

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 ефективності роботи паливних форсунок
дизельного двигуна залежно від їх технічного стану»**

Виконав: студент VI курсу групи Ат-63

Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Степан Воньо

(ім'я та прізвище)

Керівник: Юрій Габрієль

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 621.436.038

Воньо Степан Іванович . «Дослідження ефективності роботи паливних форсунок дизельного двигуна залежно від їх технічного стану»

//Кваліфікаційна робота. – Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025. – 65 с.

У роботі проведено аналіз причин відмов сучасних систем впорскування. Встановлено, що домінуючими дефектами є абразивний знос клапана-мультиплікатора та ерозійний знос розпилювача.

За результатами експериментальних досліджень на діагностичному стенді з використанням тест-планів для форсунок Bosch 0 445 110 190 виявлено, що знос мультиплікатора призводить до критичного зростання зворотного зливу (до 88,4 мм³/цикл), що унеможлиблює запуск двигуна. Знос розпилювача викликає збільшення циклової подачі на 9–15%, що призводить до димності та теплових перевантажень двигуна.

Виконано техніко-економічне обґрунтування, яке показало, що регламентний ремонт форсунок дозволяє заощадити 66% коштів порівняно з придбанням нових вузлів, а термін окупності витрат становить близько 20 тис. км пробігу. Розроблено заходи з охорони праці при роботі з системами високого тиску.

Рис. 8, табл. 9, бібліогр. джерел 24.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ ВПОРСКУВАННЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ	9
1.1 Роль форсунки в термодинамічному циклі двигуна	9
1.1.1 Фізичні умови функціонування	10
1.1.2 Гідромеханічна архітектура та принцип сервокерованої дії	10
1.1.3 Баланс сил та рівняння рівноваги рухомої системи	11
1.1.4 Роль дросельних жиклерів (Z та A) в динаміці керування	11
1.1.5 Мультиплікація переміщення та гідравлічні втрати	13
1.2 Електромагнітні (соленоїдні) форсунки	13
1.2.1 Анатомія електромагнітного вузла	13
1.2.2 Проблема зносу сидла мультиплікатора (Valve Seat Recession)	14
1.2.3 Електричне керування соленоїдом	15
1.3 П'єзоелектричні форсунки	16
1.3.1 Конструкція п'єзопакета (Piezo Stack)	17
1.3.2 Гідравлічний компенсатор	18
1.3.3 Прямий привід голки (Direct Acting Piezo)	18
1.4 Конструкція розпилювача	20
1.4.1 Типологія: SAC проти VCO	21
1.4.2 Гідродинаміка та Кавітація в соплових отворах	21
1.5 Стратегії керування та багатоступеневе впорскування	22
1.5.1 Корекція індивідуальних характеристик (IMA/IQA/QR кодування)	23
1.6 Висновки по розділу	23
2 АНАЛІЗ ВІДМОВ ТА ДЕГРАДАЦІЇ ІНЖЕКТОРІВ СИСТЕМИ COMMON RAIL	24
2.1 Гідродинаміка руйнування. Знос мультиплікатора та зворотний злив	24
2.1.1 Механізм абразивної та кавітаційної ерозії сидла клапана	24
2.1.2 Роль води та мікробіологічного забруднення	25
2.1.3 Гідравлічні наслідки. Втрата тиску в рейці	25
2.2 Деградація розпилювача	26
2.2.1 Знос пари "голка-сідло" та втрата герметичності	26
2.2.2 Кавітація в соплових отворах	27

	5
2.2.3 Закоксування. Зовнішнє та внутрішнє.....	27
2.3 Хімічна патологія: внутрішні відкладення інжектора (IDID).....	28
2.3.1 Типи IDID та механізми їх утворення	28
2.3.2 Симптоматика IDID.....	29
2.4 Електромеханічна деградація.....	29
2.4.1 Електромагнітні (соленоїдні) інжектори.....	29
2.4.2 П'єзоелектричні інжектори: Фізика деградації кристалів	30
2.5 Вплив несправностей на робочий процес та надійність двигуна	31
2.5.1 Димність як діагностичний маркер.....	32
2.5.2 Детонація та акустичний дискомфорт.....	32
2.5.3 Втрата потужності та дисбаланс	33
2.5.4 Прогар поршнів та розрідження оливи	33
2.6 Висновки по розділу.....	34
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	35
3.1 Програма та методика експериментальних досліджень.....	35
3.1.1 Загальна програма досліджень	35
3.1.2 Об'єкт дослідження та підготовка зразків	35
3.1.3 Методика проведення стендових випробувань	36
3.1.4 Обробка результатів	39
3.2 Характеристика експериментального обладнання та схеми вимірювань	40
3.2.1 Лабораторна установка на базі приладу CR-Tester.....	40
3.2.2 Методика діагностики зворотного зливу на двигуні (On-Board Test)	42
3.3 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз	43
3.3.1 Результати стендових випробувань (CR-Tester).....	43
3.3.2 Результати експрес-діагностики на двигуні (гідравлічний тест).. ..	47
3.3.3 Узагальнення результатів дослідження.....	48
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	49
4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів.....	49
4.2 Техніка безпеки при роботі з паливними системами високого тиску	49
4.3 Електробезпека при експлуатації діагностичного обладнання	50
4.4 Виробнича санітарія та гігієна праці	50

	6
4.5 Пожежна безпека	51
4.6 Моделювання потенційних травмонебезпечних ситуацій та алгоритми дій	52
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ	56
5.1 Постановка задачі та вихідні дані	56
5.2 Розрахунок економічних втрат від експлуатації несправних форсунок	56
5.3 Порівняння вартості відновлення та купівлі нових вузлів.....	57
5.4 Розрахунок терміну окупності витрат на ремонт.....	58
5.5 Оцінка "ціни ризику"	59
5.6 Висновки по розділу	60
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	63

ВСТУП

Сучасний етап розвитку автомобілебудування характеризується жорсткими вимогами до екологічних показників та паливної економічності двигунів внутрішнього згоряння. Дизельні двигуни, завдяки своєму високому коефіцієнту корисної дії (ККД) та надійності, залишаються основним джерелом енергії для комерційного транспорту, сільськогосподарської техніки та значної частини легкового автопарку.

Впровадження екологічних стандартів Євро-5 та Євро-6 зумовило перехід до акумуляторних паливних систем типу Common Rail, які працюють під надвисоким тиском (до 2500 бар і вище) та забезпечують багатоступеневе впорскування палива за один робочий цикл. Ключовим елементом, що відповідає за точність дозування та якість розпилювання палива в таких системах, є електрогідравлічна (або п'єзоелектрична) форсунка[1].

У процесі експлуатації форсунки піддаються впливу високих температур, гідродинамічних навантажень та хімічно агресивного середовища. Навіть незначне відхилення технічних параметрів форсунок від номінальних значень (знос запірного конуса, зміна гідроцільності мультиплікатора, закоксовування розпилювача) призводить до порушення процесу сумішоутворення. Це, в свою чергу, спричиняє падіння потужності, зростання витрати палива, підвищення токсичності відпрацьованих газів та може призвести до аварійного виходу двигуна з ладу (прогорання поршнів, гідроудари).

Таким чином, дослідження впливу технічного стану форсунок на ефективність роботи двигуна, а також удосконалення методів їх діагностики, є актуальним науково-технічним завданням, що має важливе практичне значення для експлуатації автомобільного транспорту.

Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації дизельних двигунів шляхом встановлення закономірностей впливу технічного стану паливних форсунок на вихідні показники роботи двигуна та обґрунтування методів діагностики їх несправностей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд конструктивних особливостей сучасних паливних систем Common Rail та типових несправностей форсунок.
2. Дослідити фізику процесу зношування прецизійних пар форсунки та його вплив на гідравлічні характеристики впорскування (циклову подачу, зворотний злив, форму факела).
3. Розробити методику експериментального дослідження форсунок з різним ступенем зносу на діагностичному стенді.
4. Провести порівняльний аналіз роботи справних та дефектних форсунок, визначити кількісний вплив несправностей на рівномірність роботи двигуна.
5. Запропонувати практичні рекомендації щодо діагностики та визначення залишкового ресурсу форсунок.

Об'єкт дослідження — робочий процес паливної апаратури дизельного двигуна системи Common Rail.

Предмет дослідження — зміна характеристик впорскування палива (об'єм, фаза, тиск) залежно від технічного стану конструктивних елементів форсунки.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що поєднує:

- *Теоретичні методи* — аналіз науково-технічної літератури, аналіз гідродинамічних процесів у паливній апаратурі.
- *Експериментальні методи* — стендові випробування форсунок для визначення об'ємної продуктивності на різних режимах роботи (Full Load, Idle, Emission, Pre-injection), комп'ютерна діагностика електронних систем керування двигуном.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ ВПОРСКУВАННЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Еволюція дизельного двигуна внутрішнього згоряння протягом останнього століття була нерозривно пов'язана з боротьбою за контроль над процесом сумішоутворення. Від перших громіздких компресорних систем Рудольфа Дизеля до сучасних високообертових агрегатів, ключовим завданням інженерів залишалося розпилення рідкого палива на мікроскопічні краплі та їх рівномірний розподіл у камері згоряння за надзвичайно короткий проміжок часу. Впровадження системи Common Rail (CR) стало не просто черговим етапом цієї еволюції, а фундаментальною зміною парадигми, що дозволила відокремити процес створення тиску від процесу впорскування. У центрі цієї технологічної революції знаходиться електрогідравлічна форсунка — пристрій, який поєднує в собі прецизійну механіку, високошвидкісну гідравліку та передову електроніку[1-4].

1.1 Роль форсунки в термодинамічному циклі двигуна

Форсунка в системі Common Rail є критичним інтерфейсом між паливною системою високого тиску та камерою згоряння двигуна. Її функція виходить далеко за межі простого дозування палива. Вона виступає головним інструментом керування швидкістю тепловиділення (Rate of Heat Release - ROHR), що безпосередньо визначає термодинамічну ефективність циклу, акустичний комфорт та екологічні показники двигуна[1].

На відміну від традиційних систем з механічним приводом (рядні насоси, розподільні насоси VE), де тиск впорскування був жорстко прив'язаний до частоти обертання колінчастого вала і кулачкового механізму, форсунка CR має доступ до постійного резервуару високого тиску (акумулятора або рейки). Це дозволяє генерувати "квадратну" характеристику впорскування (швидке відкриття, стабільний тиск, швидке закриття) навіть на низьких обертах, що було недосяжно для систем попередніх поколінь[2]. Більше того, здатність форсунки виконувати множинні впорскування за один такт (Multi-stage Injection) дозволяє

гнучко моделювати процес горіння, розділяючи його на фази попередньої підготовки, головного виділення енергії та післяокислення продуктів згоряння.

1.1.1 Фізичні умови функціонування

Щоб зрозуміти складність конструкції форсунки, необхідно усвідомити екстремальні умови, в яких вона працює. Сучасні системи Common Rail оперують тисками до 2500–2700 бар (250–270 МПа), а перспективні розробки наближаються до позначки 3000 бар[5]. При таких тисках дизельне паливо перестає поводитися як нестислива рідина; його стисливість стає суттєвим фактором, що впливає на швидкість поширення хвиль тиску та точність дозування.

Швидкість витоку палива з соплових отворів може перевищувати 500-600 м/с, що призводить до інтенсивної турбулізації та кавітації. Часові інтервали керування вимірюються мікросекундами (мкс). Наприклад, типовий час відгуку п'єзоелектричної форсунки становить менше 150 мкс[6]. За час роботи двигуна на частоті 4000 об/хв форсунка повинна здійснити до 2000 повних циклів впорскування за хвилину, зберігаючи стабільність циклової подачі на рівні долей міліграма. Такі вимоги диктують необхідність використання унікальних матеріалів, надточних прецизійних пар з зазорами 1-2 мікрона та складних алгоритмів електронного керування.

1.1.2 Гідромеханічна архітектура та принцип сервокерованої дії

Фундаментальною проблемою, яку вирішує конструкція будь-якої форсунки Common Rail, є необхідність швидкого керування клапаном, що знаходиться під величезним тиском, використовуючи обмежену енергію електричного приводу. Пряме відкриття голки розпилювача, притиснутої тиском 2000 бар, вимагало б надзвичайно потужного і громіздкого соленоїда, що неможливо в умовах обмеженого простору головки блоку циліндрів. Рішенням стала концепція гідравлічного підсилення (сервоприводу), де енергія самого палива під високим тиском використовується для виконання роботи з відкриття та закриття[7].

1.1.3 Баланс сил та рівняння рівноваги рухомої системи

Конструктивно форсунка розділена на дві основні гідравлічні зони, з'єднані між собою дроселюючими каналами: зону розпилювача (де тиск діє на підйом голки) та камеру гідрокерування (де тиск діє на утримання голки)[8].

Розглянемо сили, що діють на рухому систему (голка + шток мультиплікатора) у закритому стані.

Зверху на керуючий поршень (Control Piston) діє сила $F_{control}$, зумовлена тиском у камері керування P_{cc} :

$$F_{control} = P_{cc} \times A_{piston} \quad (1.1)$$

де A_{piston} — площа поперечного перерізу керуючого поршня.

Знизу на голку розпилювача діє сила F_{nozzle} , що складається з тиску в кишені розпилювача P_{sac} , який діє на диференційну площу (різницю між діаметром голки та діаметром сідла):

$$F_{nozzle} = P_{rail} \times (A_{needle} - A_{seat}) \quad (1.2)$$

Додатково діє сила пружини форсунки F_{spring} , яка спрямована вниз (на закриття). Рівняння рівноваги для закритої форсунки виглядає так:

$$F_{closing} = (P_{cc} \times A_{piston}) + F_{spring} \quad (1.3)$$

$$F_{opening} = P_{rail} \times (A_{needle} - A_{seat}) \quad (1.4)$$

Ключовим аспектом є те, що у стані спокою тиск у всій системі вирівняний, тобто $P_{cc} = P_{rail}$. Конструктивно площа поршня A_{piston} виконується значно більшою (зазвичай на 50-60%), ніж ефективна площа підйому голки ($A_{needle} - A_{seat}$). Це створює значний надлишок сили закриття ("гідравлічний замок"), який надійно утримує голку притиснутою до сідла, запобігаючи протіканню палива в циліндр навіть за відсутності зусилля пружини[9]. Пружина ж виконує здебільшого запобіжну функцію при відсутності тиску в системі (наприклад, при зупиненому двигуні).¹¹

1.1.4 Роль дросельних жиклерів (Z та A) в динаміці керування

Керування станом форсунки здійснюється шляхом зміни тиску P_{cc} у камері керування. Для цього камера з'єднана з лінією високого тиску через вхідний жиклер (Z - Inlet Orifice) і з лінією зворотного зливу (звороткою) через вихідний

жиклер (А - Outlet Orifice). Останній перекривається клапаном-пілотом, яким керує соленоїд або п'єзоелемент[10].

