

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Вплив технології монтажу форсунок на техніко-економічні
характеристики двигуна, оснащеного газобалонним обладнанням»**

Виконав: студент VI курсу групи Ат-61

Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Віталій Борух

(ім'я та прізвище)

Керівник: Юрій Габрієль

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 629.113

Борух Віталій Сергійович . «Вплив технології монтажу форсунок на техніко-економічні характеристики двигуна, оснащеного газобалонним обладнанням»

//Кваліфікаційна робота. – Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025. – 66 с.

В роботі проведено теоретичний аналіз процесів сумішоутворення в двигунах з ГБО 4-го покоління. Досліджено фізичну природу явища транспортного запізнення подачі газу, викликаного стисливістю палива в сполучних магістралях.

Експериментальним шляхом встановлено залежність між довжиною рукавів низького тиску, просторовою орієнтацією форсунок та показниками паливної корекції (STFT). Доведено, що недотримання технологічних вимог монтажу призводить до зниження динамічних характеристик автомобіля на 10–20% та зростання експлуатаційної витрати палива.

Виконано техніко-економічний розрахунок за методикою сукупної вартості володіння (ТСО), який показав, що річні фінансові втрати внаслідок некоректного монтажу складають понад 19 тис. грн. Розроблено практичні рекомендації щодо встановлення газових форсунок для двигунів зі змінною геометрією впускного колектора.

Рис. 11, табл. 5, бібліогр. джерел 22.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
ВСТУП	7
1 ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ЕЛЕМЕНТИ ГАЗОБАЛОННОГО ОБЛАДНАННЯ (ГБО)	9
1.1 Принцип роботи системи ГБО на транспортних засобах	9
1.2 Газовий балон	10
1.3 Запірно-запобіжна арматура (Мультиклапан)	11
1.3.1 Технологічні вимоги до монтажу балона та арматури	13
1.4 Конструкція та технологія монтажу редуктора-випарника	14
1.4.1 Технологічні вимоги до монтажу	15
1.5 Конструктивні особливості, класифікація та параметри роботи газових форсунок	16
1.5.1 Технологічні вимоги до монтажу	19
1.6 Призначення та вимоги до газових штуцерів-розпилувачів	20
1.6.1 Технологічні вимоги до монтажу	21
1.7 Архітектура, алгоритми роботи та вимоги до інсталяції електронного блоку керування ГБО	23
1.7.1 Технологічні вимоги до монтажу ЕБК та проводки	25
2 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ СУМІШОУТВОРЕННЯ В ДВИГУНАХ З ГБО	27
2.1 Особливості робочого процесу ДВЗ при конвертації на зріджений нафтовий газ (LPG)	27
2.2 Хімія процесу згоряння пропан-бутанової суміші	29
2.2.1 Рівняння реакцій окислення	29
2.2.2 Аналіз стехіометрії та потреба в повітрі	29
2.2.3 Молярна зміна об'єму (коефіцієнт молекулярної зміни)	30

	5
2.2.4 Теплотворна здатність	30
2.3 Фізика течії газу у впускному тракті та явище транспортного запізнення	31
2.3.1 Стисливість газу та ефект «Пневматичної пружини»	31
2.3.2 Структура часової затримки	32
2.3.3 Вплив фазового зсуву на сумішоутворення	34
2.3.4 Резонансні явища у патрубках	34
2.4 Методика розрахунку прохідного перерізу дозуючих штуцерів ...	35
2.4.1 Емпіричний метод (для інженерних розрахунків)	35
2.4.2 Теоретичний метод (гідрогазодинамічний розрахунок)	36
2.5 Розрахунок діаметра газових жиклерів для двигуна X20XEV	38
2.5.1 Емпіричний розрахунок (Метод підбору)	39
2.5.2 Теоретичний (гідрогазодинамічний) розрахунок	39
2.5.3 Аналіз результатів та корекція	40
2.6 Висновок по розділу.	40
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	42
3.1 Методика проведення експериментальних досліджень	42
3.2 Початкові налаштування системи	43
3.3 Експериментальні дослідження	44
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	49
4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів	49
4.2 Техніка безпеки при монтажі та обслуговуванні ГБО	50
4.3 Заходи пожежної безпеки	51
4.4 Електробезпека	51
4.5 Виробнича санітарія та гігієна праці	52

