичай холодніший ($200\text{-}300^{\circ}\text{C}$). ЕБК активує режим регенерації, використовуючи пізні післявпорскування. Це паливо окислюється в каталізаторі (DOC) перед фільтром, розігріваючи гази[14].

Під час регенерації значна кількість палива впорскується на такті випуску. Частина цього палива не випаровується, а стікає по стінках циліндра в картер, змішуючись з моторним мастилом. Якщо регенерації відбуваються часто (через міський цикл їзди або несправність), рівень мастила зростає. Розріджене дизелем мастило втрачає захисні властивості, що веде до зносу вкладишів колінвала та турбіни. Це класичний приклад того, як стан паливної системи та режим експлуатації впливають на ресурс двигуна.

1.6.3 Свічки розжарювання

У сучасних дизелях свічки розжарювання (Glow Plugs) працюють не лише при холодному старті (рис.1.8).

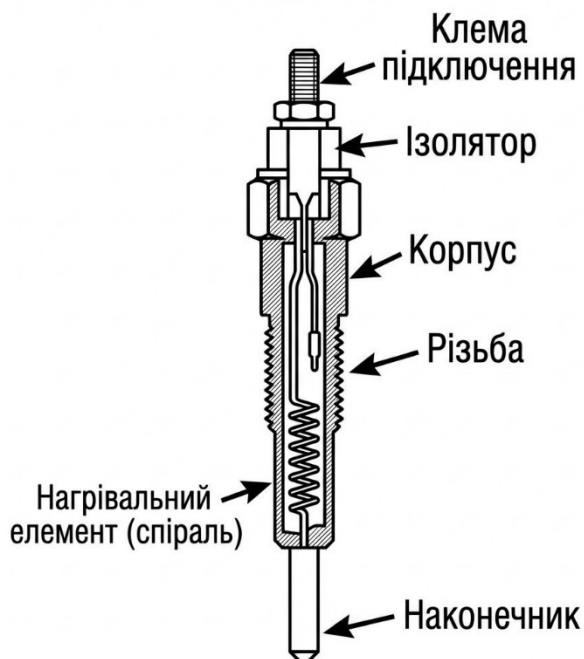


Рисунок 1.8 – Схематичне зображення свічки розжарювання.

- Afterglow. Свічки продовжують працювати після запуску двигуна для стабілізації горіння та зменшення шуму.
- Підтримка DPF. Під час регенерації свічки можуть вмикатися для підвищення навантаження на двигун та температури в камері згоряння.³⁴
- Технології. Керамічні свічки (наприклад, NGK NHTC) здатні нагріватися до 1350°C за секунди і витримувати тривалу роботу в режимі післясвічення. На відміну від металевих, вони є більш крихкими і вимагають особливої обережності при демонтажі, щоб уникнути обламування кінчика в ГБЦ[10,11].

1.7 Експлуатація та діагностика

1.7.1 Якість палива

Паливні системи Common Rail, особливо насоси Bosch CP4 та форсунки Delphi, розроблені під європейський стандарт палива EN 590.

Змащувальна здатність (Lubricity). Це критичний параметр. У процесі гідроочищення для видалення сірки (десульфуризація) з палива видаляються також полярні сполуки, що забезпечують змащування. Стандарт EN 590 вимагає введення протизносних присадок, щоб показник діаметра плями зносу (HFRR) не перевищував 460 мікрон[15].

Хоча Україна законодавчо перейшла на стандарти Євро-5, ризики заправки "сухим" паливом (де сірка видалена, а присадки не додані в достатній кількості або паливо розбавлене гасом) залишаються високими. Для насосів CP4 це смертельно небезпечно, оскільки саме паливо змащує пару "ролик-кулачок". Багато власників використовують промислові присадки або додають 2Т мастило (хоча це суперечливе рішення для DPF) для підвищення змащувальних властивостей.

1.7.2 Двомасовий маховик

Діагностика паливної системи часто ускладнюється впливом трансмісії. Нерівномірна робота двигуна на холостому ходу (вібрація, стукіт) може бути спричинена не форсунками, а зношеним двомасовим маховиком.

Металевий стукіт при зупинці двигуна, вібрація на педалі зчеплення, плаваючі корекції форсунок (ЕБК намагається компенсувати нерівномірність обертання маховика паливом). Важливо відрізнити механічний дисбаланс DMF від пропусків запалювання (misfire).

1.7.3 Комплексна стратегія діагностики

Професійна діагностика не обмежується зчитуванням кодів помилок. Вона включає:

1. Гідравлічний тест (зворотний злив). Вимірювання об'єму палива, що йде в "обратку" з кожної форсунки. Це прямий індикатор зносу клапана-мультиплікатора.
2. Аналіз корекцій (Injector Correction/Balance Rates). ЕБК індивідуально коригує подачу палива для вирівнювання кутової швидкості колінвала. Висока позитивна корекція (>+3 мг) вказує на слабкий циліндр (низька компресія або забита форсунка), негативна — на хорошу компресію або форсунку, що ллє.
3. Перевірка стружки. Огляд стакану паливного фільтра та регулятора тиску на наявність металевих частинок. Наявність блискіток є вироком для ПНВТ.
4. Осцилографування. Перевірка сигналів датчика тиску в рампі (RPS) та струму керування форсунками. RPS є п'єзорезистивним датчиком (міст Уітстона), що видає лінійний сигнал 0.5В (0 бар) — 4.5В (макс. тиск). Шуми або провали в сигналі можуть викликати ривки автомобіля, які не фіксуються як помилки.

1.8 Висновки по розділу

Система Common Rail трансформувала дизельний двигун з "робочої конячки" в високотехнологічний агрегат з вражаючими характеристиками. Однак ця ефективність досягнута ціною ускладнення конструкції та зниження толерантності до неякісного обслуговування.

Основні вимоги, що стосуються експлуатації:

Чистота палива – пріоритет №1. Насоси Bosch CP4 та п'єзофорсунки не пробачають низької змащувальної здатності та наявності води.

Системний підхід. Проблеми з DPF часто є наслідком несправності паливної системи або наддуву, а не самого фільтра.

Профілактика. Скорочення інтервалів заміни паливних фільтрів (до 10-15 тис. км) та використання оригінальних компонентів фільтрації (для затримання частинок 2-5 мікрон) є економічно виправданим заходом для захисту дорогих компонентів паливної апаратури.

Глибоке розуміння фізичних процесів взаємодії компонентів — від гідравліки насоса до термодинаміки регенерації DPF — дозволяє фахівцям переходити від простої заміни деталей до точної діагностики першопричин несправностей, забезпечуючи тривалий ресурс сучасної дизельної техніки.

2 ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ COMMON RAIL

2.1 Концептуальна архітектура та призначення лабораторного комплексу

У сучасному автомобілебудуванні системи акумуляторного впорскування палива Common Rail (CR) є домінуючим стандартом для дизельних двигунів завдяки їхній здатності забезпечувати гнучке керування параметрами впорскування незалежно від частоти обертання колінчастого вала. Для проведення поглиблених досліджень гідродинамічних процесів, алгоритмів електронного керування та діагностики несправностей у даній кваліфікаційній роботі використано спеціалізований навчально-демонстраційний комплекс «Zespół sterowania silnikiem ZS typu Common Rail» (артикул 1 522), розроблений компанією Mechatronika[16].

Цей стенд є складною мехатронною системою, що інтегрує компоненти реальної паливної апаратури з електронними емуляторами та вимірювальними інтерфейсами. Його архітектура побудована за модульним принципом і складається з двох функціонально взаємопов'язаних, але фізично розділених блоків:

1. **Модуль приводу та гідравліки (Zespół sterowania pompą i wtryskiwaczami):** забезпечує фізичну реалізацію процесів створення високого тиску, його акумуляції та розподілу через електрогідравлічні інжектори. Цей модуль може функціонувати як автономна одиниця для гідравлічних випробувань або як ведений виконавчий блок у складі комплексної системи.
2. **Модуль електронного керування (Zespół sterowania silnikiem ZS):** являє собою апаратно-програмний симулятор, що відтворює логіку роботи електронного блоку управління (ЕБУ/ECU) двигуна. Він містить інтерфейси для імітації сигналів датчиків, що дозволяє досліджувати

реакцію системи на зміну зовнішніх умов без необхідності проведення дорожніх випробувань.¹



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд лабораторного комплексу.

Наукова цінність даного обладнання полягає у можливості безпечної візуалізації швидкоплинних процесів впорскування, проведенні параметричних досліджень у контрольованих умовах та реалізації сценаріїв несправностей (Fault Injection), що є критично важливим для верифікації діагностичних алгоритмів.

2.2 Характеристика підсистеми генерації високого тиску та гідравліки

Гідравлічна частина стенду є фізичною моделлю паливної системи двигуна із запалюванням від стиснення, адаптованою для лабораторних умов. Вона дозволяє досліджувати характеристики насоса високого тиску, динаміку тиску в рейці (Rail) та витратні характеристики інжекторів (рис.2.2).