Динаміка процесу впорскування базується на точному балансі пропускної здатності цих двох жиклерів:

1. **Фаза відкриття.** При активації приводу відкривається клапан вихідного жиклера (А). Паливо починає витікати з камери керування в лінію низького тиску. Оскільки пропускна здатність жиклера А конструктивно більша, ніж жиклера Z ($Flow_A > Flow_Z$), тиск у камері керування P_{cc} стрімко падає, незважаючи на постійне надходження палива через вхідний жиклер Z.¹⁴ Коли сила $F_{closing}$ стає меншою за $F_{opening}$, голка зривається з місця і рухається вгору, відкриваючи соплові отвори — починається впорскування.
2. **Фаза утримання.** Поки клапан А відкритий, встановлюється динамічна рівновага тиску в камері керування на рівні, достатньому для утримання голки у верхньому положенні.
3. **Фаза закриття.** При деактивації приводу клапан А закривається. Витік припиняється, але надходження палива через жиклер Z продовжується. Тиск у камері керування швидко відновлюється до рівня системного (P_{rail}). Гідравлічна сила закриття знову стає домінуючою, і голка швидко сідає на сідло, відсікаючи подачу палива.¹¹

Цей принцип "гідравлічного мосту" дозволяє керувати величезними гідравлічними силами за допомогою мінімальних зусиль на пілотному клапані. Однак він накладає суворі обмеження на точність виготовлення жиклерів. Відхилення діаметра жиклера Z на декілька мікрометрів може кардинально змінити швидкість закриття голки, а отже, і кількість впорскуваного палива.¹⁵ Ерозія вхідних кромek жиклерів внаслідок кавітації є одним з основних механізмів старіння форсунки, що призводить до дрейфу її характеристик ("drift of injection quantity")[11].

1.1.5 Мультиплікація переміщення та гідравлічні втрати

Крім керування силами, система "поршень-камера" виконує функцію перетворення переміщень. У деяких конструкціях (особливо п'єзоелектричних) використовується додатковий гідравлічний каскад для посилення мікроскопічного ходу актюатора. Співвідношення площ поршнів визначає коефіцієнт підсилення по переміщенню.

Важливо відзначити, що робота сервоклапана неминуче пов'язана з так званим "керуючим витоком" (control leakage) або статичним зворотним зливом. Під час впорскування частина палива постійно перетікає з рейки в зворотку через послідовно з'єднані жиклери Z та A, не потрапляючи в циліндр. Цей потік є необхідною платою за швидкодію системи, але він знижує загальний гідравлічний ККД паливної апаратури та призводить до нагрівання палива, що повертається в бак[12]. У сучасних системах інженери прагнуть мінімізувати цей паразитний потік, зменшуючи діаметри жиклерів та оптимізуючи час спрацьовування клапанів.

1.2 Електромагнітні (соленоїдні) форсунки

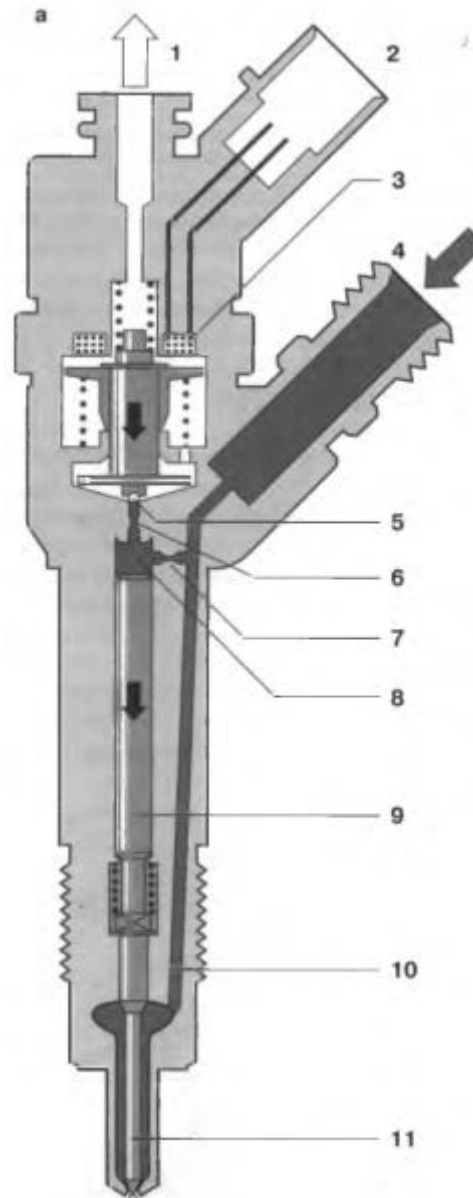
Електромагнітні форсунки (Solenoid Injectors) стали піонерами впровадження технології Common Rail у масове виробництво. Їхня відносна простота, технологічність та надійність забезпечили їм домінування на ринку протягом багатьох років, особливо в сегменті комерційного транспорту[13].

1.2.1 Анатомія електромагнітного вузла

Основним виконавчим елементом є електромагнітний соленоїд, який складається з котушки індуктивності, статора (магнітопровода) та рухомого якоря (armature). Якір механічно з'єднаний зі штоком клапана (або сам є частиною клапанного механізму), який перекриває зливний жиклер A.

Критичним параметром конструкції є маса рухомих частин (якоря та штока). Інерція якоря є головним фактором, що обмежує швидкодію форсунки. У ранніх поколіннях (наприклад, Bosch CRI1) якір був жорстко з'єднаний зі штоком клапана. У новіших поколіннях (CRI2.x) використовується конструкція з "вільним ходом" або розв'язаним якорем (decoupled armature), що дозволяє

якорю розігнатися перед ударом по штоку, забезпечуючи більш різке відкриття клапана та зменшуючи ефект "відскоку" (bounce) при закритті[12].



1 - зворотка, 2 – електричне з'єднання, 3 - клапан електромагнітний, 4 - вхід палива, 5 - кульковий клапан, 6 - жиклер гідрокамери, 7 – жиклер подачі, 8 - гідрокамера, 9 - керуючий плунжер, 10 - канал розпилювача, 11 - голка форсунки.

Рисунок 1.1 – Електромагнітна форсунка

1.2.2 Проблема зносу сидла мультиплікатора (Valve Seat Recession)

Одним з найбільш вразливих місць електромагнітної форсунки є зона контакту кульки клапана з сидлом. При кожному відкритті через мікроскопічну щілину проривається потік палива зі швидкістю сотні метрів на секунду. Цей

високошвидкісний потік викликає інтенсивну кавітаційну ерозію та абразивний знос сідла.

З часом герметичність порушується, і паливо починає просочуватися в зворотку навіть при закритому клапані. Це явище відоме як "підвищений зворотний злив" (high backleak). Клінічна картина несправності:

- Утруднений запуск двигуна (особливо гарячого), оскільки насос високого тиску не встигає компенсувати витоки і створити стартовий тиск у рампі.
- Падіння тиску в рампі під навантаженням, що призводить до переходу двигуна в аварійний режим.¹⁷

Для боротьби з цим явищем сідла клапанів виготовляють із надтвердих сплавів, а на поверхню кульки наносять покриття з карбіду вольфраму або DLC (Diamond-Like Carbon)[13].

1.2.3 Електричне керування соленоїдом

Електромагніт має значну індуктивність, що перешкоджає миттєвому наростанню струму при подачі напруги (за законом комутації). Для забезпечення швидкого спрацьовування ЕБУ використовує складну стратегію керування струмом, яка називається "Peak and Hold" (Пік і Утримання) [14] :

1. **Фаза попереднього намагнічування (Pre-magnetization).** Подача невеликого струму для вибірки зазорів.
2. **Фаза форсування (Boost Phase).** На соленоїд подається висока напруга (50-80 В), що генерується вбудованим в ЕБУ перетворювачем (DC-DC Boost Converter) і накопичується в конденсаторах. Це дозволяє струму круто зрости до пікового значення (наприклад, 20 А) за десятки мікросекунд, долаючи індуктивний опір і створюючи потужне магнітне поле для зриву клапана з сідла.
3. **Фаза втягування (Pull-in).** Якір рухається, клапан відкривається.
4. **Фаза утримання (Hold Phase).** Після відкриття клапана сила, необхідна для його утримання у відкритому стані, значно менша (через зменшення магнітного зазору). Струм знижується до 10-12 А шляхом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Це мінімізує нагрів обмотки та економить енергію[15].

5. Фаза вимкнення. Швидке зняття напруги та гасіння енергії самоіндукції для миттєвого закриття клапана під дією пружини.

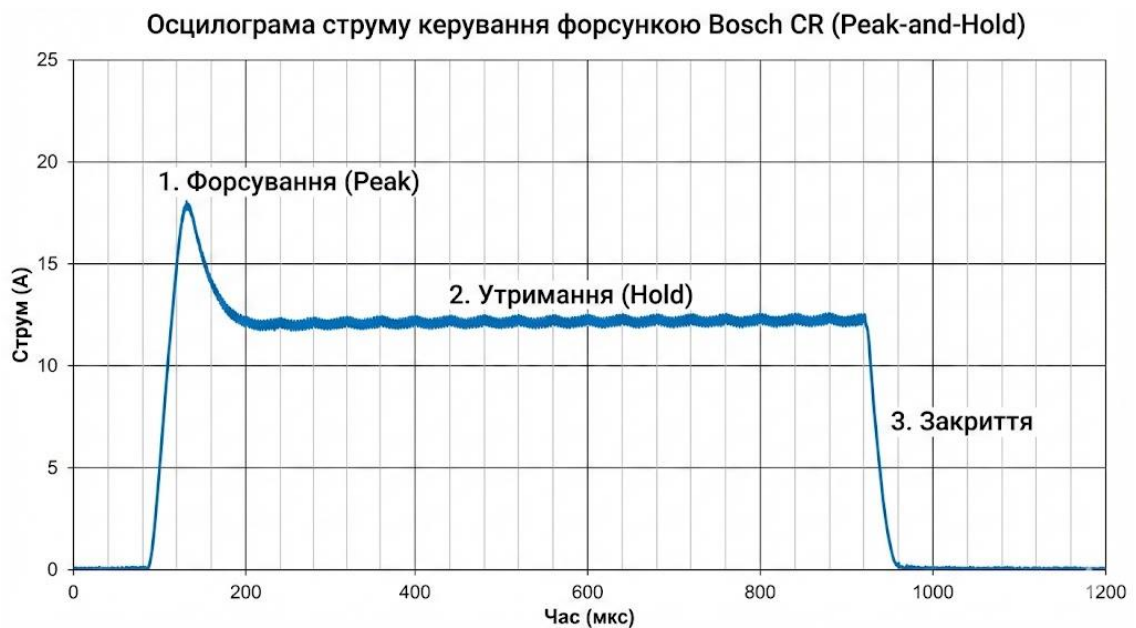
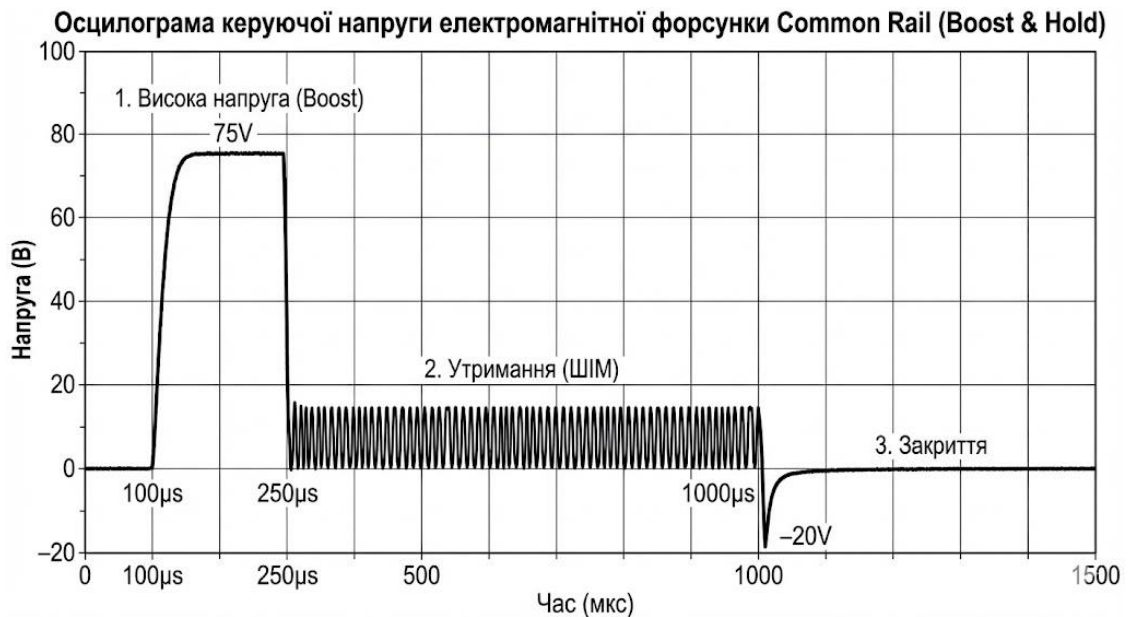
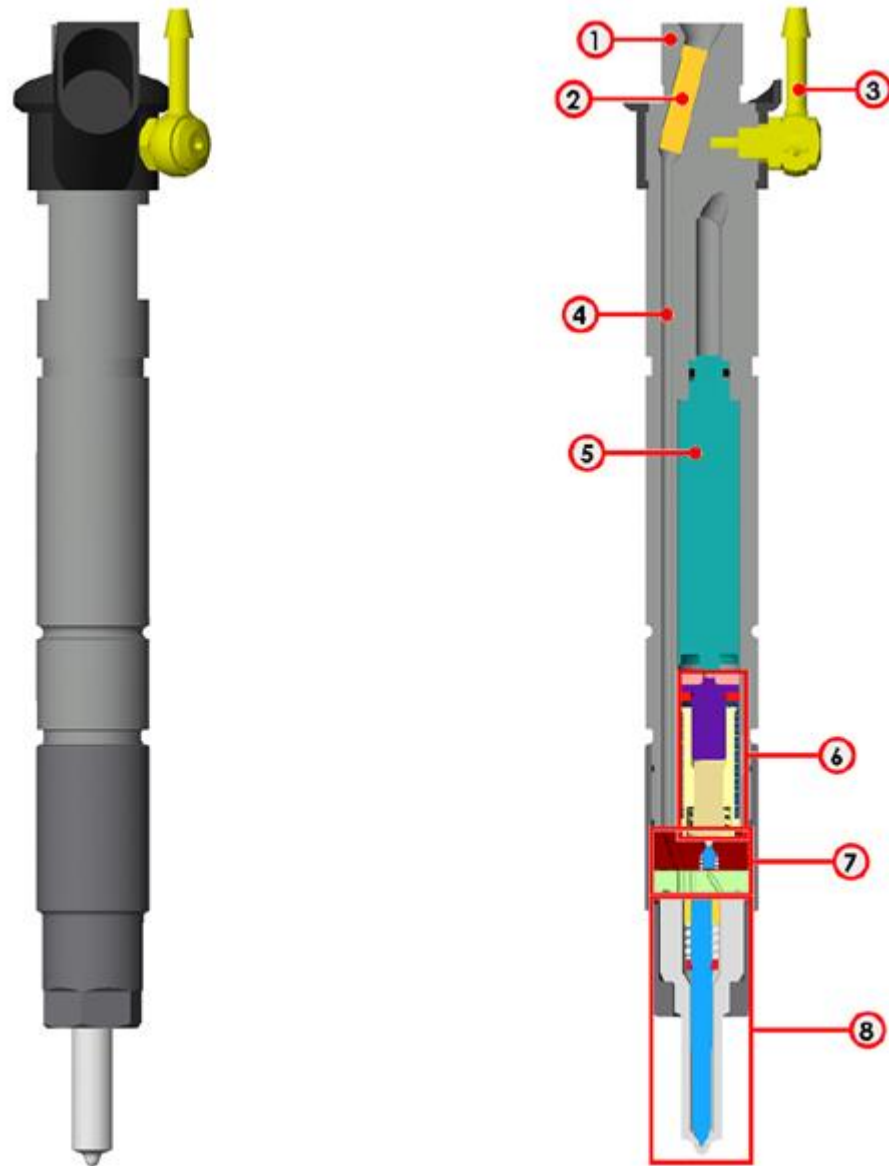