	6
4.6 Надання першої допомоги.....	52
4.7 Моделювання та аналіз потенційних травмонебезпечних ситуацій	52
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕКОМЕНДОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ МОНТАЖУ ГБО..	56
5.1 Загальні положення та методика оцінки економічної ефективності.....	56
5.2 Вихідні дані для проведення розрахунків	57
5.3 Розрахунок прямих втрат від перевитрати палива	57
5.4 Оцінка непрямих експлуатаційних збитків та ризиків.....	58
5.5 Розрахунок ефективності капіталовкладень в оптимізацію системи	59
5.6 Висновки до економічного розділу	60
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	64

ВСТУП

У сучасних умовах експлуатації колісних транспортних засобів питання зниження експлуатаційних витрат та зменшення шкідливого впливу на довкілля набуває першочергового значення. Постійне зростання цін на нафтові палива (бензин) стимулює масовий перехід автовласників на альтернативні види палива, серед яких найбільш поширеним є зріджений нафтовий газ (пропан-бутан) [1].

Однак, просте переобладнання автомобіля на газобалонне обладнання (ГБО) 4-го покоління і вище не гарантує автоматичного досягнення оптимальних показників. Ключовою проблемою стає якість та технологія монтажу компонентів, зокрема газових форсунок та місць врізки штуцерів у впускний колектор. Некоректний монтаж (надмірна довжина рукавів, неправильний кут свердління, невдале розташування відносно впускних клапанів) призводить до запізнення впорскування, порушення сумішоутворення та втрати потужності.

Це, в свою чергу, нівелює економічний ефект від встановлення ГБО через підвищену витрату газу та може призвести до прискореного зносу деталей циліндро-поршневої групи. Тому дослідження впливу технологічних нюансів монтажу на вихідні характеристики двигуна є вкрай актуальним завданням.

Метою роботи є підвищення техніко-економічних характеристик двигуна з іскровим запалюванням, що працює на зрідженому газі, шляхом оптимізації технологічних параметрів монтажу газових форсунок та системи подачі палива у впускний тракт.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Провести аналіз сучасного стану систем ГБО та впливу їх компонування на робочий процес двигуна.
- Дослідити фізичні процеси протікання газу на ділянці «форсунка – впускний клапан» та вплив довжини магістралей на фазовий зсув подачі палива.
- Експериментально визначити залежність потужнісних та економічних показників двигуна від місця врізки штуцерів (відстань до клапана) та кута їх нахилу.

- Провести порівняльний аналіз динамічних характеристик автомобіля при різних схемах монтажу.
- Розрахувати техніко-економічну ефективність запропонованих рекомендацій щодо монтажу для типового легкового автомобіля.

Об'єктом дослідження є робочий процес автомобільного двигуна, переобладнаного для роботи на зрідженому нафтовому газі.

Предметом дослідження є закономірності зміни техніко-економічних показників двигуна (потужність, крутний момент, витрата палива) в залежності від геометричних та технологічних параметрів встановлення газових форсунок.

1 ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ЕЛЕМЕНТИ ГАЗОБАЛОННОГО ОБЛАДНАННЯ (ГБО)

1.1 Принцип роботи системи ГБО на транспортних засобах

Функціонування газобалонного обладнання базується на використанні зрідженої суміші пропан-бутану як альтернативного пального. Паливо зберігається в резервуарі під тиском близько 10 бар (у зимовий період тиск може знижуватися до 3 бар). Через мультиклапан та магістраль (мідну або термопластикову) газ надходить через електромагнітний клапан до редуктора-випарника (рис.1.1) [2].