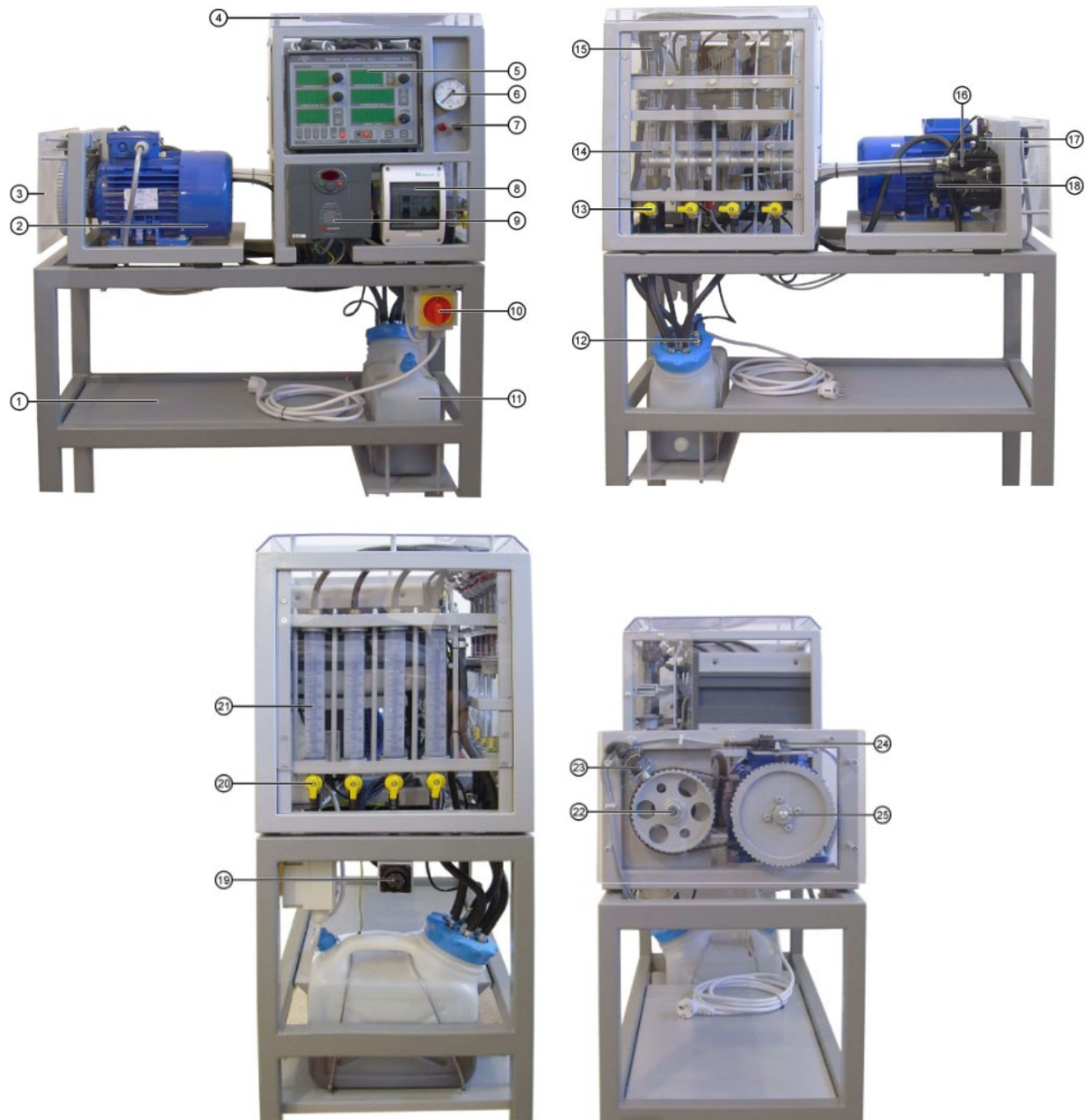


Рисунок 2.2 – Підсистема генерації високого тиску та гідравліки

1 – Полиця для елементів і допоміжних приладів; 2 – двигун приводу паливного насоса високого тиску; 3 – захист шківів приводу та насоса; 4 – захист паливних трубопроводів високого тиску; 5 – модуль керування CR; 6 – манометр тиску палива на вході насоса високого тиску; 7 – затискачі вихідної напруги 12V/2A; 8 – коробка з основними запобіжниками; 9 – перетворювач частоти (інвертор); 10 – головний вимикач системи керування та приводу; 11 – паливний бак із подаючим електричним паливним насосом; 12 – роз'єм електричного паливного насоса; 13 – зливні клапани мірних мензурок подачі форсунок; 14 – мензурки для вимірювання подачі; 15 – електрофорсунки палива; 16 – насос високого тиску; 17 – електромагніт секції насоса високого тиску; 18 – клапан регулювання тиску палива; 19 – з'єднувальне гніздо із зовнішньою системою керування; 20 – зливні клапани мірних мензурок зворотного зливу форсунок; 21 – мензурки для вимірювання зливу; 22 – приводне колесо паливного насоса зі знаком фаз газорозподілу; 23 – датчик Холла фаз газорозподілу; 24 – індукційний датчик положення вала привідного двигуна.

2.2.1 Електромеханічний привід та кінематика

Основою енергетичної установки стенду є трифазний асинхронний електродвигун, який виконує функцію імітатора двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) у частині приводу навісного обладнання.

- Тип двигуна: асинхронний двигун змінного струму з короткозамкненим ротором.
- Номінальна потужність: 2,2 кВт, що є достатнім для подолання значного реактивного моменту опору паливного насоса при тисках до 1600 бар.¹
- Схема підключення: обмотки статора з'єднані за схемою «трикутник» (Δ), що обумовлено характеристиками вихідної напруги застосованого перетворювача частоти (3 x 230 В).

Керування частотою обертання здійснюється за допомогою мікропроцесорного тиристорного перетворювача частоти (інвертора), розміщеного на бічній панелі стенду. Використання частотного регулювання (VFD — Variable Frequency Drive) дозволяє плавно змінювати кутову швидкість вала електродвигуна в широкому діапазоні — від 0 до 5000 хв⁻¹.¹ Така система керування має низку переваг для дослідницьких цілей:

1. Стабілізація обертів: інвертор підтримує задану швидкість незалежно від зміни навантаження (наприклад, при різкому зростанні тиску в рейці), що забезпечує високу повторюваність експериментів.
2. Розширений діапазон: можливість генерації вихідної частоти понад 50 Гц дозволяє досліджувати роботу паливної апаратури на режимах, що перевищують номінальні оберти дизельного двигуна (overspeed test), перевіряючи запас міцності компонентів.

Передача крутного моменту від вала електродвигуна до вала паливного насоса високого тиску (ПНВТ) реалізована за допомогою зубчастої пасової передачі.¹ Це рішення імітує реальні умови роботи приводу ГРМ автомобіля, де відсутність проковзування є критичною для синхронізації фаз газорозподілу та впорскування. На шківі насоса нанесені кутові мітки, які у поєднанні зі стробоскопічним обладнанням дозволяють проводити дослідження кута випередження впорскування та фазових характеристик подачі палива. Для

мінімізації впливу вібрацій, що виникають внаслідок нерівномірності крутного моменту при плунжерному стисненні, моторна рама встановлена на віброізолюючих гумових амортизаторах.¹

2.2.2 Конструкція та термодинаміка насоса "Radialjet"

Ключовим вузлом гідравлічної системи є насос високого тиску типу Radialjet. Це радіально-плунжерний насос, конструктивна схема якого передбачає розташування трьох насосних секцій у радіальній площині під кутом 120° одна відносно одної.²

Принцип дії та кінематика.

Обертання ексцентрикового вала перетворюється на зворотно-поступальний рух плунжерів. Рознесення робочих ходів на 120° забезпечує рівномірне перекриття фаз нагнітання, що суттєво знижує амплітуду пульсацій тиску в акумуляторі палива порівняно з одно- або двоплунжерними насосами.²

1. Такт всмоктування: Плунжер рухається до нижньої мертвої точки (НМТ), створюючи розрідження в надплунжерному просторі. Впускний клапан відкривається, і паливо з контуру низького тиску заповнює камеру.
2. Такт нагнітання: При русі до верхньої мертвої точки (ВМТ) впускний клапан закривається. Тиск палива стрімко зростає. При досягненні значення, що перевищує тиск у рейці, відкривається випускний кульковий клапан, і порція палива виштовхується в магістраль високого тиску.

Технічні характеристики насоса Radialjet (типові для стенду):

- Максимальний робочий тиск: до 1600 бар (160 МПа).
- Кількість секцій: 3.
- Охолодження та змащення: здійснюється робочою рідиною (дизельне паливо або калібрувальна рідина). Це накладає суворі вимоги до в'язкості та змащувальних властивостей використовуваного середовища для запобігання адгезійному зносу прецизійних пар.

Насос стенду може бути оснащений електромагнітним клапаном відключення секції (Third Piston Deactivation). Це технічне рішення дозволяє зменшити продуктивність насоса та споживану потужність на режимах низьких

навантажень шляхом гідравлічного блокування впускного клапана однієї з секцій, що повертає паливо назад у контур низького тиску без стиснення.