Рисунок 1.2 – Осцилограми керуючої напруги та струму електромагнітної форсунки

1.3 П'єзоелектричні форсунки

З посиленням екологічних норм Euro 5 та Euro 6 вимоги до точності багаторазового впорскування перевищили фізичні можливості соленоїдних систем. Відповіддю індустрії стала технологія Piezo Common Rail. П'єзоелектричний кристал має унікальну властивість змінювати свої геометричні розміри під дією електричного поля[9].



1 – вхід високого тиску; 2 – фільтр; 3 – зворотка; 4 – корпус; 5 – п'єзопакет; 6 – гідравлічний компенсатор; 7 – контрольний клапан; 8 – розпилювач.

Рисунок 1.3 – П'єзоелектрична форсунка

1.3.1 Конструкція п'єзопакета (Piezo Stack)

Виконавчим елементом є "п'єзостек" — стовпчик, що складається з сотень (зазвичай 300-400) шарів п'єзокераміки, перекладених металевими електродами. При подачі напруги кожен шар розширюється на мікроскопічну величину, але сумарне подовження стека досягає 30-40 мікрометрів. Хоча це переміщення мале, зусилля, що розвивається при цьому, є колосальним.

П'єзoeлемент поводитьcя в електричному колі як конденсатор великої ємності. Для його активації ЕБУ "заряджає" стек (енергія накопичується в електричному полі), а для деактивації — "розряджає" його. Це дозволяє

реалізувати часткову рекуперацію енергії: при розряді енергія не розсіюється у вигляді тепла (як у соленоїді), а повертається в конденсатори блоку керування[15].

1.3.2 Гідравлічний компенсатор

Оскільки теплове розширення металевого корпусу форсунки при нагріванні двигуна може перевищувати робочий хід п'єзоелемента (40 мкм), прямий механічний зв'язок між стеком і клапаном неможливий. Будь-яка зміна температури призвела б до заклинювання або втрати контакту.

Для вирішення цієї проблеми застосовується гідравлічний компенсатор (гідроштовхач). Він являє собою герметичну камеру, заповнену паливом, між двома поршнями різного діаметра[16].

Функції компенсатора:

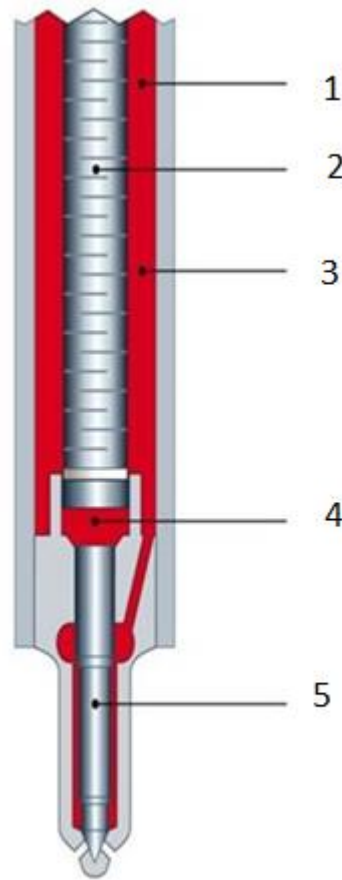
1. **Підсилення переміщення.** Використовуючи різницю площ поршнів ($A_{piezo} > A_{valve}$), компенсатор працює як гідравлічний важіль, перетворюючи малий хід п'єзоелемента з великою силою у великий хід клапана з меншою силою.
2. **Компенсація теплових зазорів.** При повільних змінах довжини деталей (теплове розширення) рідина встигає перетікати через мікроскопічні зазори (leakage gaps) поршнів, вирівнюючи тиск і зберігаючи "нульовий" зазор без передачі зусилля.
3. **Передача швидких імпульсів:** При миттєвому розширенні п'єзоелемента (за 100 мкс) рідина не встигає перетікати через зазори і поводить себе як абсолютно тверде тіло, передаючи рух на клапан без втрат.

Цей вузол є вершиною прецизійної механіки, але водночас і ахіллесовою п'ятою п'єзофорсунок. Знос поверхонь або зміна в'язкості палива може порушити роботу компенсатора, призводять до втрати ходу клапана[17].

1.3.3 Прямий привід голки (Direct Acting Piezo)

Вершиною розвитку є форсунки з прямим приводом (наприклад, Delphi Direct Acting). У цій архітектурі п'єзоактуатор механічно пов'язаний безпосередньо з голкою розпилювача (через гідравлічний підсилювач, що

інвертує рух), без проміжної камери керування тиском. Це усуває гідравлічну затримку (hydraulic lag), пов'язану зі стіканням палива з камери керування.



1 – вхід палива під тиском; 2 – п'єзoeлектричний пакет; 3 – лінія подачі палива до розпилювача; 4 – гідравлічний прискорювач; 5 – голка розпилювача.
Рисунок 1.4 – Форсунка з прямим приводом (Direct Acting Piezo)

У такій системі голка рухається синхронно з напругою на п'єзoelementі. Це дозволяє не тільки швидко відкривати/закривати форсунку, але й керувати профілем швидкості руху голки, частково відкриваючи її для формування похилого фронту впорскування (Ramp Shaping). Це дає безпрецедентний контроль над процесом згоряння, дозволяючи знизити утворення NOx безпосередньо в циліндрі[18].

Наведена нижче таблиця узагальнює ключові відмінності між двома основними технологіями приводів, що використовуються в сучасних системах Common Rail[19].

Таблиця 1.1 – Порівняння параметрів електромагнітних та п'єзоелектричних приводів

Параметр	Електромагнітна форсунка (Solenoid)	П'єзоелектрична форсунка (Piezo)
Фізичний принцип	Електромагнетизм (сила Лоренца/Ампера)	Зворотний п'єзоелектричний ефект
Час реакції (Response Time)	300 – 400 мкс	100 – 150 мкс
Рухома маса	Значна (якір + шток)	Мінімальна (тільки деформація кристала)
Сила приводу	Залежить від зазору (нелінійна)	Величезна (тисячі Ньютонів), лінійна
Кількість впорскувань за цикл	Зазвичай до 3-5	До 7-10
Електричне навантаження	Індуктивне (споживає струм)	Ємнісне (накопичує заряд, рекуперація)
Напруга керування	12 В (утримання) / 50-80 В (пік)	110 – 200 В
Характер відмови	Знос сидла, обрив котушки	Пробій стека, втрата ємності
Ремонтопридатність	Висока (заміна клапанів, розпилювачів)	Обмежена (складність складання стека)

1.4 Конструкція розпилювача

Розпилювач (Nozzle) — це компонент, який перетворює потенційну енергію тиску палива в кінетичну енергію розпиленого струменя. Від його геометрії залежить якість атомізації, проникна здатність факела (penetration) і кут розпилу (cone angle), які повинні ідеально відповідати формі камери згоряння в поршні[20].

1.4.1 Типологія: SAC проти VCO

Існує два основні типи конструкції кінчика розпилювача, що визначають об'єм залишкового палива:

1. **VCO (Valve Covered Orifice):** Голка своєю посадковою поверхнею перекриває безпосередньо вхідні отвори розпилювача. Це мінімізує "мертвий об'єм", запобігаючи витіканню незгорілого палива в циліндр після закриття форсунки. Це критично для зниження викидів вуглеводнів (НС). Однак така конструкція чутлива до бічних зусиль і може давати несиметричний факел при мікрозміщеннях голки.
2. **SAC (Sack Hole):** Під сідлом голки є невелика камера ("мішок"), з якої розходяться розпилювальні отвори. Це забезпечує більш рівномірний розподіл тиску по отворах і стабільну геометрію струменя, але збільшує обсяг палива, що випаровується в циліндр після закінчення впорскування. Сучасні розпилювачі використовують технологію **Mini-SAC**, де об'єм мішка зведений до мінімуму, компромісно поєднуючи переваги обох типів.¹⁵

1.4.2 Гідродинаміка та Кавітація в соплових отворах

Сучасні розпилювачі мають 5–10 отворів діаметром 0.1–0.15 мм. Протікання палива через такі вузькі канали супроводжується складними гідродинамічними явищами. Через різке звуження каналу швидкість потоку локально зростає, а статичний тиск падає (відповідно до закону Бернуллі). Якщо тиск падає нижче тиску насиченої пари палива, виникає кавітація — утворення парових бульбашок[21].

Раніше кавітацію вважали виключно шкідливою (ерозія металу). Сьогодні її використовують як інструмент. Конструкцію отворів (конічну форму, ступінь заокруглення вхідної кромки — K-factor) проєктують так, щоб індукувати контрольовану кавітацію. Колапс кавітаційних бульбашок на виході з сопла створює потужну турбулентність, яка сприяє "вибуховому" розпаду струменя на нано-краплі (primary breakup), значно покращуючи змішування палива з повітрям[22].

Для забезпечення довговічності в умовах кавітації та високих температур, голки та корпуси розпилювачів проходять спеціальну обробку:

- **Гідроабразивне шліфування (Hydro-erosive grinding / HE-rounding).** Прокачування абразивної рідини через отвори для згладжування гострих кромek і калібрування пропускної здатності.
- **DLC покриття.** Нанесення алмазоподібного вуглецю на голку для зменшення тертя та запобігання "залипанню" (stiction) в напрямній втулці[15].

1.5 Стратегії керування та багатоступеневе впорскування

Головна перевага швидкодіючих форсунок Common Rail — можливість розділити процес подачі палива на серію дискретних подій. Типова циклограма сучасного дизеля включає[12] :

1. **Попередні впорскування (Pilot Injections).** Мікродози (1-3 мг), що подаються за 20-40 градусів до ВМТ.
 - *Фізичний сенс:* Створення осередків полум'я, підвищення температури в камері.
 - *Ефект:* Зменшення періоду затримки займання основної дози. Це усуває різкий пік тиску (pressure spike), який є причиною характерного дизельного стуку. Двигун працює м'яко і тихо.
2. **Основне впорскування (Main Injection):** Забезпечує крутний момент. Може бути розділене на дві частини (Split Main) для зниження пікової температури згоряння і, як наслідок, зменшення утворення оксидів азоту (NO_x).
3. **Післявпорскування (Post Injections):**
 - *Ближнє (Close Post):* Допалює сажу (PM) в циліндрі.
 - *Пізнє (Late Post):* Подається на такті випуску. Паливо не згорає, а потрапляє в випускnu систему, де окислюється в каталізаторі (DOC), розігріваючи вихлопні гази до 600°C для регенерації сажового фільтра (DPF).³

1.5.1 Корекція індивідуальних характеристик (IMA/IQA/QR кодування)

Технологічні допуски при масовому виробництві призводять до того, що дві "однакові" форсунки при однаковому електричному імпульсі подають різну кількість палива (розкид може сягати $\pm 5\%$). У звичайних умовах це призвело б до дисбалансу циліндрів, вібрації та підвищеної токсичності.

Для компенсації цього кожна форсунка проходить фінальні випробування на заводі. Вимірюються відхилення подачі на різних режимах (холостий хід, повне навантаження, пілот). Ці дані кодуються в буквено-цифровий код (IQA - Injector Quantity Adjustment, IMA - Injector Mass Adjustment), нанесений на корпус.

При встановленні форсунки цей код вводиться в ЕБУ сканером. Блок керування розшифровує його і вносить індивідуальні поправки в тривалість імпульсу для кожного циліндра, віртуально "вирівнюючи" характеристики форсунок[14].

1.6 Висновки по розділу

Форсунка Common Rail — це інтелектуальний вузол, в якому сходяться передові досягнення матеріалознавства, гідродинаміки та електроніки. Її здатність керувати мікроскопічними дозами палива при тисках, що здатні різати сталь, і швидкостях, що перевищують швидкість кулі, є ключовим фактором ефективності сучасного дизеля.

Перехід від електромагнітних до п'єзоелектричних приводів дозволив розширити межі керованості процесом згоряння, реалізувавши складні стратегії багаторазового впорскування для відповідності нормам Euro 6 та майбутнім Euro 7. Однак це також призвело до ускладнення конструкції, підвищення вимог до якості палива та обслуговування.

Подальша еволюція форсунок буде спрямована на впровадження зворотного зв'язку в реальному часі (датчики тиску в голці) та подальше підвищення тисків впорскування для досягнення ідеального згоряння.

2 АНАЛІЗ ВІДМОВ ТА ДЕГРАДАЦІЇ ІНЖЕКТОРІВ СИСТЕМИ COMMON RAIL

2.1 Гідродинаміка руйнування. Знос мультиплікатора та зворотний злив

Мультиплікатор (або клапан управління) є функціональним серцем інжектора Common Rail, що забезпечує гідравлічне підсилення керуючого сигналу. Його робота базується на створенні різниці тисків над і під голкою розпилювача. Порухення герметичності цього вузла є домінуючою причиною відмов, відомою як "надмірний зворотний злив" (high back leakage).