1 – Електронний блок керування; 2 – газові форсунки; 3 – клапан подачі газу; 4 – редуктор; 5 – газовий фільтр; 6 – сенсор тиску газу; 7 – перемикач; 8 – балон із мультиклапаном.

Рисунок 1.1 – Типове розташування елементів ГБО на автомобілі.

Основна функція редуктора — зниження тиску до робочих показників (~1,5 бар) та фазовий перехід палива з рідкого стану в газоподібний, що забезпечується підігрівом за рахунок циркуляції охолоджувальної рідини

двигуна. Далі парова фаза газу проходить тонку очистку фільтром і розподіляється газовими форсунками, врізаними в колектор поруч із бензиновими.

Електронне керування здійснюється контролером (наприклад, STAG), який працює за принципом «Master-Slave» відносно штатного бензинового ЕБУ. Газовий блок зчитує час відкриття бензинових інжекторів, вносить необхідні корекції та синхронно активує газові форсунки. Це дозволяє зберегти заводські алгоритми керування двигуном, включаючи OBD-діагностику та контроль екологічних норм, уникаючи конфліктів між паливними системами [3].

1.2 Газовий балон

Газовий балон є посудиною, що працює під тиском, і призначений для зберігання пропан-бутанової суміші у рідкій фазі та подачі її парової фази (або рідкої, залежно від системи) до витратної магістралі.



Рисунок 1.2 – Типи балонів для автомобілів. (а – циліндричний, б - торіодальний).

Балони характеризуються робочим об'ємом, що вказується на ньому в літрах. Залежно від компонування автомобіля, застосовуються два основні типи резервуарів:

Циліндричні балони: класична конструкція у формі витягнутого циліндра зі сферичними днищами. Встановлюються переважно за спинкою заднього сидіння або вздовж борту вантажних автомобілів. Мають найбільший корисний об'єм (від 40 до 200 л).

Тороїдальні балони (Toroidal): мають форму тора ("бублика"), що дозволяє монтувати їх у нішу запасного колеса. Поділяються на:

- *Внутрішні:* встановлюються всередині багажника. Горловина та арматура розташовані всередині кільця.
- *Зовнішні (повнотілі):* встановлюються під днищем автомобіля (замість «запаски» зовні). Мають посилений корпус та горловину, винесену на зовнішній периметр або захищену бронепластиною.

Балони виготовляються з легованої листової сталі товщиною 2.5–4.0 мм методом глибокої витяжки з наступним зварюванням двох половин. Зварні шви проходять рентгенографічний контроль. Основні вимоги до його умов експлуатації [4]:

- Робочий тиск (P_{work}): 1.6 МПа (16 атм).
- Випробувальний тиск (P_{test}): 3.0 МПа (30 атм).
- Тиск руйнування: не менше 6.7 МПа (67 атм).

Критично важливою конструктивною вимогою є наявність «повітряної подушки» об'ємом не менше 15-20% від загальної ємності. Зріджений газ має високий коефіцієнт об'ємного розширення. При нагріванні повного балона (наприклад, автомобіль стоїть на сонці) рідина розширюється, і якщо немає вільного простору, тиск миттєво зростає до критичних значень, що може призвести до розриву судини. За дотримання цього правила відповідає мультиклапан.

1.3 Запірно-запобіжна арматура (Мультиклапан)

Мультиклапан (Multivalve) — це складний механічний вузол, що монтується на горловині балона і об'єднує в собі функції заправки, витрати палива, вимірювання рівня та забезпечення безпеки (рис.1.3).

Сучасні мультиклапани повинні відповідати стандарту ЄЕК ООН 67R-01 (Клас А або Євро-стандарт) [2].



Рисунок 1.3 – Мультиклапан із набором для його монтажу.

Функціональні компоненти мультиклапана:

1. Заправний клапан із відсікачем (80% Stop Valve).

Механізм поплавкового типу. При досягненні рівнем рідкого газу позначки 80% об'єму, поплавок піднімається і через важіль механічно перекриває вхідний канал. Це унеможливорює подальшу заправку, зберігаючи парову подушку безпеки.