2.2.3 Паливна рампа та інжектори

Акумулятор палива (Common Rail) виконує функцію гідропневматичного демпфера, згладжуючи пульсації тиску від насоса та забезпечуючи стабільний тиск перед інжекторами. На стенді рампа оснащена датчиком високого тиску (тензометричного типу), сигнал з якого є основним параметром зворотного зв'язку для системи керування.

Електрогідравлічні інжектори, встановлені на стенді, дозволяють моделювати процеси попереднього (pilot), основного (main) та післявпорскування (post-injection). Управління інжекторами базується на принципі гідравлічного сервоприводу: електромагніт відкриває лише керуючий клапан, а підйом голки розпилювача відбувається за рахунок різниці тисків у камері керування та камері розпилювача.

2.2.4 Система вимірювання витрат та термостабілізації

Для кількісної оцінки роботи паливної апаратури стенд обладнано прецизійною системою вимірювання об'ємної витрати, яка реалізована за допомогою блоку скляних мензурок (бюреток).

Таблиця 2.1 – Методика вимірювання витрат палива.

Параметр	Призначення	Методика вимірювання
Циклова подача	Вимірювання об'єму палива, впорскуваного через розпилювач за певну кількість циклів.	Паливо з розпилювачів спрямовується у калібровані мензурки (поз. 14). Вимірювання проводиться після заданої кількості імпульсів (наприклад, 1000 циклів).
Зворотний злив	Оцінка об'єму палива, що проходить через контур керування інжектора та витоки по штоку.	Паливо зі штуцерів зворотного зливу інжекторів подається в окремі мензурки (поз. 21). Є ключовим індикатором гідроцільності та зносу мультиплікатора.

Після завершення вимірювання паливо з мензурок повертається у бак (11) через систему зливних клапанів (13, 20).

Важливим компонентом є охолоджувач палива (радіатор), інтегрований у лінію зворотного зливу.¹ Оскільки процес стиснення палива до 1600 бар супроводжується значним виділенням теплоти (адіабатичний нагрів), а дроселювання у клапанах регуляторів додатково підвищує температуру, відсутність охолодження призвела б до зміни в'язкості рідини та похибок вимірювання, а також до ризику пошкодження електронних компонентів, що охолоджуються паливом.

2.3 Електронна архітектура керування та симуляції

Система керування стендом розподілена між двома контролерами, кожен з яких виконує специфічні функції: модуль безпосереднього керування виконавчим механізмом (драйвер) та модуль логічного керування (симулятор ЕБУ).

2.3.1 Модуль драйвера CR-5 (*Moduł sterujący CR*)

Цей пристрій, розташований над перетворювачем частоти, є силовим інтерфейсом стенду. Він забезпечує перетворення низькострумівих логічних сигналів у потужні імпульси струму, необхідні для роботи індуктивних навантажень (клапанів насоса та інжекторів) (рис.2.3).

Функціональні можливості та органи керування:

1. **Керування тиском:** Модуль генерує широтно-імпульсно модульований сигнал (ШИМ/PWM) для клапана регулювання тиску (DRV/PCV). На дисплеї (J) відображається коефіцієнт заповнення (Duty Cycle) у відсотках. Оператор має можливість змінювати шпаруватість сигналу за допомогою поворотного енкодера (L), що прямо впливає на тиск у рейці.¹
2. **Параметризація впорскування:**
 - **Частота (F):** Регулювання частоти слідування імпульсів впорскування (Гц).
 - **Тривалість (H):** Задання часу відкритого стану інжектора (мкс/мс), що визначає величину циклової подачі.
3. **Лічильник циклів:** Вбудований програмний лічильник дозволяє автоматизувати процес вимірювання, зупиняючи подачу імпульсів після

досягнення заданої кількості впорскувань (наприклад, 100, 200, 1000). Це забезпечує високу точність усереднення результатів вимірювання витрати.

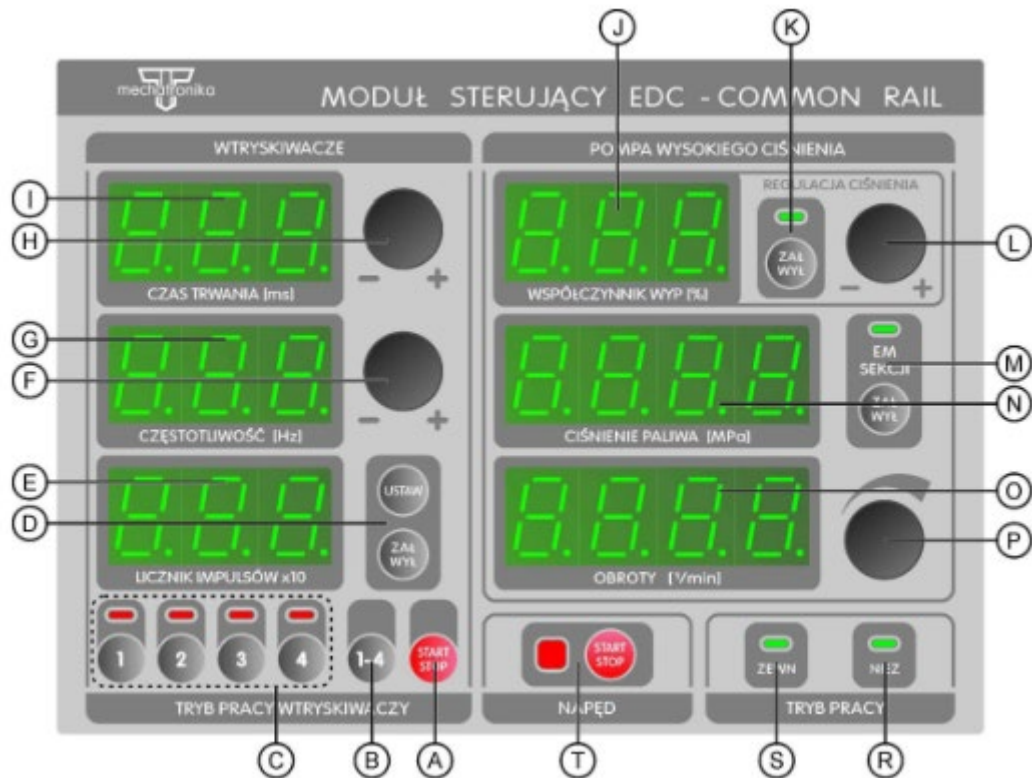


Рисунок 2.3 – Модуль драйвера CR-5.

А. Кнопка START/STOP для ввімкнення виходів форсунок; В. Кнопка вибору 4 активних виходів форсунок; С. Кнопки вибору активного виходу форсунки 1 ÷ 4; D. Кнопки ввімкнення/вимкнення та налаштування лічильника імпульсів упорскування; Е. Дисплей кількості імпульсів для відліку лічильником; F. Регулятор зміни частоти імпульсу упорскування; G. Дисплей встановленої частоти імпульсу упорскування; H. Регулятор зміни тривалості імпульсу упорскування; I. Дисплей тривалості імпульсу упорскування; J. Дисплей значення коефіцієнта заповнення сигналу керування клапаном регулювання тиску палива; K. Кнопка ввімкнення та індикатор стану виходу регулювання тиску палива; L. Регулятор зміни коефіцієнта заповнення сигналу керування регулятором тиску палива; M. Кнопка ввімкнення та індикатор стану виходу електромагніта секції насоса; N. Дисплей значення тиску палива; O. Дисплей кількості обертів паливного насоса; P. Регулятор обертів паливного насоса; R. Індикатор режиму роботи – НЕЗАЛЕЖНИЙ; S. Індикатор режиму роботи – ЗОВНІШНІЙ; T. Кнопка START/STOP та індикатор ввімкнення приводу.

Режими роботи:

- **Автономний (Niezależny):** Модуль генерує керуючі сигнали самостійно на основі ручних налаштувань оператора. Використовується для перевірки

окремих компонентів (наприклад, тест насоса "на пробку" або перевірка гідрощільності інжектора без підключення до моделі двигуна).

- **Зовнішній (Zewnętrzny):** Модуль працює як ретранслятор сигналів від симулятора ЕБУ двигуна. У цьому режимі параметри впорскування визначаються картами паливоподачі, закладеними в пам'ять "віртуального" блоку керування.¹

2.3.2 Симулятор системи керування двигуном (*System sterowania silnikiem ZS*)

Цей модуль моделює роботу електронної системи керування Bosch EDC15C7, що застосовується на двигунах 1.9/2.4 JTD (Alfa Romeo/Fiat). Він дозволяє досліджувати логіку прийняття рішень ЕБУ на основі вхідних даних від датчиків.