2.1.1 Механізм абразивної та кавітаційної ерозії сідла клапана

В основі відмови мультиплікатора лежить процес ерозії сідла клапана (ball seat erosion). Цей процес не є миттєвим, а розвивається кумулятивно під дією двох фізичних факторів: високошвидкісного потоку рідини з абразивними частинками та кавітації[14].

Навіть при використанні якісних паливних фільтрів, мікроскопічні частинки розміром 2–4 мкм можуть проходити крізь систему фільтрації. У камері управління інжектора, де тиск може досягати 2000 бар і більше, при відкритті клапана швидкість потоку палива в зазорі "кулька-сідло" досягає надзвукових значень (сотні метрів за секунду). У цьому потоці тверді частинки набувають колосальної кінетичної енергії, діючи як "рідкий наждачний папір".³ Вони бомбардують поверхню сідла клапана, викликаючи мікроскопічні відколи та подряпини. З часом ці мікродефекти зливаються, утворюючи канали витоку (erosion grooves), через які паливо постійно просочується з лінії високого тиску в лінію низького тиску ("зворотку"), навіть коли інжектор закритий[5].

Паралельно з абразивним зносом діє явище кавітації. При різкому падінні тиску рідини під час проходження через вузький переріз клапана (дроселювання), статичний тиск може впасти нижче тиску насиченої пари палива, що призводить до утворення парових бульбашок. Коли ці бульбашки потрапляють у зону підвищеного тиску або контактують зі стінкою каналу, вони імплодують (схлопуються). Цей процес генерує ударні хвилі та мікрострумені

рідини (micro-jets) з екстремальними локальними параметрами тиску та температури, що буквально викидають частинки металу з поверхні клапана.⁵ Дослідження показують, що ерозія найбільш інтенсивна в зонах, де відбувається колапс кавітаційних хмар, зокрема на конічній поверхні сідла[13].

2.1.2 Роль води та мікробіологічного забруднення

Вода є каталізатором деструктивних процесів у мультиплікаторі. Вона може бути присутня у вільному стані (відстій) або емульгованому (суспензія).

- Вибухова ерозія (Explosive Erosion). Під дією високого тиску та температури в інжекторі вода, що потрапила в зону контакту, може миттєво переходити в газоподібний стан. Це розширення діє як мікробибух, що руйнує загартовані поверхні прецизійних пар.³
- Зниження змащувальної здатності: Вода значно гірше змащує тертьові пари, ніж дизельне паливо. Це призводить до збільшення тертя між штоком мультиплікатора та його напрямною, що може викликати заклинювання або прискорений знос.⁸
- Мікробіологічна корозія. На межі розподілу фаз "вода-паливо" розвиваються бактерії та грибки ("diesel bugs"), які продукують кислотні відходи. Ці кислоти викликають хімічну корозію металевих поверхонь, створюючи піттинг, який порушує герметичність клапана[4].

2.1.3 Гідравлічні наслідки. Втрата тиску в рейці

Знос мультиплікатора має прямий вплив на гідравлічний баланс системи.

1. Падіння тиску при запуску (Cranking Pressure Loss). На етапі запуску двигуна паливний насос високого тиску (ПНВТ) обертається повільно і має обмежену продуктивність. Якщо сумарний витік через зношені мультиплікатори перевищує подачу насоса, система не може досягти порогового тиску (зазвичай 200–250 бар), необхідного для активації інжекторів ЕБУ. Це призводить до важкого запуску ("hard start") або повної неможливості запуску двигуна[12].
2. Затримка закриття (Closing Delay). Через збільшений витік палива з камери управління, тиск у ній відновлюється повільніше після завершення циклу

впорскування. Це означає, що голка розпилювача опускається на сідло із запізненням, збільшуючи фактичну тривалість впорскування порівняно з розрахунковою. Це призводить до збагачення суміші та чорного диму[15].

Таблиця 2.1 – Таблиця симптомів зносу мультиплікатора.

Симптом	Фізичний механізм	Метод діагностики
Важкий запуск	Витік палива через зношене сідло клапана перевищує продуктивність насоса при стартерних обертах.	Тест на зворотний злив (Static Back Leak Test). Норма < 10-20 мл/хв (залежно від моделі).
Падіння тиску під навантаженням	Насос не може компенсувати втрати через "зворотку" при високому запиті на паливо.	Моніторинг фактичного тиску в рейці (Actual Rail Pressure) vs Заданого (Desired Rail Pressure).
Нерівномірна робота (Rough Idle)	Різний ступінь зносу мультиплікаторів у різних циліндрах викликає дисбаланс гідравлічної затримки.	Аналіз корекції циклової подачі (Balance Rates).

2.2 Деградація розпилювача

Розпилювач (nozzle) працює в найбільш агресивних умовах, безпосередньо контактуючи з продуктами згоряння та піддаючись циклічним термічним ударам. Його несправності поділяються на знос рухомих частин та зміну геометрії прохідних перерізів.

2.2.1 Знос пари "голка-сідло" та втрата герметичності

Герметичність розпилювача в закритому стані забезпечується щільним контактом конічної поверхні голки з конусом корпусу розпилювача.

- Ударна втома (Impact Fatigue): Голка здійснює тисячі посадок на сідло за хвилину. З часом це призводить до наклепу та деформації контактних поверхонь, що збільшує площу плями контакту. Збільшення площі

призводить до зменшення питомого тиску притискання, що погіршує герметичність[8].

- Наслідок – "Підтікання" (Dripping): Втрата герметичності дозволяє паливу просочуватися в циліндр у паузах між впорскуваннями. Це паливо не розпилюється, а витікає великими краплями, які не здатні швидко випаруватися та змішатися з повітрям. Це призводить до появи білого диму (незгорілі вуглеводні) на холостому ході або стуку через неконтрольоване займання крапель на такті стиснення[4].

2.2.2 Кавітація в соплових отворах

Кавітація всередині соплових отворів (nozzle holes) є двосічним мечем. З одного боку, вона покращує атомізацію струменя, з іншого — руйнує метал.

- Геометрична кавітація: Виникає на гострих кромках входу в сопловий отвір через різке прискорення потоку та локальне падіння тиску.
- Струнна кавітація (String Cavitation): Утворюється у вихрових структурах у мішку розпилювача (sac volume) і може проникати в отвори.⁷
- Ерозійні пошкодження: Дослідження з використанням прозорих реплік та CFD-моделювання показують, що зони ерозії корелюють з місцями схлопування бульбашок — переважно на верхній стінці отвору та в зоні сідла голки.⁷ Ерозія змінює форму отвору з циліндричної на конічну або іррегулярну, що призводить до збільшення пропускної здатності (flow rate) та зміни кута розпилення. Це може викликати потрапляння палива на стінки циліндра (wall wetting), змивання оливи та прогар поршня[5].

2.2.3 Закоксовування. Зовнішнє та внутрішнє

Закоксовування (Coking) — це процес накопичення твердих відкладень, що блокують потік палива.

- Зовнішнє закоксовування (Tip Coking). Утворюється навколо вихідних отворів через термічний розпад палива, що залишилося на кінчику розпилювача після впорскування. Це явище посилюється при наявності "підтікання" форсунки. Відкладення спотворюють форму факела (spray pattern), зменшуючи кут розпилення та збільшуючи довжину penetraції

(проникнення) струменя[16]. Це погіршує сумішоутворення, збільшує викиди сажі та знижує потужність.

- Вплив на потік. Відкладення зменшують ефективний гідравлічний діаметр отворів, що призводить до зниження циклової подачі палива при тому ж тиску та тривалості імпульсу[12].

2.3 Хімічна патологія: внутрішні відкладення інжектора (IDID)

На відміну від класичного закоксовування на кінчику розпилювача, внутрішні відкладення (Internal Diesel Injector Deposits — IDID) формуються на прецизійних поверхнях всередині корпусу інжектора: на голці, штоку клапана, якорі соленоїда. Це явище стало критичним для систем останніх поколінь з мікронними зазорами.

2.3.1 Типи IDID та механізми їх утворення

Дослідження виділяють два основні типи внутрішніх відкладень, що мають різну хімічну природу та механізми формування[17].

1. "Мильні" або воскоподібні відкладення (Metal Carboxylate Soaps)

Цей тип відкладень нагадує білу або жовтувату пасту (схожу на мастило) і складається з солей карбонових кислот.

- Хімічний механізм. Утворюються в результаті реакції між іонами металів (переважно натрію Na^+ або кальцію Ca^{2+}) та органічними кислотами в паливі.
 - Джерело Натрію. Найчастіше потрапляє в паливо через інгібітори корозії (наприклад, NaNO_2) під час транспортування трубопроводами або через випадкове забруднення охолоджувальною рідиною (яка містить присадки ОАТ — Organic Acid Technology), що містить натрієві солі[18].
 - Джерело Кислот. Кислоти можуть бути присутні в паливі як присадки для покращення змащувальних властивостей (lubricity improvers), інгібітори корозії (наприклад, додецилбурштинова кислота - DDSA) або продукти окислення біодизеля.
- Вплив. Ці "мила" накопичуються в зазорах між голкою та корпусом, викликаючи "залипання" (sticking). Це збільшує тертя, сповільнює рух

голки і призводить до гістерезису управління: форсунка відкривається із затримкою і може не закритися вчасно[19].

2. Лакові відкладення (Amide Lacquers)

Ці відкладення мають вигляд твердої, темної плівки, схожої на лак.

- Хімічний механізм. Утворюються в результаті реакцій полімеризації між низькомолекулярними дисперсантами (такими як поліізобутилен-сукциніміди — PIBSI), що використовуються в пакеті миючих присадок, та іншими компонентами палива за умов високого тиску та температури.
- Вплив. Лакова плівка зменшує робочі зазори, блокуючи рух якоря електромагніту або клапана-мультиплікатора. Це особливо критично для режимів попереднього впорскування (Pilot Injection), які вимагають швидкого і точного переміщення на малі відстані[20].

2.3.2 Симптоматика IDID

Відкладення IDID підступні тим, що вони не викликають фізичного зносу деталей, але блокують їхню роботу:

- Втрата потужності та нерівномірна робота: через повільну реакцію голки порушується баланс подачі палива по циліндрах.
- Холодний пуск: проблема часто загострюється на холодному двигуні, коли в'язкість відкладень ("мил") максимальна, що призводить до "склеювання" деталей. Після прогріву симптоми можуть зникати або зменшуватися[6].
- Відсутність кодів помилок: на ранніх стадіях ЕБУ може не фіксувати електричних несправностей, оскільки проблема є суто механічною/гідравлічною.

2.4 Електромеханічна деградація

Електрична частина інжектора (актуатор) відповідає за ініціацію процесу впорскування. Відмови в цій системі можуть бути миттєвими (катастрофічними) або поступовими (деградаційними).

2.4.1 Електромагнітні (соленоїдні) інжектори

У соленоїдних інжекторах магнітне поле, створюване котушкою, піднімає якір, відкриваючи керуючий клапан.

- Коротке замикання (Short Circuit): ізоляція обмоток може руйнуватися через вібрацію, температурні цикли або хімічну атаку при потраплянні палива/масла всередину корпусу електромагніту. Міжвиткове замикання змінює індуктивність та опір котушки, що призводить до перевантаження драйвера в ЕБУ[15].
- Обрив кола (Open Circuit): механічний розрив провідників або корозія контактів у роз'ємі перериває подачу струму, що призводить до повного відключення циліндра.
- Діагностика: перевірка опору (Ом) та індуктивності (Гн). Типовий опір низькоомних інжекторів становить < 1 Ом, що вимагає точних міліомметрів для діагностики.

2.4.2 П'єзоелектричні інжектори. Фізика деградації кристалів

П'єзоелектричні форсунки (Siemens/VDO, Bosch Piezo) використовують стек із сотень шарів п'єзокераміки (PZT — цирконат-титанат свинцю), який розширюється при подачі напруги (зворотний п'єзоефект). Цей тип приводу є значно швидшим (час реакції < 100 мкс), але має унікальні моди відмов.²¹

- Електрична модель та параметри

П'єзопакет електрично поводить як конденсатор. Його стан оцінюється за трьома параметрами: ємність (Capacitance), опір (Resistance) та опір ізоляції.

- Типові значення: для форсунок Bosch: 2.0–2.5 мкФ, опір 170–210 кОм. Для Siemens/VDO: 3.0–4.5 мкФ, опір ~ 200 кОм[23].
- Механізми відмов п'єзостека:

1. Дрейф ємності та втрата ходу (Capacitance Decay). З часом ємність п'єзоелемента знижується. Енергія, що перетворюється на механічну роботу, пропорційна ємності ($E = \frac{1}{2} CV^2$). Зменшення ємності призводить до зменшення лінійного розширення (ходу) п'єзоелемента. Це порушує роботу гідравлічного підсилювача (hydraulic coupler), викликаючи зменшення ходу клапана і, як наслідок, недолив палива або повну відсутність впорскування.

- *Причини:* втрата поляризації доменів (depoling) через перегрів або механічні перевантаження, а також мікротріщини, що відключають частину шарів стека від електродів.

2. Деградація опору (Internal Leakage): п'єзопакет повинен утримувати заряд, щоб тримати клапан відкритим. Якщо внутрішній опір падає (наприклад, через міграцію металу електродів або проникнення вологи/палива у мікротріщини кераміки), виникає струм витоку. П'єзоелемент саморозряджається, і інжектор передчасно закривається під час циклу впорскування. Це призводить до нестабільної роботи двигуна. Якщо опір падає нижче критичного рівня (наприклад, < 100 кОм), ЕБУ блокує управління форсункою[17].

3. Механічне розшарування (Delamination): п'єзокераміка крихка і погано переносить розтягуючі зусилля. Недостатній попередній натяг при складанні або різке розрядження (що викликає різке скорочення) може призвести до розтріскування стека і втрати електричного контакту між шарами.

Таблиця 2.2 – Типові значення електричних параметрів форсунок

Параметр	Bosch Piezo (типові)	Siemens/VDO Piezo (типові)	Симптом відхилення
Ємність	2.0 – 2.5 мкФ	3.0 – 4.5 мкФ	$<$ Норми: Недолив палива, пропуски.
Опір стека	170 – 210 кОм	~ 200 кОм	< 150 кОм: Саморозряд, закриття форсунки.
Ізоляція	> 10 МОм	> 10 МОм	< 1 МОм: Пробій на масу, відключення ЕБУ.