2. Витратний клапан (Service Valve).

Забезпечує подачу газу в магістраль до редуктора. Оснащується ручним вентилям для перекриття подачі при ремонтних роботах або тривалій стоянці.

3. Швидкісний клапан (Excess Flow Valve).

Призначений для блокування витоку газу при обриві магістралі. Якщо витрата газу різко перевищує номінальну (наприклад, при ДТП перебито мідну трубку), клапан під дією перепаду тиску миттєво закривається ("захлопується").

4. Аварійний клапан скидання тиску (PRV — Pressure Relief Valve).

Найважливіший елемент безпеки. Це пружинний клапан, налаштований на тиск $27 \text{ бар} \pm 1 \text{ бар}$.

Принцип дії: якщо через зовнішнє нагрівання (пожежа) тиск у балоні перевищує 27 атм, клапан відкривається і порційно стравлює газ в атмосферу (через вентиляцію на вулицю), запобігаючи вибуху балона.

5. Електромагнітний запірний клапан (Solenoid Valve).

Вимога сучасних регламентів безпеки. Він перекриває вихід газу з балона при вимкненні запалювання або зупинці двигуна. Це гарантує, що газова магістраль під днищем авто не знаходиться під тиском, коли машина стоїть на парковці.

6. Протипожежний запобіжник (PRD - Pressure Relief Device).

Вставка з легкоплавкого сплаву, яка плавиться при температурі $\approx 120^{\circ}\text{C}$. У випадку пожежі, коли тиск ще не досяг 27 бар, але температура корпусу критична, цей канал відкривається для швидкого скидання газу, щоб запобігти термічному руйнуванню металу балона (ефект BLEVE).

1.3.1 Технологічні вимоги до монтажу балона та арматури

1. Вентиляційна камера.

При встановленні циліндричного або внутрішнього тороїдального балона в багажному відділенні, мультиклапан обов'язково накривається герметичною кришкою (газонепроникний кожух). Від кожуха назовні автомобіля (через підлогу) виводяться два гофровані патрубки (сапуни).

У разі спрацювання аварійного клапана (PRV) або мікровитоку на з'єднаннях, газ виводиться за межі кузова, а не накопичується в багажнику [4].

2. Орієнтація поплавка (Кут нахилу).

Мультиклапани розрізняються за кутом встановлення (0° , 30° , 90°) та висотою балона (Н.200, Н.220 тощо).

Для циліндричних балонів стандартний кут нахилу горловини — 30° .

Для тороїдальних внутрішніх — 30° .

Для тороїдальних зовнішніх — 0° .

Встановлення мультиклапана 30° на балон з горловиною 0° призведе до неправильних показань рівня палива та, що критичніше, до неправильного спрацювання відсікача (балон заправиться на 95% або навпаки на 50%).

3. Заправна магістраль (ВЗП).

Заправний пристрій повинен бути жорстко закріплений на кузові або кронштейні фаркопа. Монтаж на пластиковий бампер без підсилювальних пластин заборонений, оскільки вага заправного пістолета може виломати кріплення. Використовується термопластичова або мідна трубка діаметром 8 мм.

1.4 Конструкція та технологія монтажу редуктора-випарника

Редуктор-випарник (Reducer-Vaporizer) є комбінованим вузлом системи ГБО 4-го покоління, який виконує дві критичні функції:

Термодинамічну: фазове перетворення пропан-бутанової суміші з рідкого стану в газоподібний за рахунок підведення зовнішньої теплової енергії.

Пневмомеханічну: зниження тиску газу з магістрального (0.2–1.6 МПа) до стабільного робочого тиску (0.09–0.15 МПа) та підтримання його на заданому рівні незалежно від навантаження двигуна.

Процес редукування газу супроводжується його розширенням (дроселюванням). Згідно з ефектом Джоуля-Томсона, адіабатичне розширення реального газу призводить до різкого зниження його температури. Крім того, випаровування рідини вимагає затрат значної кількості прихованої теплоти пароутворення [5].