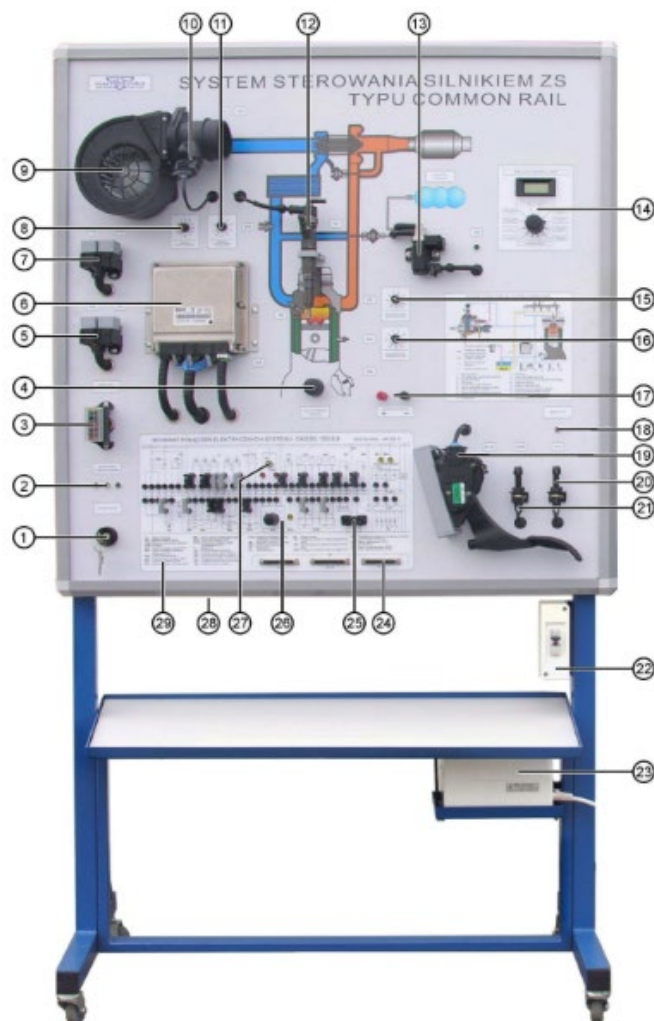


Рисунок 2.4 – Симулятор системи керування двигуном.

1 – Замок запалювання (вимикач запалювання); 2 – Контрольні лампи наявності

напруги в колах: живлення — «30», «15» та «50»; 3 – Запобіжники кіл: паливного насоса, живлення «30», «15», «50»; 4 – Регулювання частоти обертання двигуна; 5 – Реле: головне реле системи та реле електричного паливного насоса; 6 – Контролер (блок керування) системи; 7 – Реле вентилятора радіатора; 8 – Потенціометр регулювання продуктивності вентилятора (нагнітача) з вимикачем; 9 – Вентилятор (нагнітач) повітря; 10 – Датчик масової витрати повітря (витратомір); 11 – Потенціометр симуляції датчика тиску наддуву; 12 – Паливна форсунка №1; 13 – Клапан рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) з індикатором роботи; 14 – Показчик напруги системи з перемикачем; 15 – Потенціометр симуляції датчика температури палива; 16 – Потенціометр симуляції датчика температури двигуна; 17 – Клеми вихідної напруги 12В/2А; 18 – Контрольна лампа сигналу гальмування (STOP); 19 – потенціометр педалі акселератора; 20 – Вимикач (датчик) положення педалі гальма; 21 – Вимикач (датчик) положення педалі зчеплення; 22 – Головний запобіжник/вимикач стенда; 23 – Розділовий (безпечний) трансформатор; 24 – Гнізда паралельної діагностики ADP-124/186; 25 – Роз'єм послідовної діагностики OBDII; 26 – Симуляція датчика тиску (пресостата) з індикатором клімат-контролю; 27 – Контрольна лампа самодіагностики (Check Engine); 28 – Роз'єм виконавчих та керуючих кіл для з'єднання з модулем керування та приводу; 29 – Принципова схема з вимірювальною панеллю, симуляцією несправностей та контрольними лампами системи.

Симуляція величин сенсорів.

Стенд використовує набір потенціометрів та фізичних пристроїв для імітації сигналів датчиків, дозволяючи змінювати робочу точку двигуна статично (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Симуляція сигналів датчиків

Датчик	Позначення	Метод симуляції на стенді	Вплив на роботу системи
Датчик положення педалі акселератора (APP)	B138 / Поз. 19	Потенціометр	Визначає запит водія на крутний момент. Основний фактор для розрахунку циклової подачі.
Витратомір повітря (MAF)	B30 / Поз. 10	Фізичний датчик з примусовою продувкою (вентилятор поз. 9)	Використовується для обмеження димності (Smoke limiter). Регулюючи оберти вентилятора (поз. 8), можна досліджувати корекцію паливоподачі за масою повітря.
Датчик температури охолоджувальної рідини (ECT)	B24 / Поз. 16	Потенціометр	Імітація теплового стану. Дозволяє моделювати режим "холодного пуску" (збагачення суміші, зміна кута випередження).
Датчик температури палива	B31 / Поз. 15	Потенціометр	Впливає на розрахунок густини палива та корекцію тривалості впорскування.
Датчик тиску наддування (MAP)	B83 / Поз. 11	Потенціометр	Імітує тиск у впускному колекторі. Критичний для роботи турбокомпресора. Примітка: Неузгодженість між обертами двигуна та сигналом MAP може викликати помилку достовірності сигналу в ЕБУ.1
Датчик фаз (CMP)	B132 / Поз. 23	Датчик Холла біля шківів насоса	Синхронізація впорскування з тактом стиснення першого циліндра.
Датчик колінвала (СКР)	B54 / Поз. 24	Індуктивний датчик біля шківів двигуна	Визначення частоти обертання та кутового положення вала.

2.4 Методологія діагностичних досліджень та інтерфейси зв'язку

Стенд надає досліднику інструментарій для проведення як послідовної (програмної), так і паралельної (апаратної) діагностики.

2.4.1 Послідовна діагностика (OBDII)

На фронтальній панелі розміщено стандартний 16-контактний діагностичний роз'єм (DLC) стандарту OBDII (поз. 25). Він підключений до K-Line лінії діагностики ЕБУ. Це дозволяє підключати зовнішні сканери (наприклад, Bosch KTS, Теха, Launch) для виконання наступних операцій:

- Зчитування кодів помилок (DTC): аналіз реакції системи на введені несправності.
- Перегляд поточних даних (Live Data): моніторинг тиску в рейці, тривалості впорскування, статусу датчиків у реальному часі.
- Активні тести: керування виконавчими механізмами (наприклад, примусове відкриття клапана EGR) через діагностичний прилад.

2.4.2 Паралельна діагностика (Breakout Box)

Унікальною особливістю стенду є поле комутації для паралельної діагностики (поз. 24). Воно являє собою масив лабораторних гнізд, які електрично з'єднані з кожним піном роз'єму ЕБУ. Таблиця комутації 1 дозволяє ідентифікувати призначення кожного гнізда.

Це дозволяє використовувати осцилограф (наприклад, ADP-124) для:

- Аналізу форми сигналів датчиків (наприклад, перевірка амплітуди сигналу індуктивного датчика колінвала).
- Вимірювання шпаруватості ШІМ-сигналів регуляторів.
- Дослідження перехідних процесів на клемах форсунок (виявлення індуктивних сплесків напруги до 80В при закритті форсунки).

2.4.3 Симуляція несправностей

Стенд обладнано системою фізичної симуляції несправностей. На електричній схемі встановлені знімні перемички (zworki). Вилучення перемички створює ефект "обриву ланцюга" (Open Circuit) для відповідного компонента. Це дозволяє студентам та дослідникам відпрацьовувати алгоритми пошуку

несправностей, спостерігаючи за реакцією ЕБУ (перехід в аварійний режим, обмеження обертів, фіксація заміщених значень параметрів).¹

2.5 Протокол безпеки та експлуатаційні обмеження

Робота з лабораторним стендом вимагає суворого дотримання правил техніки безпеки, зумовлених наявністю небезпечних факторів: високої напруги (380/230 В) та надвисокого гідравлічного тиску (до 1600 бар).

1. Електробезпека:

- Стенд підключається до мережі через розділовий трансформатор безпеки (поз. 23), що забезпечує гальванічну розв'язку від промислової мережі та захист від ураження електричним струмом.
- Система захисту включає автоматичні вимикачі та пристрій захисного відключення (ПЗВ), працездатність якого необхідно перевіряти щомісяця натисканням кнопки "Т".
- Заборонено проводити будь-які комутації високовольтних кіл при увімкненому живленні.

2. Гідравлічна безпека:

- Захисні екрани: Усі рухомі частини приводу (ремені, шківи) та елементи високого тиску закриті прозорими кожухами з полікарбонату (поз. 3, 4). Робота зі знятими кожухами суворо заборонена. Струмінь палива під тиском 1600 бар має величезну кінетичну енергію і здатен проникати глибоко в м'які тканини людини, викликаючи некроз та важкі токсичні ураження (hydraulic injection injury)[23].
- Герметичність: Перед кожним запуском необхідна візуальна перевірка трубок високого тиску та з'єднань на предмет витоків.
- Використання рідин: Рекомендовано використання калібрувальної рідини ISO 4113 (наприклад, Kalibrol), яка має стабільні в'язкісні характеристики, високу температуру спалаху та антикорозійні присадки, на відміну від стандартного дизельного палива, яке має різкий запах та є більш пожежонебезпечним.

3. Експлуатаційний режим:

- Заборонено вмикати живлення клапанів насоса та інжекторів без прокачування палива. Паливо виконує роль охолоджувача для електромагнітних котушок; робота "на суху" призводить до їх швидкого перегріву та виходу з ладу.
- При завершенні роботи необхідно скинути тиск у системі та перевести всі органи керування у нульове положення.