2.5 Вплив несправностей на робочий процес та надійність двигуна

Будь-яке відхилення в роботі інжектора миттєво позначається на термодинаміці циклу дизельного двигуна, порушуючи закон подачі палива ($dQ/d\phi$) і тепловиділення.

2.5.1 Димність як діагностичний маркер

Колір вихлопних газів дозволяє ідентифікувати тип порушення сумішоутворення[4].

- Білий дим (White Smoke) (аерозоль незгорілого палива).
 - *Механізм.* Виникає, коли паливо потрапляє в камеру згоряння, але не запалюється через низьку температуру (наприклад, при холодному пуску) або занадто пізніє впорскування. Підтікання розпилювача (dripping) є класичною причиною: паливо капає з носика після завершення згоряння, випаровується на гарячих деталях, але не горить, виходячи у вихлопну трубу.
- Чорний дим (Black Smoke) (це тверді частинки сажі (Particulate Matter))
 - *Механізм.* Свідчить про локальну нестачу кисню (багата суміш). Причини: заклинювання форсунки у відкритому стані, ерозія соплових отворів (збільшення діаметра призводить до падіння тиску впорскування -> утворення великих крапель -> повільне випаровування -> дифузійне горіння з утворенням сажі). Також, затримка закриття через зношений мультиплікатор подовжує фазу впорскування, коли поршень вже опустився, і температура впала, що зупиняє окислення сажі.

2.5.2 Детонація та акустичний дискомфорт

Дизельна детонація ("стукіт") виникає через надмірно високу швидкість наростання тиску в циліндрі ($dP/d\phi$).

- Збій попереднього впорскування (Pilot Injection Failure): сучасні алгоритми використовують малі попередні порції палива (1–2 мм³) для "підігріву" камери згоряння, що скорочує затримку займання основної дози. Якщо через знос мультиплікатора або деградацію п'єзoeлемента (дрейф ємності) форсунка втрачає здатність дозувати ці малі порції, попереднє впорскування зникає. Це призводить до того, що основна доза впорскується в "холодний" циліндр, період затримки займання збільшується, накопичується велика кількість палива, яке потім вибухоподібно згорає, викликаючи жорсткий металевий стукіт.

- Наслідки для двигуна: детонаційні хвилі руйнують масляну плівку, збільшують навантаження на поршневі пальці та вкладиші, і можуть призвести до втомного руйнування поршня.

2.5.3 Втрата потужності та дисбаланс

- Нерівномірність (Rough Running): різний гідравлічний опір форсунок (через різний ступінь закоксованості або зносу мультиплікаторів) призводить до різної циклової подачі по циліндрах. ЕБУ намагається вирівняти кутову швидкість колінвалу через механізм корекції (Cylinder Balancing), але межі корекції обмежені (зазвичай +/- 4-5 мг/цикл). Вихід за межі викликає вібрацію.
- Аварійний режим (Limp Mode): якщо зворотний злив надмірний, насос не може підтримувати заданий тиск (наприклад, 1600 бар при повному навантаженні). ЕБУ фіксує помилку P0087 (Low Rail Pressure) і обмежує крутний момент для захисту системи.

2.5.4 Прогар поршнів та розрідження оливи

Ігнорування симптомів несправності інжекторів веде до фатальних пошкоджень двигуна[16].

1. Розрідження оливи (Oil Dilution): при сильному витoku або "залипанні" форсунки незгоріле паливо стікає по стінках гільзи в картер. Дизельне паливо розріджує моторну оливу, знижуючи її в'язкість та температуру спалаху. Це призводить до задирів підшипників колінчастого вала та турбіни.
2. Змивання масляної плівки (Cylinder Wash): рідке паливо на стінках циліндра змиває оливу, викликаючи сухе тертя поршневих кілець і прискорений знос циліндро-поршневої групи.
3. Прогар поршня (Piston Melting): якщо через ерозію або закоксовування отвору форма факела спотворюється (зменшується кут конуса), струмінь палива, що горить, може діставати безпосередньо до поверхні поршня (spray impingement). Локальний перегрів викликає термічну втому,

тріщини або наскрізне розплавлення днища поршня, що виводить двигун з ладу.

2.6 Висновки по розділу

Аналіз показує, що надійність інжекторів Common Rail критично залежить від чистоти палива та теплового режиму. Основні механізми відмов змістилися від макроскопічного зносу до мікроскопічних та фізико-хімічних явищ:

- Гідродинамічна ерозія мультиплікатора є головною причиною проблем із запуску.
- Кавітація та закоксовування розпилювача визначають екологічні показники та ризик руйнування поршневої групи.
- Хімічні відкладення (IDID) стали новим викликом, блокуючи роботу справних механічно вузлів через реакції сучасних присадок.
- П'єзоелектрична деградація вимагає нових підходів до діагностики, оскільки включає вимірювання ємнісних характеристик, а не лише опору.

Розуміння фізики цих процесів дозволяє переходити від простої заміни деталей до профілактичного обслуговування, що включає контроль якості палива, використання спеціалізованих миючих присадок та регулярну діагностику параметрів корекції форсунок.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Програма та методика експериментальних досліджень

Для досягнення мети роботи, яка полягає у встановленні залежності між технічним станом конструктивних елементів форсунки та її вихідними характеристиками, було розроблено програму експериментальних досліджень.

3.1.1 Загальна програма досліджень

Програма досліджень передбачає виконання наступних етапів:

1. **Відбір об'єктів дослідження:** формування вибірки електромагнітних форсунок системи Common Rail з різними типами експлуатаційних дефектів.
2. **Вхідний контроль:** візуальний огляд зовнішнього стану, перевірка електричних параметрів електромагніту (опір, індуктивність, опір ізоляції).
3. **Стендові випробування:** проведення вимірювань гідравлічних характеристик форсунок на автоматизованому діагностичному стенді відповідно до уніфікованого тест-плану.
4. **Реєстрація параметрів:** фіксація значень об'ємної подачі палива (впорскування) та об'єму зворотного зливу («зворотки») на контрольних точках.
5. **Порівняльний аналіз:** зіставлення отриманих даних із еталонними значеннями (Test Data) заводу-виробника та оцінка впливу відхилень на робочий процес двигуна.

3.1.2 Об'єкт дослідження та підготовка зразків

Як об'єкт дослідження обрано електромагнітні форсунки **Bosch 0 445 110 190** (покоління CRI 2.1), що широко застосовуються на дизельних двигунах комерційного транспорту (наприклад, Mercedes-Benz OM611/OM646). Вибір зумовлений поширеністю даного типу форсунок та наявністю відкритої технічної документації.

Для експерименту підготовлено три зразки форсунок, що імітують різні технічні стани:

- **Зразок №1 (Еталон):** форсунка після капітального ремонту з використанням оригінальних комплектуючих, параметри якої відповідають заводським нормам.
- **Зразок №2 (Дефект гідросільності):** форсунка з експлуатаційним зносом сідла клапана-мультиплікатора. Очікуваний дефект — підвищений зворотний злив.
- **Зразок №3 (Дефект дозування):** форсунка з ерозійним зносом соплових отворів розпилювача та частковим заклинюванням голки. Очікуваний дефект — відхилення циклової подачі.

3.1.3 Методика проведення стендових випробувань

Випробування проводяться методом безпосереднього вимірювання об'ємної продуктивності форсунки за певну кількість циклів (Strokes).

Умови проведення експерименту:

- Робоча рідина. Калібрувальна олива стандарту ISO 4113 (в'язкість 2.5 cSt при 40°C). Використання дизельного палива не допускається через нестабільність його в'язкості та температури спалаху.
- Температурний режим. Температура калібрувальної рідини підтримується в діапазоні 40°C ± 2°C. Відхилення температури призводить до зміни в'язкості рідини та похибки вимірювань.
- Тиск підпору (Backpressure). У магістралі зворотного зливу підтримується надлишковий тиск 0.5–1.0 бар для імітації реальних умов роботи на автомобілі.

Алгоритм перевірки (Тест-план):

Випробування кожного зразка проводиться у п'яти контрольних точках, що моделюють основні режими роботи двигуна. Перед початком вимірювань проводиться етап прогріву (Warm Up) та видалення повітря з системи (Bleeding).

1. Випробування на герметичність (High Pressure Leak Test):

- *Мета:* Визначення ступеня зносу пари «куля-сідло» мультиплікатора.
- *Умови:* Тиск у рейці — 1350 бар; сигнал керування відсутній (форсунка закрита).

- *Критерій оцінки:* Об'єм рідини, що надходить у канал зворотного зливу, не повинен перевищувати допустиму норму (макс. 45 мм³/цикл).
2. Режим повного навантаження (VL - Voll-Last):
- *Мета:* Оцінка максимальної пропускної здатності розпилювача.
 - *Умови:* Тиск — 1350 бар; тривалість імпульсу — 900 мкс.
 - *Вплив на двигун:* Визначає максимальну потужність та димність вихлопу.
3. Режим емісії / Часткових навантажень (EM - Emissions):
- *Мета:* Контроль якості розпилу та дозування в найбільш уживаному режимі руху.
 - *Умови:* Тиск — 800 бар; тривалість імпульсу — 650 мкс.
4. Режим холостого ходу (LL - Leerlauf):
- *Мета:* Перевірка рухливості голки розпилювача та швидкодії магніту при малих подачах.
 - *Умови:* Тиск — 250 бар; тривалість імпульсу — 550 мкс.
 - *Вплив на двигун:* Стабільність обертів холостого ходу, вібраційне навантаження.
5. Режим попереднього впорскування (VE - Vor-einspritzung):
- *Мета:* Оцінка здатності форсунки дозувати мікропорції палива.
 - *Умови:* Тиск — 800 бар; короткий імпульс — 160 мкс.
 - *Вплив на двигун:* Акустичний комфорт, зниження ударних навантажень на кривошипно-шатунний механізм.

Наведемо детальний Тест-план (Test Plan) для форсунки Bosch 0 445 110 190.

ТЕСТ-ПЛАН: Bosch 0 445 110 190 (CR/IPL19/ZEREK10S)[23]

Тип: Електромагнітна форсунка (CRI 2.1)

Автомобілі: Mercedes-Benz Sprinter (2.2 CDI, 2.7 CDI), Vito, E-Class (W210, W211).

Тестова рідина: ISO 4113

Температура рідини: $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$

1. Електричні параметри (Electrical Test)

Перед гідравлічними випробуваннями перевіряється електрична частина (на холодному та гарячому електромагніті).

Таблиця 3.1 – Електричні вимірювання соленоїда форсунки

Параметр	Позначення	Норма (Min)	Норма (Max)	Одиниця
Опір соленоїда	R	0.25	0.50	Ом (Ω)
Індуктивність	L	150	300	мкГн (μH)
Опір ізоляції (на корпус)	R-ISO	10	∞	МОм ($M\Omega$)

2. Гідравлічні випробування (Hydraulic Test Steps)

Всі заміри проводяться за кількість циклів: 1000 циклів (або перераховуються на цю кількість).

Таблиця 3.2 – Тест-план гідравлічних випробувань

№	Етап (Режим)	Тиск (bar)	Імпульс (μs)	Частота (Hz/RPM)	Мін. подача (mm^3/str)	Макс. подача (mm^3/str)	Мін. злив (mm^3/str)	Макс. злив (mm^3/str)
1	Leak Test (Перевірка герметичності)	1350	0	-	-	0.5 (з розпилювача)	10.0	45.0
2	VL (Повне навантаження)	1350	900	24 (1440)	52.0	64.0	20.0	60.0
3	EM (Середнє навантаження)	800	650	16 (960)	18.5	24.5	-	-
4	LL (Холостий хід)	250	550	13 (780)	3.5	7.5	-	-
5	VE (Попереднє впорскування)	800	160	24 (1440)	1.2	2.8	-	-

Примітки до тест-плану.

- **Warm Up (Прогрів).** Не вказаний у таблиці, але обов'язковий етап. Форсунка працює 1-2 хвилини під тиском 800-1000 бар для стабілізації температури електромагніту та видалення повітря.
- **Leak Test (Герметичність).** Найважливіший тест.
 - Імпульс = 0 (форсунка закрита).
 - Якщо злив перевищує 45.0 мм³/цикл, форсунка вважається несправною (знос мультиплікатора).
 - Якщо є краплі з розпилювача (подача > 0.5 мм³), це свідчить про негерметичність голки (протікання в циліндр).
- **VL (Voll-Last).** Максимальна продуктивність. Визначає потужність двигуна.
 - Якщо подача < 52.0 — втрата тяги.
 - Якщо подача > 64.0 — чорний дим, перегрів.
- **LL (Leerlauf).** Критичний режим для стабільності. При тиску 250 бар зусилля для підняття голки мінімальне, але й гідравлічна допомога мала. Якщо форсунка "клинить", вона часто не відкривається саме тут (подача = 0).
- **VE (Vor-Einspritzung).** Режим перевіряє швидкодію магніту (індуктивну реакцію). Імпульс дуже короткий (160 мікросекунд). Якщо магніт "втомився" або хід анкера порушений, форсунка не встигне відкритися/закритися, і подача буде 0 або занадто велика.

3.1.4 Обробка результатів

Отримані дані заносяться до протоколів випробувань. Для кожного режиму розраховується абсолютне (ΔQ) та відносне (δ) відхилення від еталонних значень за формулою:

$$\delta = \frac{Q_{measured} - Q_{ref}}{Q_{ref}} \cdot 100\%$$

де $Q_{measured}$ — виміряна подача, Q_{ref} — еталонна подача (середнє значення тест-плану).

3.2 Характеристика експериментального обладнання та схеми вимірювань

Для проведення експериментальних досліджень було сформовано діагностичний комплекс, який дозволяє проводити випробування як в умовах спеціалізованої лабораторії (зі зняттям форсунок), так і безпосередньо на двигуні (без демонтажу).

3.2.1 Лабораторна установка на базі приладу CR-Tester

Для моделювання робочих процесів паливної апаратури Common Rail використано стендову установку, що складається з електронної та гідравлічної частин.

1. Електронний блок керування (CR-Tester)

У якості генератора керуючих сигналів використано прилад CR-Tester.



Рисунок 3.1 – Прилад для керування форсунками CR-Tester.

- Призначення: прилад імітує роботу електронного блоку управління двигуном (ECU), генеруючи електричні імпульси необхідної форми та напруги для відкриття електромагнітного клапана форсунки.

Основні технічні можливості приладу. Прилад дозволяє оператору в ручному режимі налаштовувати ключові параметри циклової подачі, що критично важливо для моделювання різних режимів роботи двигуна:

- Тривалість імпульсу впорскування (T_{imp}):

Діапазон регулювання: зазвичай від 100 до 3000 мкс (мікросекунд).
Визначає час, протягом якого голка розпилювача знаходиться у відкритому стані. Прямо впливає на об'єм подачі палива (q_{cycl}).