Рисунок 1.4 – Редуктор-випарник Tomasetto Alaska.

Якщо не компенсувати ці втрати тепла, температура корпусу редуктора миттєво опуститься нижче 0°C, що призведе до замерзання конденсату вологи з повітря та кристалізації парафінових фракцій газу. Це викликає втрату еластичності гумових мембран і повну зупинку подачі палива.

Саме тому редуктор інтегрується в систему охолодження двигуна, використовуючи антифриз як теплоносіє.

Сучасні редуктори 4-го покоління (наприклад, КМЕ, Tomasetto, Shark) є одноступінчастими регуляторами мембранно-важільного або голчастого типу.

Основні елементи:

1. Камера обігріву (Water Jacket): лабіринт каналів, по яких циркулює гаряча охолоджуюча рідина.
2. Камера випаровування: порожнина, де рідкий газ контактує з нагрітими стінками теплообмінника.
3. Вузол редукування: складається з еластичної мембрани, пружини та клапана. Принцип роботи полягає у тому, що пружина тисне на мембрану, відкриваючи клапан подачі газу. Тиск газу, що надходить, тисне на мембрану у зворотний бік, намагаючись закрити клапан. Робочий тиск встановлюється балансом сил пружини та тиску газу.
4. Вакуумна камера компенсації: З'єднана шлангом із впускним колектором.

У системах 4-го покоління тиск газу не є константою відносно атмосфери, а є диференційним ($P = \text{const}$). Редуктор автоматично змінює тиск на виході залежно від розрідження в колекторі. На холостому ходу (розрідження велике) тиск газу знижується, щоб форсункам було легше дозувати малі порції. При повному дроселі тиск газу зростає до номіналу, щоб забезпечити максимальну потужність.

1.4.1 Технологічні вимоги до монтажу

Якість роботи всієї системи на 50% залежить саме від правильності встановлення редуктора.

Гідравлічне підключення (врізка в систему охолодження) відбувається тільки паралельно радіатору обігрівача салону (підки). При послідовному підключенні, внаслідок того, що канали редуктора мають менший переріз, ніж патрубки підки, створюється гідравлічний опір, знижуючи ефективність обігріву салону взимку та погіршуючи охолодження ГБЦ влітку [5].

Редуктор також повинен бути встановлений нижче верхнього рівня охолоджуючої рідини в розширювальному бачку. Встановлення вище цього рівня гарантовано призводить до утворення повітряної пробки («заповітрявання») в системі охолодження. Повітря, на відміну від рідини, погано передає тепло, що призводить до обмерзання редуктора та перемикання системи на бензин під навантаженням.

Площина мембрани редуктора повинна бути розташована паралельно поздовжній осі автомобіля, оскільки мембрана має власну масу, а на ній часто закріплене коромисло клапана. Якщо встановити редуктор перпендикулярно руху (мембраною вперед/назад), то при різкому гальмуванні або розгоні на мембрану діятимуть сили інерції.

При виборі редуктора необхідний запас потужності +20...30% від номіналу двигуна.

Якщо редуктор підібраний "впритул", то при тривалому прискоренні (наприклад, обгін на трасі) відбуваються два негативні явища: просадка тиску (Pressure Drop) – редуктор фізично не встигає пропускати потрібний об'єм газу, тиск падає, суміш бідніє; термопросадка – редуктор не встигає прогрівати великий потік газу, температура газу на виході падає. Оскільки густина холодного газу вища, ніж теплого, ЕБК отримує неправильні дані, що призводить до похибок у сумішоутворенні.

Стабільність вихідного тиску редуктора є фундаментом для коректної роботи газових форсунок. Навіть ідеально підібрані форсунки не зможуть забезпечити правильне дозування палива, якщо редуктор допускає коливання диференційного тиску (понад 0.2 бар) або не забезпечує стабільної температури газу внаслідок помилок монтажу в контур охолодження.