2.6 Висновки до розділу

Описаний лабораторний комплекс "Mechatronika" є високотехнологічним інструментом, що поєднує в собі фізичну модель гідравлічної системи Common Rail другого покоління та математичну модель системи електронного керування EDC15. Конструкція стенду, що включає промисловий насос Radialjet, реальні електрогідравлічні інжектори та прецизійну вимірювальну систему, дозволяє отримувати достовірні експериментальні дані, які корелюють з характеристиками реальних автомобільних двигунів.

Можливість незалежного регулювання частоти обертання, тиску та параметрів впорскування, а також широкий спектр діагностичних функцій (OBDII, паралельна діагностика, симуляція несправностей), роблять цей стенд оптимальною базою для проведення кваліфікаційного дослідження, спрямованого на аналіз ефективності алгоритмів керування паливоподачею та діагностики сучасних дизельних двигунів.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРСУНОК

3.1 Планування та програмування параметрів експерименту

Для отримання достовірних характеристик було розроблено план експерименту, що базується на можливостях модуля керування. Основними чинниками впливу (незалежними змінними) було обрано:

Тиск у паливній рампі (P_{rail}), що регулюється в діапазоні до 150 МПа.

Тривалість керуючого імпульсу (t_{inj}), що задається з точністю до мілісекунд.

Кількість циклів впорскування (N), що контролюється вбудованим лічильником для мінімізації похибки вимірювання об'єму.

Для забезпечення точності вимірювань кожен дослід проводився після стабілізації температури палива, що забезпечувалося роботою системи охолодження з вентилятором.

У ході експерименту було проведено серію замірів для чотирьох електромагнітних форсунок у діапазоні тривалості імпульсу від 0,2 мс до 2,0 мс. Вимірювання проводилися при фіксованих значеннях тиску в акумуляторі палива: 30, 50, 70, 100 та 130 МПа.

Для кожного режиму розраховувалася середня циклова подача q_{avg} [мм³/цикл] за формулою:

$$q_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^4 q_i}{4} \quad (3.1)$$

Нерівномірність подачі палива розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{average}} \cdot 100\%. \quad (3.2)$$

Згідно з результатами тестів, якщо відхилення δ перевищує 5%, форсунки потребують індивідуального кодування (IMA/ISA-коди) або механічного регулювання.

Результати усереднених значень паливоподачі зведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Зведені результати вимірювання середньої циклової подачі палива q_{avg} , мм³/цикл

Час впорскування (t), мс	30 МПа	50 МПа	70 МПа	100 МПа	130 МПа
0,2	0,04	0,9	1,67	4	5,15
0,3	0,25	1,95	4,08	6,88	9
0,5	1,6	7,42	11,75	21	26,25
0,75	5,56	19,5	28,21	36	40
1	13,75	29	38,5	45,63	49,17
1,25	23	36,5	45,83	56,67	55
1,5	31	41	54,17	64,17	72,5
1,75	35,5	49	63,33	65,83	77,5
2	40,63	57	70,83	77	85

Аналізуючи дані із зведеної таблиці можна зробити такі припущення:

У зоні холостого ходу (0,2–0,5 мс) спостерігається найнижча стабільність. При низькому тиску (30 МПа) форсунки майже не відкриваються, що є нормою для багатьох систем CR перших поколінь.

У зоні середніх навантажень (0,75–1,25 мс) подача зростає майже лінійно. Це основний діапазон роботи двигуна при рівномірному русі.

У зоні максимальних навантажень (1,5–2,0 мс) при тиску 130 МПа подача досягає 85 мм³/цикл, що відповідає режиму повної потужності.

3.2 Аналіз залежності подачі палива від часу впорскування

Графічна інтерпретація результатів (рис. 3.1) демонструє виражену нелінійність у зоні малих тривалостей імпульсу (до 0,5 мс).

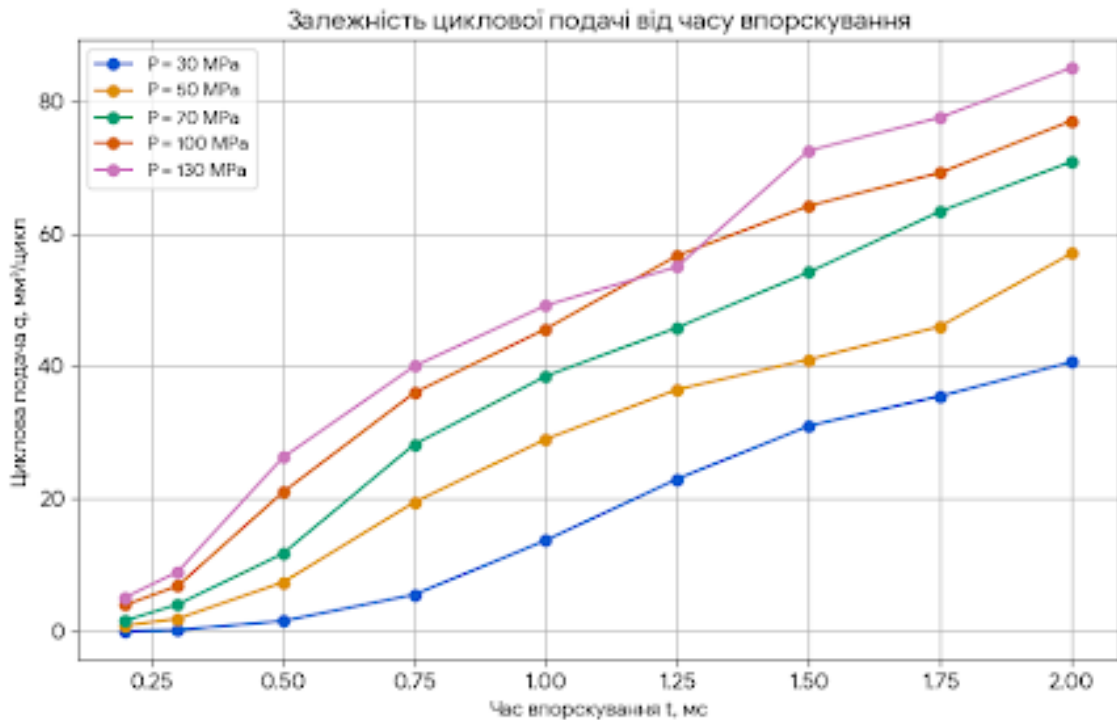


Рисунок 3.1 – Залежність циклової подачі від часу керуючого імпульсу при різних тисках.

Аналізуючи графік отримуємо такі висновки:

1. Поріг відкриття. При тиску 30 МПа та часі 0,2 мс подача майже відсутня ($0,04 \text{ мм}^3$), що свідчить про те, що енергії імпульсу та гідравлічного зусилля недостатньо для повного підняття голки.
2. Лінеаризація. Починаючи з $t = 0,75$ мс, характеристики набувають лінійного вигляду для всіх рівнів тиску. Це робоча зона режиму основного впорскування (Main Injection).
3. Чутливість. Зі зростанням тиску кут нахилу кривих збільшується, що вказує на підвищення чутливості системи до точності формування часових імпульсів ЕБК.

3.3 Аналіз залежності подачі палива від тиску впорскування

Дослідження впливу тиску в рампі на продуктивність при фіксованому часі впорскування дозволяє оцінити динамічний діапазон системи (рис. 3.2).

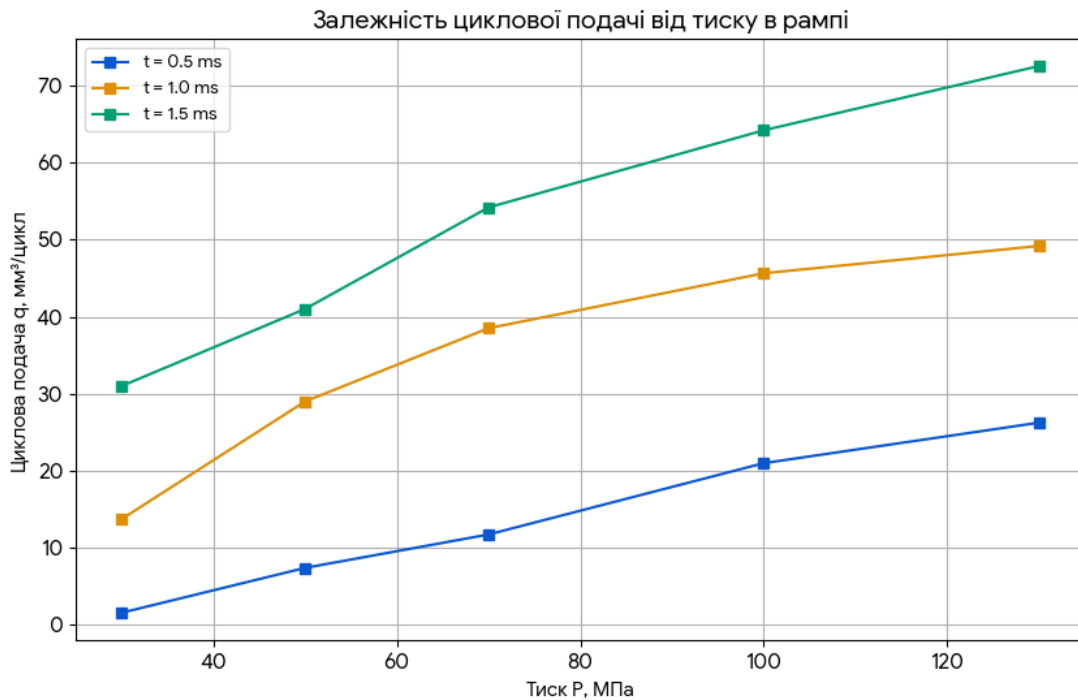


Рисунок 3.2 – Вплив тиску в паливній рампі на об'єм циклової подачі.