- Частота впорскування (f):

Діапазон регулювання: від 1 Гц до 30 Гц (або 60–3000 об/хв). Імітує швидкість обертання колінчастого вала двигуна.

- Кількість циклів (Лічильник):

Дозволяє задати точну кількість спрацьовувань (наприклад, 1000 циклів) для точного вимірювання об'ємної продуктивності у мірну колбу.

Методика використання CR-Tester під час експерименту.

Процес діагностики форсунки за допомогою приладу CR-Tester та джерела високого тиску (насоса) виконується за наступним алгоритмом:

Підключення: форсунка встановлюється у стапель (трич), під'єднується до магістралі високого тиску. Електричні клеми CR-Tester під'єднуються до контактів електромагніту форсунки.

Перевірка електричної частини: перед подачею тиску прилад проводить експрес-тест на обрив або коротке замикання обмотки соленоїда.

Режим "Герметичність" (Leak Test):

- На приладі встановлюється тривалість імпульсу 0 мкс (сигнал відсутній).
- Нагнітається робочий тиск.
- Візуально контролюється відсутність протікання через носик розпилювача та вимірюється об'єм рідини, що виходить через канал зворотного зливу (Static Leak).

Режим "Якість розпилювання" (Spray Pattern):

- Встановлюються параметри: $T_{imp} \approx 800\text{--}1000$ мкс, частота $\approx 5\text{--}10$ Гц.
- Візуально оцінюється форма факела розпилу. Справна форсунка повинна давати чіткий конус туману палива без струменів, крапель та підтікань після закриття.

Режим "Вимірювання об'єму" (Volume Measurement):

- Встановлюються параметри згідно з тест-планом (наприклад, для режиму VL: $T_{imp} = 900$ мкс).
- Запускається відлік циклів (наприклад, 1000 ударів).
- Отриманий у мірній пробірці об'єм рідини порівнюється з еталонним.

Особливості безпеки: оскільки CR-Tester генерує високовольтні імпульси (для електромагнітних форсунок напруга може досягати 50–80 В, а для п'єзоелектричних — понад 100 В), під час роботи забороняється торкатися контактів форсунки.

2. Система вимірювання об'єму (Мензурковий метод)

Для кількісної оцінки продуктивності форсунок використано блок мірних пробірок (колб) з нанесеним градуванням.

- Принцип дії: паливо, що пройшло через розпилювач (подача) та через клапан-мультиплікатор (зворотний злив), відводиться окремими трубками у дві різні пробірки.
- Точність вимірювання визначається ціною поділки вимірювальної ємності (зазвичай 1 мл або 0.5 мл).
- Переваги методу: дозволяє візуально оцінити не тільки об'єм, але й фізичний стан палива (наприклад, наявність бульбашок повітря в "обратці", що свідчить про прорив газів або кавітацію).

3.2.2 Методика діагностики зворотного зливу на двигуні (On-Board Test)

Для перевірки гідравлічної щільності форсунок без їх демонтажу застосовано метод вимірювання об'ємного зливу в режимі прокручування стартером або на холостому ходу.

Обладнання: комплект для перевірки зворотного зливу (Common Rail Flow Meter Kit), що складається з прозорих полівінілхлоридних трубок, адаптерів для підключення до штуцерів форсунок (типу Bosch/Delphi/Denso) та мірних колб ємністю 100 мл.

Схема проведення досліду:

1. Штатні шланги "зворотки" від'єднуються від форсунок.
2. До кожної форсунки підключається окрема мірна ємність.
3. Двигун запускається і працює на холостому ходу (або прокручується стартером протягом 10 секунд, якщо запуск неможливий).
4. Критерій оцінки: різниця в наповненні колб понад 3 рази вказує на критичний знос мультиплікатора конкретної форсунки. Цей метод дозволяє швидко локалізувати несправний вузол, що перешкоджає створенню високого тиску в рейці.

3.3 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

Відповідно до затвердженої методики, було проведено серію випробувань трьох зразків електромагнітних форсунок Bosch 0 445 110 190. Дослідження проводилися у два етапи: стендові випробування для отримання точних кількісних характеристик та натурні випробування (на двигуні) для підтвердження діагностичних гіпотез.

3.3.1 Результати стендових випробувань (CR-Tester)

Результати вимірювання об'ємної подачі та зворотного зливу наведено у Таблиці 3.1.

Аналіз отриманих результатів:

1. Аналіз Зразка №1 (Еталон).

Всі виміряні параметри знаходяться в середині поля допуску ("зелена зона"). Це підтверджує працездатність еталонної форсунки та коректність налаштувань вимірювального комплексу (CR-Tester).

2. Аналіз Зразка №2 (Дефект гідроцільності).

Даний зразок демонструє критичне відхилення на етапі Leak Test (88.4 мм³/цикл при нормі до 45.0).

- *Фізична природа.* Таке зростання зворотного зливу свідчить про абразивний знос сидла клапана-мультиплікатора. Клапан не може щільно перекрити канал, через що паливо під високим тиском постійно перетікає в магістраль низького тиску ("зворотку").

- *Вплив на режим LL:* Зверніть увагу на режим холостого ходу (LL). Подача становить всього 2.1 мм³/цикл (нижче норми). Це пояснюється тим, що при низькому тиску в рейці (250 bar) гідравлічні втрати через нещільний клапан стають співмірними з корисним впорскуванням.
- *Наслідки для двигуна:* Ускладнений запуск (стартер не може створити пусковий тиск 250 bar через витік), нерівномірна робота на холостому ходу.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання об’ємної подачі та зворотного зливу

Режим випробування (Test Step)	Параметр контролю	Еталонні значення (min...max), мм3/цикл	Зразок №1 (Еталон)	Зразок №2 (Знос мультиплікатора)	Зразок №3 (Знос розпилювача)	Відхилення від норми (для несправних)
1. Leak Test (Герметичність, 1350 bar)	Зворотний злив	10.0 ... 45.0	22.5	88.4	35.1	+96.4% (Перевищення)
2. VL (Повне навантаження, 1350 bar)	Подача палива	52.0 ... 64.0	58.2	53.1	69.8	+9.1% (Перевищення)
	Зворотний злив	20.0 ... 60.0	41.0	95.2	45.3	+58.6% (Перевищення)
3. EM (Середнє навантаження, 800 bar)	Подача палива	18.5 ... 24.5	21.3	19.1	28.4	+15.9% (Перевищення)
4. LL (Холостий хід, 250 bar)	Подача палива	3.5 ... 7.5	5.4	2.1	6.8	-40.0% (Заниження)
5. VE (Попереднє впорскування, 800 bar)	Подача палива	1.2 ... 2.8	1.9	1.1	2.5	В межах норми

Графічно експериментальні результати зображено на рис.3.2-3.4.

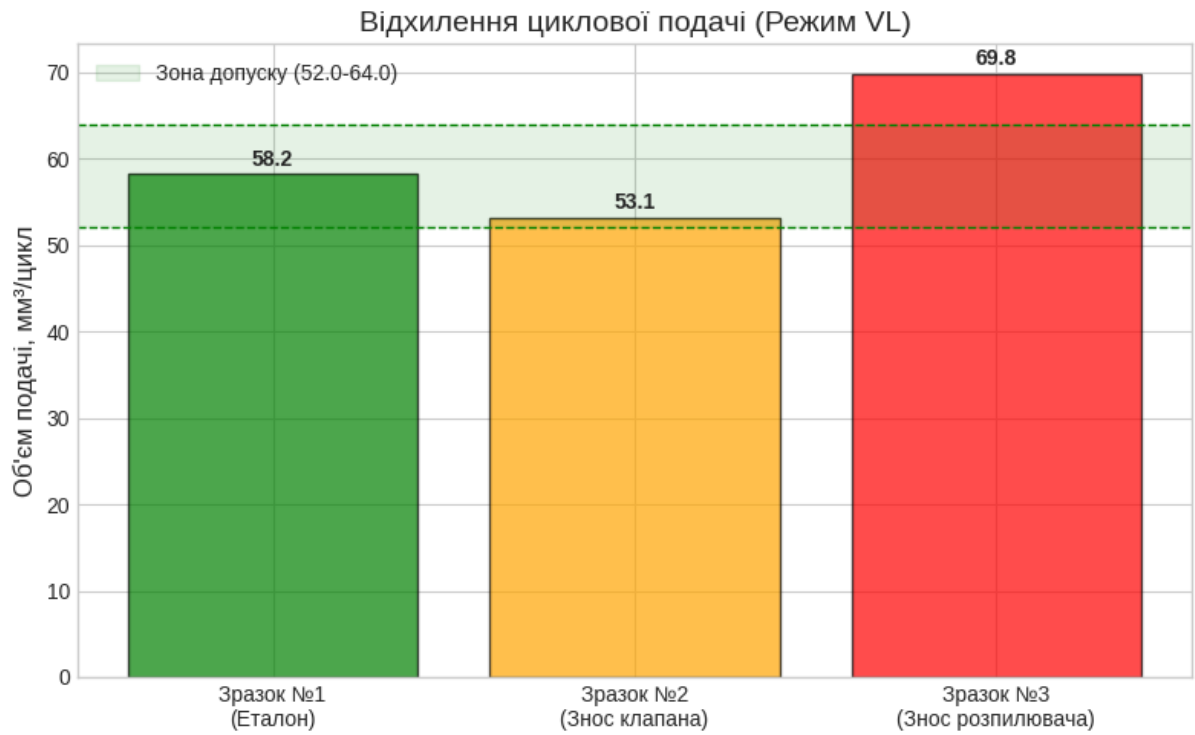


Рисунок 3.2 – Відхилення циклової подачі

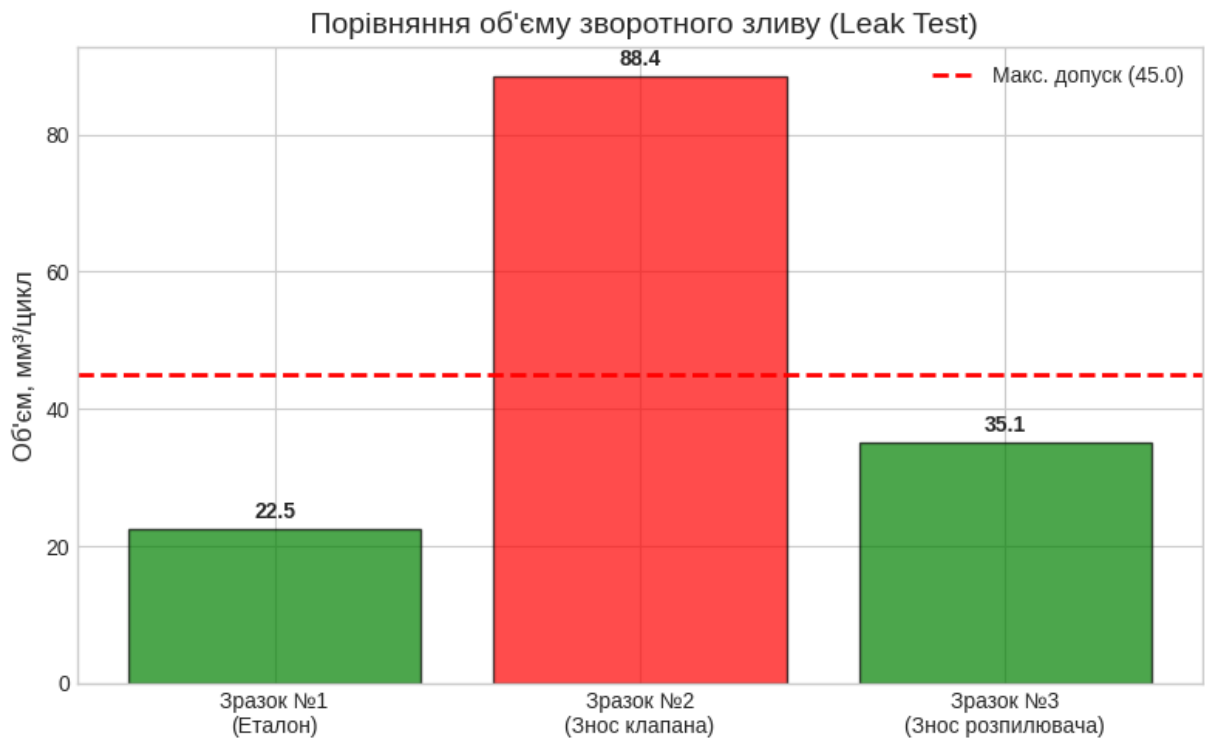


Рисунок 3.3 – Порівняння зворотного зливу

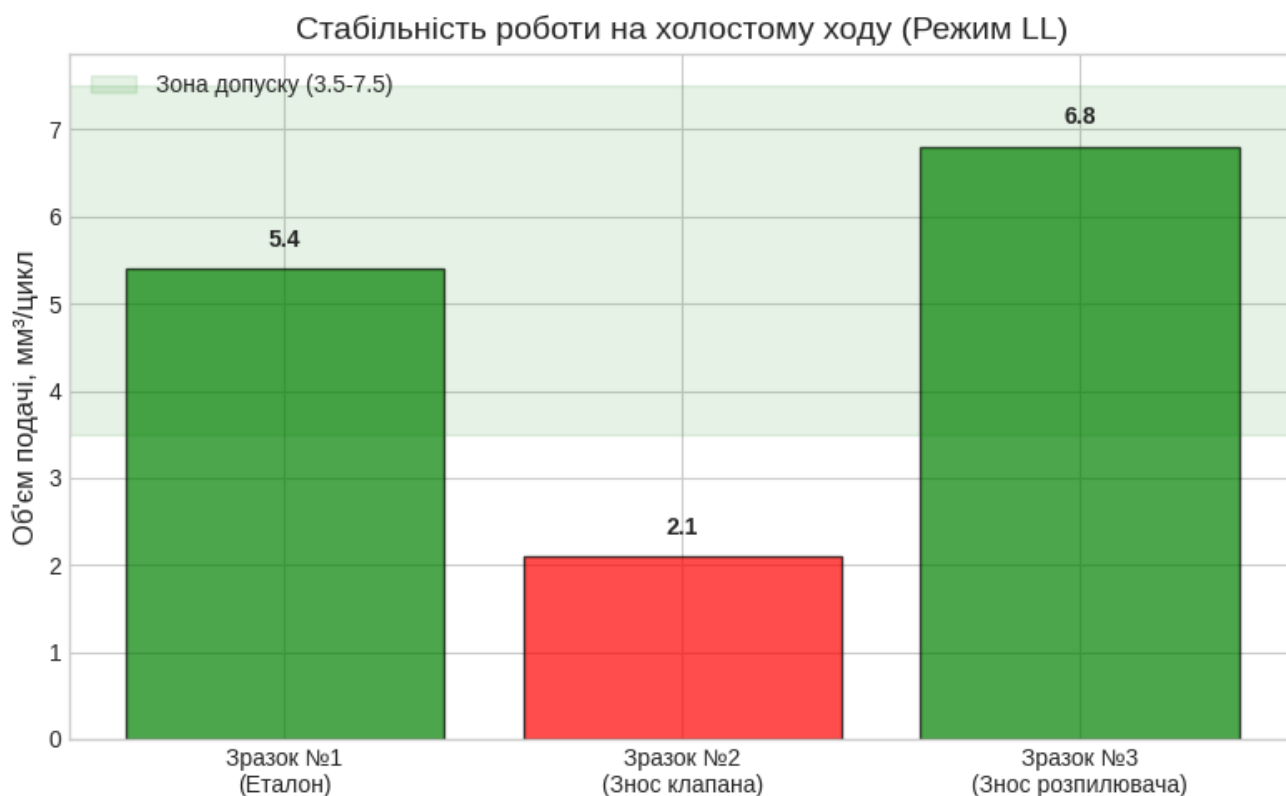


Рисунок 3.4 – Стабільність роботи на холостому ходу

Аналіз отриманих результатів:

1. Аналіз Зразка №1 (Еталон).