1.5 Конструктивні особливості, класифікація та параметри роботи газових форсунок

Газова форсунка (Gas Injector) в системах 4-го покоління є виконавчим електромагнітним пристроєм, призначеним для дозованої подачі парової фази газу у впускний колектор. На відміну від бензинових аналогів, які працюють з нестисливою рідиною під тиском 3-4 бар, газові форсунки оперують стисливим середовищем під відносно низьким диференційним тиском (0.8–1.5 бар). Це накладає специфічні вимоги до їх пропускної здатності (перерізу сідла) та швидкодії [6].

З точки зору конструкції та кінематики рухомих частин, сучасні газові форсунки поділяються на дві основні групи (рис.1.5) [7].



а)

б)

Рисунок 1.5 – Газові форсунки : а) – штокового типу (Valtek Type 30);
б) – голчастого типу (Barracuda в розрізі).

1. Форсунки штокового (плунжерного) типу.

Типові представники: Valtek Type 30, OMVL, Rail IG1.

Запірним елементом у даних форсунках є масивний металевий циліндр (шток/плунжер) з гумовим демпфером на торці. Шток рухається всередині металевої гільзи під дією електромагнітного поля котушки.

До основних недоліків можна віднести:

Висока інерційність: через велику масу штока час відкриття становить 3.5–4.5 мс.

Температурна залежність: в'язкість маслянистих відкладень (газового конденсату) на стінках гільзи сильно залежить від температури, що змінює швидкість руху штока взимку та влітку.

Чутливість до орієнтації: при горизонтальному монтажі важкий шток під дією гравітації "протирає" гільзу з одного боку (еліпсний знос), що призводить до заклинювання та зміни продуктивності.

2. Форсунки мембранного та голчастого типу.

Типові представники: Keihin, Barracuda, Hana, BRC.

Конструкція аналогічна бензиновим форсункам. Запірним елементом є легка голка або диск, з'єднаний з якорем. Тертя ковзання мінімізоване (використовуються фторопластові покриття або безконтактна підвіска).

Переваги таких форсунок:

Висока швидкодія: час відкриття 1.7–2.0 мс (вдвічі швидше за штокові).

Лінійність: Стабільне дозування навіть на малих часах впорскування.

Ресурс: понад 100-150 тис. км пробігу без необхідності тарування.

В табл.1.1 наведено порівняння типових характеристик газових форсунок штокового та голчастого типу.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик газових форсунок.

Параметр	Valtek Type 30 (Бюджет)	Barracuda (Преміум)	Вплив на двигун
Опір котушки	3 Ом	1.9 Ом	Навантаження на ключі ЕБК
Час відкриття	~3.3 - 3.7 мс	~1.9 мс	Стабільність ХХ, точність суміші
Час закриття	~2.2 мс	~1.2 мс	Дозування на високих обертах
Ресурс	20-40 тис. км	>100 тис. км	Економічна ефективність
Чутливість до монтажу	Висока	Середня	Предмет нашого дослідження

Для оцінки якості форсунки та її впливу на двигун використовуються наступні характеристики: час відкриття/закриття, статична продуктивність, електричний опір котушки.

Час відкриття/закриття ($t_{\text{open}} / t_{\text{close}}$) – це час реакції на електричний імпульс. Для стабільної роботи двигуна на холостому ходу (де час бензинового впорскування може бути 2.0–2.5 мс) газова форсунка повинна встигати фізично відкритися і закритися.

Якщо час бензинового впорскування менший за фізичний мінімум газової форсунки, виникає нестабільність роботи, а ЕБК фіксує пропуски запалювання.

Статична продуктивність (Static Flow) – це максимальний об'єм газу, який форсунка пропускає у повністю відкритому стані при заданому тиску. Регулюється діаметром вихідного жиклера (дюзи).