При збільшенні тиску з 30 до 130 МПа (у 4,3 раза) для імпульсу 1,0 мс циклова подача зростає з 13,75 до 49,17 мм³/цикл. Це підтверджує можливість системи Common Rail забезпечувати як економічні режими холостого ходу, так і максимальну потужність двигуна за рахунок маніпулювання лише тиском, не змінюючи фази газорозподілу.

3.4 Аналіз нерівномірності паливоподачі між форсунками

На основі експериментальних даних для режиму номінального навантаження ($P = 100$ МПа, $t = 1,0$ мс) було розраховано коефіцієнт нерівномірності δ :

- $q_{max} = 50,0$ мм³ (Форсунка №3)
- $q_{min} = 40,0$ мм³ (Форсунка №2)
- $q_{mean} = 45,63$ мм³

$$\delta = \frac{50,0 - 40,0}{45,63} \cdot 100\% = 21,92\%$$

Гістограма (рис. 3.3) відображає розподіл об'ємів впорскування між чотирма форсунками. Згідно з вимогами виробників паливної апаратури (Bosch,

Denso), допустиме відхилення подачі в одному комплекті не повинно перевищувати $\pm 5\%$.

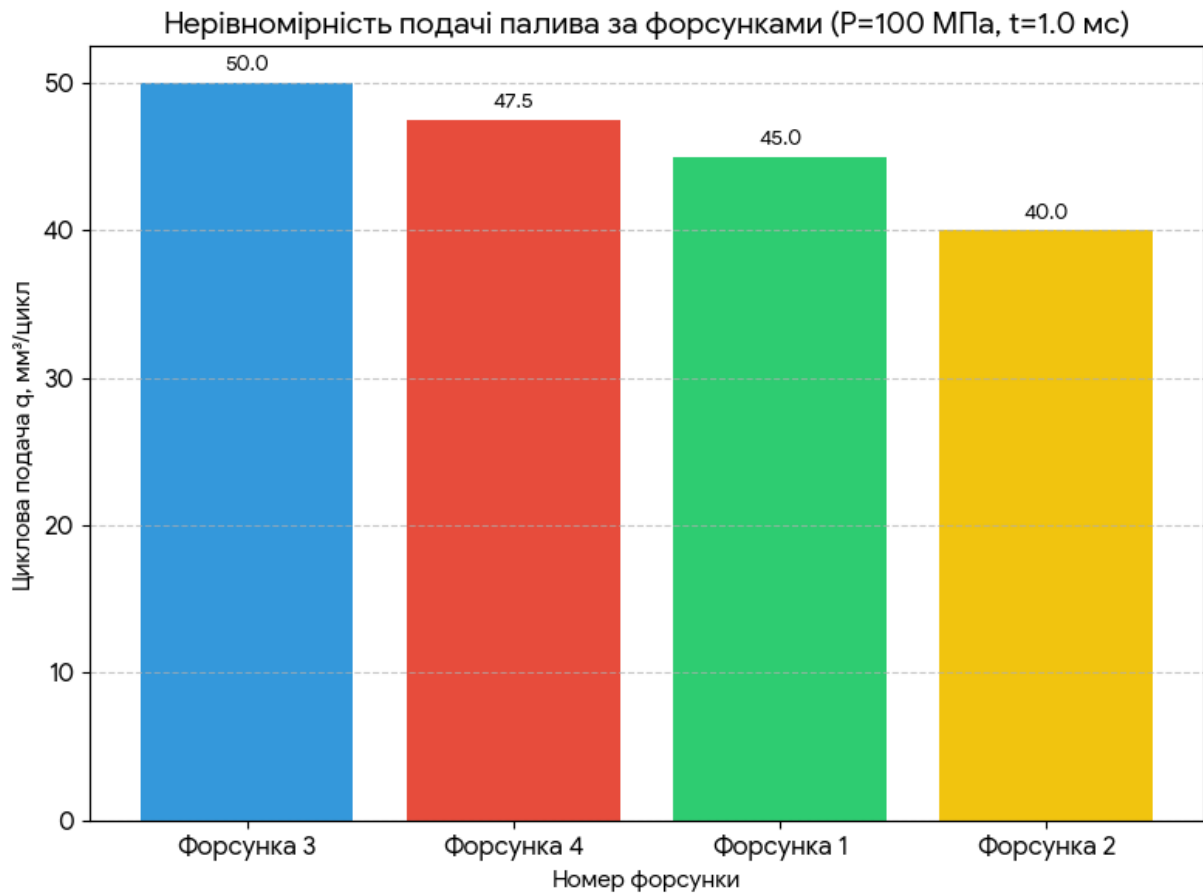


Рисунок 3.3 – Порівняльна гістограма подачі палива за форсунками ($P = 100$ МПа, $t = 1,0$ мс).

Значення нерівномірності у 21,92% значно перевищує допустиму межу в 5%, встановлену заводом-виробником. Така розбіжність призведе до нерівномірної роботи двигуна, підвищеної вібрації та локального перегріву окремих циліндрів. Для усунення цього дефекту необхідно провести механічне регулювання ходу анкера або застосувати кодування форсунок в ЕБК двигуна для вирівнювання характеристик.

В умовах реальної експлуатації такий дисбаланс призведе до:

1. Нерівномірного крутного моменту двигун буде працювати з підвищеною вібрацією.
2. Підвищеної димності циліндр із завищеною подачею працюватиме на збагаченій суміші.

3. Зниження ресурсу КШМ через неоднакове теплове та механічне навантаження на поршні.

Дані результати підтверджують необхідність проведення стендової діагностики, як обов'язкового етапу технічного обслуговування систем Common Rail.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Експериментальні дослідження на стенді Common Rail супроводжуються низкою ризиків, зумовлених конструкцією установки та фізико-хімічними властивостями робочих тіл. Основними небезпечними факторами є[23]:

- Високий тиск палива: основний ризик пов'язаний з можливістю розгерметизації магістралей високого тиску. Струмін палива під тиском 150 МПа може спричинити смертельні травми або важке гідравлічне ураження тканин.
- Електрична напруга: установка живиться від мережі змінного струму 230В, 50Гц.
- Рухомі частини: відкрита передача від електродвигуна до паливного насоса (зубчастий пас, шківи) створює загрозу травмування кінцівок.
- Пожежна безпека: використання дизельного палива або калібрулу, які є легкозаймистими рідинами.
- Токсичність: пари палива та дрібнодисперсний туман, що утворюється при розпиленні, можуть подразнювати дихальні шляхи.

4.2 Заходи безпеки при роботі з гідравлічною системою високого тиску

Для запобігання травматизму при роботі з паливною рампою та форсунками встановлено наступні вимоги:

- Перед кожним запуском необхідно візуально перевіряти стан металевих паливопроводів високого тиску та надійність їх затягування.
- Категорично заборонено торкатися елементів системи Common Rail під час роботи або знімати захисні екрани з плексигласу.
- У разі виявлення ознак витоку палива («туман», краплі) роботу слід негайно припинити, вимкнувши живлення головним вимикачем.

- Заміну форсунок або демонтаж трубок дозволяється проводити лише після повної зупинки двигуна та переконання, що залишковий тиск у рампі впав до нуля.

4.3 Електробезпека та експлуатація стенда

Електрична система стенда обладнана захисними пристроями для унеможливлення ураження оператора:

- Живлення здійснюється через розетку із заземленням, захищену автоматичним вимикачем не більше 20 А.
- У силовій шафі встановлено пристрій захисного вимкнення (ПЗВ), працездатність якого необхідно перевіряти щомісяця шляхом натискання кнопки «Test».
- Будь-які маніпуляції з електричними роз'ємами датчиків або блоку ECU дозволяються лише при вимкненій вилці з розетки.
- Для живлення датчиків та допоміжного обладнання (наприклад, стробоскопа) використовуються безпечні виходи 12В, 2А.

4.4 Вимоги до пожежної безпеки та виробничої санітарії

Робоче місце має бути організоване з урахуванням специфіки роботи з пально-мастильними матеріалами:

- У приміщенні лабораторії суворо заборонено використання відкритого вогню та проведення зварювальних робіт.
- Стенд повинен бути укомплектований порошковим вогнегасником, придатним для гасіння електроустановок та рідкого палива.
- Для мінімізації впливу парів палива лабораторія повинна бути обладнана примусовою витяжною вентиляцією.
- Для чищення панелей стенда забороняється використовувати агресивні хімічні засоби, що можуть пошкодити захисні екрани та ізоляцію.