Всі виміряні параметри знаходяться в середині поля допуску ("зелена зона"). Це підтверджує працездатність еталонної форсунки та коректність налаштувань вимірювального комплексу (CR-Tester).

2. Аналіз Зразка №2 (Дефект гідрощільності):

Даний зразок демонструє критичне відхилення на етапі Leak Test (88.4 мм³/цикл при нормі до 45.0).

- *Фізична природа.* Таке зростання зворотного зливу свідчить про абразивний знос сідла клапана-мультиплікатора. Клапан не може щільно перекрити канал, через що паливо під високим тиском постійно перетікає в магістраль низького тиску ("зворотку").
- *Вплив на режим LL.* Подача становить всього 2.1 мм³/цикл (нижче норми). Це пояснюється тим, що при низькому тиску в рейці (250 bar) гідравлічні втрати через нещільний клапан стають співмірними з корисним впорскуванням.

- *Наслідки для двигуна:* ускладнений запуск (насос не може створити пусковий тиск 250 bar через витік), нерівномірна робота на холостому ході.

3. Аналіз Зразка №3 (Дефект розпилювача):

Зразок характеризується завищеною подачею палива на силових режимах: VL (69.8 мм³) та EM (28.4 мм³).

- *Фізична природа.* Відхилення викликане збільшенням прохідного перерізу соплових отворів внаслідок ерозійного зносу, або ж сповільненою посадкою голки розпилювача в сидло через закоксування.
- *Наслідки для двигуна:* електронний блок керування (ЕБУ) розраховує подачу виходячи з заводських параметрів. Фактичне надходження надлишкового палива призведе до його неповного згоряння, появи чорного диму (сажі), підвищення температури вихлопних газів (EGT) та ризику прогорання поршня.

3.3.2 Результати експрес-діагностики на двигуні (гідравлічний тест)

Для перевірки кореляції між стендовими даними та реальною експлуатацією було проведено тест на зворотний злив безпосередньо на двигуні (без демонтажу форсунок) з використанням мірних колб.

Умови тесту:

- Режим: Прокручування стартером (без запуску двигуна) протягом 10 секунд.
- Тиск у рейці (фактичний): ~220 бар.

Результати замірів об'єму в колбах:

1. **Зразок №1:** 4 мл (Норма).
2. **Зразок №2:** 15 мл (Критичний злив).
3. **Зразок №3:** 5 мл (В межах норми).

Експрес-метод підтвердив дані стендових випробувань щодо Зразка №2. Перевищення об'єму зворотного зливу майже в 4 рази порівняно з еталоном однозначно вказує на несправність гідравлічної частини (мультиплікатора), що робить подальшу експлуатацію форсунки неможливою без ремонту. Водночас,

даний метод виявився неефективним для діагностики Зразка №3 (проблема розпилювача), оскільки він не оцінює якість впорскування в циліндр.

3.3.3 Узагальнення результатів дослідження

Побудовані гістограми відхилень (рис. 3.2-3.4) наочно демонструють, що різні типи зносу форсунки по-різному впливають на вихідні характеристики.

- Знос мультиплікатора впливає на гідравлічну щільність системи (падіння тиску в рейці).
- Знос розпилювача впливає на точність дозування (якість сумішоутворення).

Таким чином, повна оцінка ефективності роботи форсунки можлива лише при комбінації перевірки на герметичність та перевірки на об'ємну продуктивність під навантаженням.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

Під час проведення експериментальних досліджень ефективності роботи паливних форсунок на діагностичному стенді та безпосередньо на двигуні, на дослідника можуть впливати наступні небезпечні фактори (згідно з ДСТУ 2293-99)[24]:

1. **Підвищений тиск рідини:** Робочий тиск у системі Common Rail під час випробувань досягає 1350–1800 бар (і вище). Струмінь палива під таким тиском має величезну кінетичну енергію.
2. **Ураження електричним струмом:** Використання електричного обладнання (діагностичний стенд, прилад CR-Tester, електродвигун приводу насоса) з напругою живлення 220/380 В.
3. **Хімічний вплив:** Контакт шкіри та органів дихання з дизельним паливом або калібрувальною рідиною (ISO 4113), які є токсичними речовинами.
4. **Рухомі частини машин:** Обертові елементи приводу паливного насоса високого тиску (ТНВД) на стенді (муфти, шків).
5. **Пожежна безпека:** Паливо та тестова рідина є легкозаймистими речовинами.

4.2 Техніка безпеки при роботі з паливними системами високого тиску

Робота з апаратурою Common Rail вимагає суворого дотримання специфічних правил безпеки, оскільки гідравлічні травми є одними з найнебезпечніших у цій галузі.

1. **Категорична заборона контакту зі струменем:** Забороняється підносити руки або інші частини тіла до місць з'єднань паливопроводів та розпилювача форсунки під час роботи стенду. Струмінь рідини під тиском понад 100 бар здатен пробити шкірний покрив (ефект

«гідравлічної ін'єкції»), що призводить до некрозу тканин та зараження крові.

2. **Захисні екрани:** Всі випробування на герметичність та якість розпилювання повинні проводитися виключно за закритим захисним екраном (кожухом) стенду, виготовленим з ударостійкого полікарбонату.
3. **Скидання тиску:** Перед від'єднанням будь-якої трубки або форсунки необхідно зупинити привід стенду, вимкнути керування форсункою і почекати не менше 30-60 секунд до повного падіння тиску в рейці (контролюється за манометром).
4. **Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):** Дослідник зобов'язаний працювати у захисних окулярах, маслостійких рукавицях та спецодязі.

4.3 Електробезпека при експлуатації діагностичного обладнання

1. **Заземлення:** Металевий корпус діагностичного стенду та приладу CR-Tester має бути надійно заземлений. Опір контуру заземлення не повинен перевищувати 4 Ом.
2. **Ізоляція:** Перед початком робіт необхідно візуально перевірити цілісність ізоляції кабелів живлення та проводів керування форсунками (особливо в місцях контакту з паливом).
3. **Вологість:** Забороняється працювати з панеллю керування стендом мокрими руками або допускати потрапляння палива на електричні роз'єми.
4. **Дії при несправності:** При появі запаху горілої ізоляції, іскріння або відчуття електричного струму при дотику до корпусу, роботу слід негайно припинити і знеструмити обладнання.

4.4 Виробнича санітарія та гігієна праці

1. **Вентиляція:** Приміщення лабораторії повинно бути обладнане припливно-витяжною вентиляцією. Пари дизельного палива та тестової рідини при вдиханні можуть викликати запаморочення та

отруєння. Над зоною розпилу форсунки (якщо конструкція стенду відкрита) має бути встановлений місцевий відсос (витяжний зонт).

2. **Захист шкіри:** Тривалий контакт шкіри з нафтопродуктами викликає дерматити та екземи. Після завершення робіт руки необхідно вимити теплою водою з милом, використовуючи спеціальні очисні пасти. Забороняється мити руки в дизельному паливі або розчинниках.

4.5 Пожежна безпека

Оскільки дизельне паливо та калібрувальна рідина є горючими (ГР), дотримання правил пожежної безпеки є критичним.

1. **Засоби пожежогасіння:** Робоче місце повинно бути укомплектоване справним вогнегасником (порошковим типу ВП-5 або вуглекислотним типу ВВК-3.5), призначеним для гасіння пожеж класу В (рідкі речовини) та Е (електроустановок).
2. **Відкритий вогонь:** У приміщенні лабораторії категорично забороняється користуватися відкритим вогнем, курити, а також виконувати зварювальні роботи або роботи, що супроводжуються іскроутворенням (наприклад, різка металу "болгаркою") поблизу стенду.
3. **Утилізація ганчір'я:** Промаслене ганчір'я, використане для протирання форсунок та обладнання, повинно збиратися у спеціальні металеві ящики з кришками, що щільно закриваються, і вивозитися на утилізацію в кінці зміни. Самозаймання промасленого ганчір'я є однією з частих причин пожеж.
4. **Дії при пожежі:** У разі займання палива на стенді необхідно:
 - Знеструмити стенд (вимкнути рубильник).
 - Припинити подачу палива (перекрити кран бака, якщо є).
 - Розпочати гасіння первинними засобами (вогнегасником, піском, кошмою).
 - Викликати пожежну охорону за номером 101.

4.6 Моделювання потенційних травмонебезпечних ситуацій та алгоритми дій

Враховуючи специфіку роботи з системами надвисокого тиску (Common Rail), проведено моделювання трьох найбільш вірогідних аварійних сценаріїв. Для кожного сценарію розроблено алгоритм запобігання та дій у разі виникнення.

Ситуація №1: Гідравлічне ураження шкіри («Гідравлічна ін'єкція»)

- **Опис ситуації:** Під час перевірки форсунки на герметичність (Leak Test) при тиску 1350 бар оператор підносить руку до місця з'єднання паливної трубки з форсункою для перевірки наявності протікання ("на дотик"). Відбувається розрив мікроущільнення або вихід струменя через мікротріщину трубки.
- **Фізика процесу:** Тонкий струмінь рідини під тиском понад 100 бар діє як ріжучий інструмент. При тиску 1000+ бар рідина миттєво пробиває шкіру, м'які тканини та проникає глибоко в організм.
- **Медичні наслідки:** Дизельне паливо або калібрувальна рідина є токсичними. Потрапляння їх у кров та тканини викликає хімічний опік, швидкий некроз (відмирання) тканин та гангрену. Часто зовнішня рана виглядає як маленька точка, що вводить потерпілого в оману.
- **Алгоритм дій (Заборонено/Дозволено):**
 - *Категорично заборонено:* Накладати звичайний пластир, ігнорувати травму, намагатися видавити рідину самотійно.
 - *Необхідно:* негайно зупинити стенд, накласти стерильну пов'язку, транспортувати потерпілого до хірургічного відділення. Обов'язково повідомити лікаря, що травма викликана впорскуванням рідини під тиском (це вимагає специфічного хірургічного втручання, а не простого зашивання рани).

Ситуація №2: Розрив паливопроводу високого тиску («Ефект хлиста»)

- **Опис ситуації:** В режимі повного навантаження (VL) відбувається руйнування трубки високого тиску через втому металу або некоректне затягування штуцера.
- **Фізика процесу:** Звільнений кінець жорсткої сталевий трубки під дією реактивної сили струменя починає хаотично рухатися з великою швидкістю та амплітудою.
- **Наслідки:** Нанесення тяжких механічних травм, переломів кистей рук, ураження очей металевими частинами або струменем рідини.
- **Алгоритм запобігання:**
 - Використання захисного полікарбонатного кожуха стенду під час роботи.
 - Регулярна дефектовка різьбових з'єднань та трубок.
 - Надійне закріплення форсунки у стапелі.

Ситуація №3: Займання паливного туману

- **Опис ситуації:** При тестуванні якості розпилю (факела) утворюється дрібнодисперсна паливна суміш (аерозоль). Через поганий контакт у клеммах форсунки або несправність проводки стенду виникає електрична іскра.
- **Фізика процесу:** Об'ємний вибух паливно-повітряної суміші.
- **Наслідки:** Термічні опіки обличчя та рук оператора, пожежа в лабораторії.
- **Алгоритм дій:**
 - Стенд повинен бути обладнаний системою примусової вентиляції камери розпилення (витяжкою), що видаляє пари до досягнення ними вибухонебезпечної концентрації.
 - При виникненні загоряння — знеструмити стенд (аварійна кнопка "STOP"), застосувати вуглекислотний вогнегасник, не спрямовуючи струмінь безпосередньо на розлив рідини, щоб не розбризкати її.

Таблиця 4.1 – Карта ризиків та алгоритмів дій у надзвичайних ситуаціях

№ з/п	Назва небезпечної ситуації	Опис сценарію та фізика процесу	Можливі наслідки для здоров'я	Алгоритм дій (Профілактика та Реагування)
1	Гідравлічне ураження шкіри («Гідравлічна ін'єкція»)	Сценарій: Оператор перевіряє герметичність з'єднання "на дотик" при працюючому стенді. Відбувається прорив мікроструменя рідини. Фізика: Струмінь під тиском >100 бар діє як ріжучий інструмент, миттєво пробиваючи шкіру та м'які тканини.	Глибоке проникнення токсичної рідини в тканини, хімічний опік, некроз, загроза гангрені та ампутації кінцівки.	Профілактика: Категорична заборона торкатися трубок під тиском. Використання захисних екранів. Дії: Негайно зупинити стенд. Накласти стерильну пов'язку. Транспортувати до хірургії. Важливо: Повідомити лікаря про природу травми (впорскування під тиском).
2	Механічне травмування («Ефект хлиста»)	Сценарій: Руйнування трубки високого тиску або зрив штуцера під час тесту повного навантаження (VL). Фізика: Під дією реактивної сили струменя вільний кінець трубки починає хаотично рухатися з великою швидкістю.	Тупі травми, переломи кистей рук, пошкодження очей металевими частинами.	Профілактика: Жорстка фіксація трубок, регулярна дефектовка різьбових з'єднань, робота лише при закритому захисному кожусі. Дії: Натиснути аварійну кнопку "STOP". Не наближатися до стенду до повної зупинки двигуна.
3	Займання паливного аерозолі (Пожежа)	Сценарій: Утворення дрібнодисперсного туману при тестуванні розпилу + іскра від несправної проводки. Фізика: Об'ємне займання паливно-повітряної суміші.	Термічні опіки відкритих ділянок тіла, пожежа в лабораторії, пошкодження обладнання.	Профілактика: Справна система примусової вентиляції (витяжка) над зоною розпилу. Контроль ізоляції проводів. Дії: Знеструмити лабораторію. Використати вуглекислотний (ВВК) або порошковий вогнегасник.