4.5 Порядок допуску до роботи

До роботи на експериментальній установці допускаються особи, які:

1. Пройшли вступний та первинний інструктажі з охорони праці.

2. Детально вивчили інструкцію з експлуатації стенда та модуля керування «Zespół sterowania silnikiem ZS typu Common Rail».
3. Ознайомилися зі схемою екстреної зупинки обладнання.

4.6 Моделювання травмонебезпечних ситуацій та заходи щодо їх ліквідації

Робота з паливною системою Common Rail передбачає поєднання високого гідравлічного тиску, електричної енергії та механічних приводів. У таблиці нижче наведено аналіз найбільш імовірних небезпечних сценаріїв.

Таблиця 4.1 – Аналіз найбільш імовірних небезпечних сценаріїв

Ситуація / Ризик	Опис небезпеки	Спосіб усунення та запобігання
Розгерметизація з'єднання (150 МПа)	Раптовий витік палива під надвисоким тиском. Струмінь здатний пробити шкіру та м'язи, спричиняючи "гідравлічну ін'єкцію" палива в кров.	Використання захисного екрана з плексигласу ²²²² . Категорична заборона перевірки витоків "на дотик". Негайне вимкнення привода кнопкою аварійної зупинки.
Захоплення одягу або волосся приводом	Зубчастий пас і шківи працюють на швидкості до 5000 об/хв. Можливе затягування елементів одягу або травмування пальців.	Постійний контроль за цілісністю захисної кришки привода (3). Робота в застібнутому спецодязі без вільних країв.
Електричний пробій на корпус	Пошкодження ізоляції або потрапляння палива на контакти модуля може	Обов'язкова перевірка заземлення. Регулярний тест пристрою захисного

	призвести до ураження струмом 230 В.	вимкнення (ПЗВ) у силовій шафі.
Займання паливного туману	У разі несправності розпилювача утворюється дрібнодисперсна суміш палива з повітрям, яка є вибухонебезпечною.	Забезпечення інтенсивної вентиляції приміщення. Видалення будь-яких джерел іскроутворення або відкритого вогню біля стенда.
Термічний опік котушки клапана	Тривала робота регулятора тиску без циркуляції палива призводить до критичного перегріву соленоїда.	Дотримання операційної дисципліни: не залишати ввімкненими клапани після зупинки насоса. Використання паливного радіатора (охолоджувача).

4.7 Перша допомога при специфічних травмах

Особливу увагу слід приділити травмам від високого тиску. Зовні така травма може виглядати як невеликий прокол, проте всередині тканини руйнуються токсичними компонентами палива.

Алгоритм дій при гідравлічному ударі:

1. Негайно зупинити стенд та знеструмити його.
2. Зафіксувати уражену ділянку (зазвичай це рука або палець).
3. Термінова госпіталізація: Потерпілого необхідно доставити до хірургічного відділення протягом першої години. Обов'язково повідомити лікарів, що травма отримана від струменя палива під тиском 150 МПа.

4.8 Регламент технічного обслуговування для безпеки

Для підтримання безпечного стану стенда необхідно дотримуватися графіку перевірок:

- Щоденно: перевірка рівня палива в баку (11) та відсутність калюж під установкою.

- Перед кожним дослідженням: перевірка фіксації форсунок (15) у тримачах та затяжки гайок паливопроводів.
- Щомісяця: контрольне спрацювання кнопки "Тест" на ПЗВ та візуальна дефектовка зубчастого паса (214).

Будь-яка зміна конструкції стенда або використання нештатних паливопроводів знімає відповідальність із виробника та створює пряму загрозу життю оператора.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

5.1 Методологія розрахунку основних економічних показників

Для визначення повної собівартості та ефективності використання стенда застосовуються наступні математичні залежності.

5.1.1 Розрахунок витрат на електроенергію

Витрати на електричну енергію ($B_{\text{ел}}$) для проведення одного повного циклу випробувань (30 хв) розраховуються за формулою:

$$B_{\text{ел}} = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{в}} \cdot t_{\text{exp}} \cdot T_{\text{ел}}, \quad (5.1)$$

де:

$P_{\text{ном}}$ — номінальна потужність електродвигуна привода насоса (2,2кВт згідно з технічними характеристиками стенда);

$K_{\text{в}}$ — коефіцієнт використання потужності (приймається 0,7);

t_{exp} — тривалість одного випробування в годинах (0,5 год);

$T_{\text{ел}}$ — тариф на електроенергію для промислових підприємств, грн/кВт·год.

5.1.2 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Амортизація (А) нараховується прямолінійним методом і визначає частку вартості обладнання, що переноситься на одну послугу:

$$A = \frac{K \cdot (1 - Л)}{T_{\text{сл}} \cdot N_{\text{рік}}}, \quad (5.2)$$

де:

K — початкова вартість діагностичного комплексу;

$Л$ — ліквідаційна вартість (зазвичай $0,05 \div 0,1$ від K);

$T_{\text{сл}}$ — нормативний термін служби обладнання (років);

$N_{\text{рік}}$ — прогнозована кількість діагностованих форсунок за рік.

5.1.3 Визначення річного економічного ефекту

Річний економічний ефект ($E_{\text{рік}}$) від впровадження стенда визначається як різниця між ринковою вартістю послуг та їхньою собівартістю:

$$E_{\text{рік}} = (C_{\text{рин}} - C_{\text{соб}}) \cdot N_{\text{рік}}, \quad (5.3)$$

де:

$C_{\text{рин}}$ — середня ринкова ціна діагностики однієї форсунки;

$C_{\text{соб}}$ — розрахована повна собівартість послуги на власному обладнанні.

5.1.4 Розрахунок терміну окупності

Термін окупності капітальних вкладень ($T_{\text{ок}}$) показує період, за який чистий прибуток покриє витрати на придбання стенда:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{P_{\text{чист}} + A_{\text{рік}}}, \quad (5.4)$$

де:

$P_{\text{чист}}$ — річний чистий прибуток після оподаткування;

$A_{\text{рік}}$ — річна сума амортизаційних відрахувань.

5.1.5 Оцінка ризику збитків від аварії двигуна

Для обґрунтування доцільності діагностики вводиться показник потенційного запобігання збиткам ($Z_{\text{зап}}$):

$$Z_{\text{зап}} = P_{\text{ав}} \cdot C_{\text{рем}}, \quad (5.5)$$

де:

$P_{\text{ав}}$ — ймовірність виходу двигуна з ладу через несправність форсунки (згідно зі статистикою становить $\$0,15 \div 0,25\$$ для систем з пробігом понад 200 тис. км);

$C_{\text{рем}}$ — середня вартість капітального ремонту двигуна (включаючи запчастини та роботу).

5.2 Аналіз капітальних витрат на облаштування діагностичного поста

Для проведення досліджень характеристик форсунок Common Rail було використано стенд виробництва фірми Mechatronika. Впровадження такого обладнання на базі СТО або навчальної лабораторії потребує капітальних інвестицій, які включають вартість самого стенда, підготовку приміщення та закупівлю витратних матеріалів.

Табл.5.1 відображає початкові інвестиції в організацію діагностичного поста на базі обладнання Mechatronika.

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати на придбання та запуск обладнання (К)

Найменування витрат	Сума, грн	Примітка
Стенд «Zespół sterowania silnikiem ZS»	480 000	Основна установка з ПНВТ та ECU
Доставка та пусконаладження	24 000	5% від вартості обладнання
Набір спеціалізованого інструменту	12 000	Знімачі, ключі для паливопроводів
Калібровочна рідина (стартовий об'єм)	8 500	Спеціальна рідина «Каліброл»
Усього капітальних інвестицій (К):	524 500	—

5.3 Розрахунок собівартості діагностики однієї форсунки

Собівартість перевірки однієї форсунки (C_{diag}) складається зі змінних та постійних витрат. Для розрахунку приймемо наступні умови:

- Річний обсяг перевірок: 1200 форсунок (приблизно 25 комплектів на місяць).
- Термін амортизації обладнання: 10 років.

Для розрахунку використано формули енерговитрат та амортизації, виходячи з потужності двигуна стенда 2,2 кВт.

Таблиця 5.2 – Собівартість перевірки однієї форсунки (C_{diag})

Стаття витрат	Формула розрахунку	Значення, грн
Електроенергія ($B_{ел}$)	$P \cdot t \cdot T_{ел} = 2,2 \text{ кВт} \cdot 0,5 \text{ год} \cdot 9,5 \text{ грн}$	10,45
Амортизація (А)	$A = \frac{K}{T_{сл} \cdot N_{рік}} = \frac{524500}{10 \cdot 1200}$	43,71
Оплата праці (ЗП)	Відрядна оплата (за 30 хв роботи майстра)	120,00
Витратні матеріали	Фільтри, очищувачі, рідина на заміну	15,00
Загальногосподарські	Оренда, освітлення, охорона приміщення	50,00
ПОВНА СОБІВАРТІСТЬ:	Сума:	239,16

5.4 Порівняльний аналіз із ринковими цінами

На сьогодні середня ринкова ціна діагностики однієї форсунки Common Rail на спеціалізованих сервісах України становить від 350 до 550 грн.

Порівняння власної собівартості з ринковими пропозиціями дозволяє оцінити швидкість повернення інвестицій (табл.5.3).

Таблиця 5.3 – Показники економічної ефективності проекту

Показник	Значення
Середня ринкова ціна діагностики, грн	450,00
Собівартість на стенді Mechatronika, грн	239,16
Прибуток (економія) на одній форсунці, грн	210,84
Річний прибуток (при 1200 форсунках/рік), грн	253 008
Термін окупності ($T_{ок}$), років	2,1

5.5 Оцінка економічних ризиків відмови паливної системи

Найважливішим аспектом економічної доцільності діагностики є запобігання капітальному ремонту двигуна. Несправна форсунка (яка «лліє» або має порушений розпил) призводить до критичних пошкоджень.

Потенційні збитки при ігноруванні діагностики:

1. Прогар поршня: через порушення факела розпилу виникає локальний перегрів, що руйнує поршень протягом кількох годин роботи під навантаженням.
2. Гідроудар: заклинювання форсунки у відкритому положенні призводить до наповнення циліндра паливом під час стоянки, що при запуску веде до згинання шатуна.
3. Розрідження оливи: потрапляння палива в картер знижує змащувальні властивості оливи, що спричиняє задирки вкладишів колінчастого вала.

Таблиця 5.4 – Економічне порівняння ризиків відмови паливної системи

Показник порівняння	Діагностика комплекту (4 шт.)	Ремонт двигуна (після прогару)
Прямі витрати (робота + запчастини)	1 800 грн	85 000 — 120 000 грн
Тривалість простою техніки	1 робочий день	10 — 25 робочих днів
Ризики (наслідки)	Плановий контроль	Заміна поршневої, шліфування вала
Економічна доцільність	Витрати 1,5% від ціни ремонту	Втрата 100 вартості агрегату

5.6 Висновки по розділу

1. Розрахункова собівартість діагностики однієї форсунки на стенді Mechatronika становить 239,16 грн, що майже вдвічі нижче за ринкову ціну послуги.

2. При повному завантаженні обладнання термін окупності проекту становить близько 2 років, що є високим показником для технічних інвестицій.
3. Економічний ризик ігнорування діагностики (від 110 000 грн за ремонт двигуна) у 60 разів перевищує вартість планової перевірки комплекту форсунок.
4. Використання розробленої методики дозволяє не лише економити на прямих витратах, а й значно подовжувати ресурс дороговартісних компонентів силового агрегату.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено комплексне дослідження характеристик електрогідравлічних паливних форсунок системи Common Rail, за результатами якого можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз конструкції та робочих процесів підтвердив, що система Common Rail є ключовим рішенням для забезпечення сучасних екологічних стандартів дизельних двигунів. Встановлено, що точність дозування палива безпосередньо залежить від технічного стану прецизійних вузлів форсунки (керуючий клапан, мультиплікатор, голка розпилювача), які працюють в умовах надвисоких тисків до 150 - 200 МПа.

2. Вивчення експериментальної бази показало, що стенд «Zespół sterowania silnikiem ZS» виробництва фірми *Mechatronika* дозволяє з високою точністю імітувати реальні режими роботи двигуна. Модуль керування MOD/CR-522W забезпечує можливість гнучкого регулювання тиску, частоти та тривалості впорскування, що є критично важливим для отримання повних витратних характеристик.

3. Експериментальні дослідження виявили нелінійний характер залежності циклової подачі від часу впорскування в зоні малих тривалостей імпульсів ($0,2 \div 0,5$ мс). Встановлено, що при низькому тиску (30 МПа) форсунки мають значний «поріг відкриття», що необхідно враховувати при налаштуванні режимів холостого ходу двигуна. При максимальному дослідженому тиску (130 МПа) продуктивність системи зростає в кілька разів, досягаючи $85 \div 90$ мм³/цикл.

4. Аналіз технічного стану досліджуваного комплекту форсунок виявив критичну нерівномірність подачі на рівні 21,92%, що значно перевищує технологічний допуск у 5%. На основі побудованих гістограм ідентифіковано відхилення у Форсунках №2 та №3, що свідчить про їхній знос або неправильне регулювання і потребує негайного втручання.

5. Вимоги охорони праці при роботі зі стендом мають першочергове значення через ризики гідравлічних травм від струменя палива під тиском до 150 МПа та високу напругу в колах керування. Суворе дотримання регламенту

перевірок та використання захисних екранів є обов'язковою умовою експлуатації установки.

6. Економічне обґрунтування проекту підтвердило високу ефективність впровадження діагностичного обладнання. Собівартість перевірки однієї форсунки на стенді становить 239,16 грн, що майже вдвічі нижче за середньоринкові ціни. Термін окупності капітальних інвестицій у розмірі 524500 грн складає приблизно 2,1 року. При цьому превентивна діагностика дозволяє уникнути збитків від капітального ремонту двигуна, вартість якого в 60 разів перевищує вартість сервісної перевірки паливної апаратури.

Таким чином, мета роботи досягнута, а результати досліджень мають практичне значення для підвищення ресурсу та надійності сучасних дизельних двигунів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Diesel Engine Management: Systems and Components / [Konrad Reif (Ed.)]. — 5th ed. — Springer Vieweg, 2014. — 360 p.
2. Bosch. Diesel-Engine Management. — 4th ed. — Robert Bosch GmbH, Wiley, 2006. — 502 p..
3. Badion V. V. Institutional Repository of Polissia National University. — 2024. — URL:
http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/15952/1/Badion_DR_KR_2024.pdf.
4. Форсунки і ПНВТ системи Common rail: діагностика і ремонт [Електронний ресурс]. — MotoFocus.eu, 2025. — URL: <https://ua.motofocus.eu/news/55906..>
5. Кисликов В. Ф., Лущик В. В. Будова й експлуатація автомобілів: Підручник. — К.: Либідь, 2006. — 400 с.
6. Абрамчук Ф. І., Каніщев В. Г., Гутаревич Ю. Ф. Автомобільні двигуни: Підручник. — К.: Арістей, 2006. — 476 с.
7. Demystifying the Common Rail Injector: A Deep Dive — G2 DIESEL ..., доступ отримано 20 вересня, 2025, <https://www.g2dieselproducts.com/blog-resources/what-is-a-common-rail-injector>
8. Люлька В.С., Коньок М.М., Перинський Ю.Є., Клімов О.М. Основи діагностики автомобіля: Навчально-методичний посібник. Чернігів: ЧНПУ імені Т.Г. Шевченка, 2013. 188 с.
9. Denton T. Advanced Automotive Fault Diagnosis. 5th ed. New York: Routledge, 2021. 412 pp.
10. Halderman J.D. Automotive technology. Boston: Prentice Hall, 2011. Electronic Book.
11. Kiencke U., Nielsen L. Automotive Control Systems. 2nd ed. Springer-Verlag, 2005. 512 pp.
12. Experimental study of multiple pilot injection strategy in an automotive direct injection diesel engine - MATEC Web of Conferences, доступ отримано 24 березня, 2025, <https://www.matec->

- conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/93/mateconf_bultrans2018_03007.pdf
13. Robert Bosch GmbH. Bosch Automotive Electrics. 5th ed. Plochingen: Springer Vieweg, 2007. 530 pp.
 14. Tschöke H., Mollenhauer K. Handbook of Diesel Engines. Springer, 2010. 636 pp.
 15. Delphi. COMMON RAIL MANUAL. PRINCIPLES OF OPERATION. Delphi France SAS, 2007. 83 pp.
 16. Zespół sterowania silnikiem ZS typu Common Rail: Opis techniczny Nr kat: 1 522. — Poznań: Mechatronika Wyposażenie Dydaktyczne Sp. z o.o., 2023. — 34 s.
 17. Мазепа С.С., Куцик А.С. Електрообладнання автомобіля. Львів: Видавництво НУЛП, 2004. 168 с.
 18. McCord K. Automotive Diagnostic Systems: Understanding OBD I and OBD II. CarTech Inc, 2011. 144 pp.
 19. COMMON RAIL INJECTOR - ELECTROMAGNETIC (CRIE) - Autoditex, доступ отримано 7 квітня, 2025, <https://autoditex.com/page/common-rail-injector---electromagnetic-crie-25-1.html>
 20. Diesel Fuel-Injection System Common Rail: Bosch Technical Instruction. Robert Bosch GmbH, 2005. 94 pp.
 21. Best practice advice for servicing Common Rail injectors / Delphi Technologies, доступ отримано 7 вересня, 2025: <https://www.delphiautoparts.com/resource-center/article/best-practice-advice-for-servicing-common-rail-injectors>.
 22. Common Rail Injectors: Why They Fail Early & How to Extend Their Life - Sydney Diesel Centre, доступ отримано 10 червня, 2025, <https://www.sydneydieselcentre.com.au/common-rail-injectors-why-they-fail-early-how-to-make-them-last-longer/>
 23. Городецький І.М., Пістун І.П., Березовецький А.П. Охорона праці на автомобільному транспорті: навчальний посібник. [Текст] / Львів: Тріада плюс, 2009. 320 с.