Аналіз потенційних небезпек показує, що основним джерелом ризику є високий тиск робочої рідини. Забезпечення безпеки праці досягається суворим дотриманням технологічної дисципліни та використанням інженерних засобів захисту (захисні кожухи, вентиляція, заземлення).

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

5.1 Постановка задачі та вихідні дані

Метою даного розділу є оцінка економічної доцільності проведення діагностичних та ремонтних робіт паливної апаратури Common Rail. Економічний ефект досягається за рахунок двох факторів:

1. Зниження експлуатаційних витрат (зменшення витрати палива до заводських норм).
2. Запобігання аварійним відмовам двигуна (прогорання поршнів, вихід з ладу сажового фільтра), вартість усунення яких значно перевищує вартість діагностики.

Для розрахунку візьмемо типовий комерційний автомобіль (наприклад, Mercedes-Benz Sprinter 2.2 CDI), на якому встановлено досліджувані форсунки Bosch 0 445 110 190.

Вихідні дані для розрахунку (станом на 2025 рік):

- Середньорічний пробіг (L_{year}): 30 000 км.
- Вартість дизельного палива (P_{fuel}): 55 грн/л.
- Середня витрата палива (справний двигун): 10.0 л/100 км.
- Фактична витрата з несправними форсунками (Зразок №3): 11.5 л/100 км (приріст +1.5 л через "перелив" та погіршення ККД).
- Вартість нової форсунки (C_{new}): 12 000 грн/шт.
- Вартість повного ремонту форсунки (C_{repair}): 3500 грн/шт (заміна розпилювача та мультиплікатора + регулювання).
- Вартість комплексної діагностики (C_{diag}): 400 грн/шт.

5.2 Розрахунок економічних втрат від експлуатації несправних форсунок

Визначимо річні фінансові втрати власника автомобіля внаслідок перевитрати палива через знос розпилювачів (ситуація, змодельована на Зразку №3).

Річна перевитрата палива (ΔV_{fuel}) розраховується за формулою:

$$\Delta V_{fuel} = \frac{L_{year}}{100} \cdot (V_{fact} - V_{norm})$$

де:

V_{fact} — фактична витрата (11.5 л);

V_{norm} — нормативна витрата (10.0 л).

$$\Delta V_{fuel} = \frac{30000}{100} \cdot (11.5 - 10.0) = 300 \cdot 1.5 = 450 \text{ літрів/рік}$$

Грошові втрати (C_{loss}) становлять:

$$C_{loss} = \Delta V_{fuel} \cdot P_{fuel}$$

$$C_{loss} = 450 \cdot 55 = 24\,750 \text{ грн/рік}$$

Лише на паливі власник автомобіля з несправними форсунками втрачає майже 25 тисяч гривень на рік, що еквівалентно вартості двох нових форсунок.

5.3 Порівняння вартості відновлення та купівлі нових вузлів

Розглянемо ситуацію, коли діагностика виявила несправність усіх 4-х форсунок. Порівняємо витрати на два варіанти вирішення проблеми.

Варіант А: Купівля нових форсунок

$$C_{total_new} = 4 \cdot C_{new} + C_{install}$$

(Вартість монтажу приймемо 1000 грн за комплект).

$$C_{total_new} = 4 \cdot 12000 + 1000 = 49\,000 \text{ грн}$$

Варіант Б: Ремонт (реставрація) форсунок

Цей варіант передбачає заміну зношених елементів (мультиплікатора та розпилювача), регулювання на стенді та присвоєння нового коду корекції.

$$C_{total_repair} = 4 \cdot (C_{repair} + C_{diag}) + C_{install}$$

$$C_{total_repair} = 4 \cdot (3500 + 400) + 1000 = 4 \cdot 3900 + 1000 = 16\,600 \text{ грн}$$

Таблиця 5.1 – Калькуляція вартості капітального ремонту однієї електромагнітної форсунки Bosch CR

№ з/п	Стаття витрат	Характеристика / Примітка	Вартість, грн	Частка у структурі, %
1	Запасні частини		3 000	76.9%

1.1	Клапан-мультиплікатор	Bosch F 00V C01 ... (Оригінал)	1 500	
1.2	Розпилювач	Bosch DLLA 148 P ... (Оригінал)	1 200	
1.3	Ремкомплект ущільнень	Кільце ущільнювальне, тефлонова шайба	300	
2	Виробничі витрати		900	23.1%
2.1	Робота фахівця	Розбирання, дефектовка, ультразвукова мийка, складання, регулювання ходу анкера (Step 3)	600	
2.2	Стендові випробування	Електроенергія, амортизація стенду, використання тестової рідини, кодування (ІМА-код)	300	
РАЗОМ	Повна вартість відновлення		3 900	100%

Економічна ефективність ремонту (E_{repair}):

$$E_{repair} = C_{total_new} - C_{total_repair}$$

$$E_{repair} = 49000 - 16600 = 32\,400 \text{ грн}$$

5.4 Розрахунок терміну окупності витрат на ремонт

Визначимо, за який пробіг окупляться витрати на ремонт форсунок (16 600 грн) виключно за рахунок економії палива.

Вартість 1 км пробігу на несправному авто вища на:

$$\Delta C_{km} = \frac{1.5 \text{ л}}{100 \text{ км}} \cdot 55 \text{ грн} = 0.825 \text{ грн/км}$$

Термін окупності в кілометрах пробігу ($L_{payback}$):

$$L_{payback} = \frac{C_{total_repair}}{\Delta C_{km}}$$

$$L_{payback} = \frac{16600}{0.825} \approx 20\,121 \text{ км}$$

У часовому вимірі (при річному пробігу 30 000 км) це становить:

$$T_{payback} = \frac{20121}{30000} \cdot 12 \approx 8 \text{ місяців}$$

Таблиця 5.2 – Зведені показники економічної ефективності діагностики та ремонту форсунок

№ з/п	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення
-------	------------------------	----------------	----------

1	Поточні витрати		
1.1	Річна перевитрата палива через несправність форсунок	літрів	450
1.2	Грошовий еквівалент витрат на паливі (за рік)	грн	24 750
2	Капітальні витрати на усунення несправності (4 шт.)		
2.1	Варіант А: Придбання нових форсунок (+ монтаж)	грн	49 000
2.2	Варіант Б: Повний ремонт форсунок (+ монтаж та діагностика)	грн	16 600
3	Економічний ефект		
3.1	Чиста економія (Варіант А мінус Варіант Б)	грн	32 400
3.2	Відносна економія коштів	%	66%
4	Окупність		
4.1	Термін окупності витрат на ремонт (за пробігом)	км	20 121
4.2	Термін окупності витрат на ремонт (за часом*)	міс.	8

5.5 Оцінка "ціни ризику"

Окрім прямих витрат, необхідно врахувати запобігання аварійним поломкам.

Експлуатація форсунки зі значним "переливом" (Зразок №3) або порушеним факелом розпилу призводить до:

1. Прогорання поршня. Вартість капітального ремонту двигуна (гільзування, нові поршні) — від 60 000 грн.
2. Вихід з ладу сажового фільтра (DPF). Через надлишок сажі фільтр забивається за 5-10 тис. км. Вартість нового фільтра — від 40 000 грн.

Сумарний економічний ефект (E_{total}) з урахуванням мінімізації ризиків можна описати як суму економії на паливі та вартості відверненого ремонту:

$$E_{total} = E_{repair} + P_{risk} \cdot C_{major_repair}$$

де P_{risk} — ймовірність поломки (яка для несправних форсунок наближається до 100% протягом року експлуатації).

5.6 Висновки по розділу

1. Експлуатація автомобіля з несправними форсунками є економічно недоцільною: щорічні втрати лише на пальному становлять близько 25 000 грн для комерційного транспорту.
2. Відновлення (ремонт) форсунок є найбільш ефективним методом обслуговування, дозволяючи заощадити 32 400 грн порівняно з купівлею нових агрегатів при відновленні ресурсу на 90-95%.
3. Термін окупності витрат на повний ремонт комплекту форсунок становить близько 20 тис. км пробігу, що для комерційного транспорту складає менше року експлуатації.
4. Своєчасна діагностика дозволяє запобігти критичним поломкам двигуна, вартість усунення яких у 3-4 рази перевищує вартість ремонту паливної апаратури.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності експлуатації дизельних двигунів шляхом дослідження впливу технічного стану паливних форсунок системи Common Rail на їх вихідні характеристики.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що основними причинами виходу з ладу електромагнітних форсунок Bosch є абразивний знос сідла клапана-мультиплікатора (що призводить до втрати гідрощільності) та ерозійний знос/закоксовування розпилювача (що порушує якість сумішоутворення). Ці дефекти суттєво змінюють гідравлічні характеристики впорскування, знижуючи ККД двигуна.
2. Обґрунтовано та апробовано методику стендових випробувань із використанням приладу-імітатора сигналів ЕБУ (CR-Tester) та уніфікованого тест-плану. Доведено, що комплексна оцінка стану форсунок можлива лише при перевірці у п'яти контрольних точках: Leak Test (герметичність), VL (повне навантаження), EM (середні навантаження), LL (холостий хід) та VE (попереднє впорскування).
3. Стендові випробування показали чітку кореляцію між типом дефекту та відхиленням параметрів:
 - При зносі мультиплікатора об'єм зворотного зливу («зворотки») зріс до 88.4 мм³/цикл при нормі до 45.0 мм³/цикл (+96%), що робить неможливим створення пускового тиску в рейці.
 - При дефекті розпилювача зафіксовано збільшення циклової подачі на режимі повного навантаження до 69.8 мм³/цикл (+9% від норми), що є причиною підвищеної димності та локальних перегрівів камери згоряння.
4. Експериментально підтверджено, що навіть одна несправна форсунка порушує рівномірність роботи двигуна (особливо на холостому ході, де подача знизилася до 2.1 мм³ у зразка з дефектом клапана). Це призводить

до підвищеної вібрації та прискореного зносу кривошипно-шатунного механізму. Експрес-діагностика методом вимірювання зворотного зливу на працюючому двигуні підтвердила свою ефективність для виявлення грубих гідравлічних несправностей.

5. Проведено аналіз небезпечних факторів при роботі з системами високого тиску (до 1350 бар). Розроблено карту ризиків та алгоритми дій у надзвичайних ситуаціях, зокрема при загрозі гідравлічного ураження шкіри струменем палива.
6. Техніко-економічне обґрунтування довело доцільність відновлення форсунок.
 - Експлуатація автомобіля з несправними форсунками призводить до річних втрат на пальному у розмірі 24 750 грн.
 - Відновлення комплекту форсунок дозволяє заощадити 32 400 грн (або 66%) у порівнянні з купівлею нових вузлів.
 - Термін окупності витрат на ремонт складає близько 20 тис. км пробігу.

Таким чином, своєчасна інструментальна діагностика та регламентний ремонт форсунок є необхідною умовою забезпечення паспортних показників надійності, екологічності та економічності сучасного дизельного двигуна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>
2. 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.
3. Denton T. Advanced Automotive Fault Diagnosis. 5th ed. New York: Routledge, 2021. 412 pp.
4. Halderman J.D. Automotive technology. Boston: Prentice Hall, 2011. Electronic Book.
5. Kiencke U., Nielsen L. Automotive Control Systems. 2nd ed. Springer-Verlag, 2005. 512 pp.
6. 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
7. Robert Bosch GmbH. Bosch Automotive Electrics. 5th ed. Plochingen: Springer Vieweg, 2007. 530 pp.
8. Сирота В.І. Основи конструкції автомобілів. Київ: Арістей, 2006. 280 с.
9. Sean B. Modern Diesel Technology: Diesel Engines. Delmar: Cengage Learning, 2010. 339 pp.
10. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є. Автомобільні двигуни. Київ: Арістей, 2005. 476 с.
11. Tschöke H., Mollenhauer K. Handbook of Diesel Engines. Springer, 2010. 636 pp.
12. Delphi. COMMON RAIL MANUAL. PRINCIPLES OF OPERATION. Delphi France SAS, 2007. 83 pp.

- 13.Мазепа С.С., Куцик А.С. Електрообладнання автомобіля. Львів: Видавництво НУЛП, 2004. 168 с.
- 14.McCord K. Automotive Diagnostic Systems: Understanding OBD I and OBD II. CarTech Inc, 2011. 144 pp.
- 15.COMMON RAIL INJECTOR - ELECTROMAGNETIC (CRIE) - Autoditex, доступ отримано 7 квітня, 2025, <https://autoditex.com/page/common-rail-injector---electromagnetic-crie-25-1.html>
- 16.Fuel Injector Cavitation: How It Hurts Spray Quality - Samperio Turbo Rebuild, доступ отримано 25 квітня, 2025, <https://samperioturborebuild.net/fuel-injector-cavitation-how-it-hurts-spray-quality/>
- 17.Diesel Fuel-Injection System Common Rail: Bosch Technical Instruction. Robert Bosch GmbH, 2005. 94 pp.
- 18.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>.
- 19.Link Between Cavitation Development and Erosion Damage in Diesel Injector Nozzles 2007-01-0246 - SAE International, доступ отримано 10 жовтня, 2025, <https://www.sae.org/papers/link-cavitation-development-erosion-damage-diesel-injector-nozzles-2007-01-0246>
- 20.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/>
- 21.Degradation of Piezoelectric Materials - NPL Publications, доступ отримано 20 липня, 2025, <https://eprintspublications.npl.co.uk/1085/1/cmmt148.pdf>
- 22.Simulation of transient effects in a fuel injector nozzle using real-fluid thermodynamic closure - City Research Online, доступ отримано 29 серпня, 2025, <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/34294/1/1-s2.0-S2666352X21000157-mainext.pdf>

23. Bosch Injector Testing: Critical Guide 2025 - RPM Diesel, доступ отримано 27 листопада, 2025, <https://rpmdiesel.com/bosch-diesel-injectors/bosch-injector-testing/>
24. Городецький І.М., Пістун І.П., Березовецький А.П. Охорона праці на автомобільному транспорті: навчальний посібник. [Текст] / Львів: Тріада плюс, 2009. 320 с.