Електричний опір котушки (Impedance) впливає на стратегію роботи газових форсунок. Більшість газових форсунок є низькоомними (1–3 Ом). Для керування ними використовується алгоритм Peak & Hold (пік і утримання):

Peak: Подача повного струму (до 4А) для швидкого зриву штока з місця.

Hold: Зниження струму (ШІМ-модуляція) для утримання у відкритому стані, щоб не перегріти обмотку.

У процесі експлуатації форсунки піддаються інтенсивному ударному навантаженню (частота відкриття на 3000 об/хв складає 25 разів на секунду). Це може призвести до розклепування демпфера, тобто гумовий відбійник на торці штока з часом розбивається, що призводить до збільшення ходу штока. Внаслідок цього збільшується порція газу, що подається при цьому суміш стає збагаченою та зростає витрата палива. Саме тому штокові форсунки потребують періодичного калібрування (регулювання ходу штока мікрометром) [8].

Форсунка дозує газ дискретно (порціями). Довгий шланг між форсункою і колектором працює як інтегратор, "розмазуючи" чіткий імпульс подачі газу в часі. Це призводить до того, що двигун отримує паливо із запізненням по фазі газорозподілу.

1.5.1 Технологічні вимоги до монтажу

На основі конструктивних особливостей формулюються суворі правила монтажу:

Орієнтація.

- *Штокові (Valtek):* Тільки вертикально (допуск $\pm 15^\circ$). Це забезпечує рівномірний знос гільзи та стікання важких фракцій (парафінів) вниз у колектор, запобігаючи "залипанню" штока вранці.
- *Голчасті (Hana):* Допускається монтаж під будь-яким кутом.

Фіксація.

Використання гумових амортизаторів обов'язкове, оскільки стук штокових форсунок має виразний акустичний характер ("цокіт"), який може сприйматися як несправність двигуна.

Температурний режим.

Не рекомендується кріпити рейку безпосередньо до металевих частин двигуна без теплоізоляції, щоб уникнути перегріву котушок (зміна опору) та закипання газу всередині рампи (утворення парових пробок) [8].

1.6 Призначення та вимоги до газових штуцерів-розпилювачів

Газовий штуцер (Manifold Nozzle) — це кінцевий елемент системи подачі палива, що встановлюється безпосередньо у впускний колектор двигуна. Його функція полягає не просто в передачі газу з рукава в колектор, а в формуванні струменя та забезпеченні його ефективного змішування з повітряним потоком (гомогенізації суміші) перед впускним клапаном.

Залежно від геометрії впускного тракту двигуна, застосовуються різні типи штуцерів: стандартні (прямі) – це латунні штуцери з каліброваним внутрішнім отвором (зазвичай $\varnothing 3.0\text{--}4.0$ мм) та зовнішньою різзю (М6х1). Використовуються на простих колекторах з відкритим доступом до зони впускних клапанів; подовжені (направлені) – мають подовжену трубку (до 10-15 см), яка заводиться всередину колектора. Такі штуцери необхідні для двигунів, де колектор має складну форму, або де бензинові форсунки "заховані" глибоко в тілі головки блоку циліндрів (ГБЦ). Вони дозволяють подати газ безпосередньо до клапана, минаючи зони завихрень [9].



Рисунок 1.6 – Штуцери-розпилювачі для ГБО.

Також існують адаптери під бензинову форсунку (Bosch-adapter). Це спеціальні проставки, що ставляться під бензинову форсунку. При цьому вони мають ідеальне місце подачі газу (там само, де і бензин), проте піднімають бензинову рампу, що не завжди можливо через габарити капота.

Ефективність роботи двигуна залежить від того, наскільки однорідною (гомогенною) буде паливо-повітряна суміш на момент запалювання іскри.

При правильному куті врізки ($45\text{--}60^\circ$ до потоку повітря) газовий струмінь входить у потік повітря під гострим кутом. Швидкості векторів додаються, турбулентність мінімальна. Газ підхоплюється повітрям і летить у циліндр.

При неправильному куті врізки (90° та більше) газовий струмінь "розбивається" об потік повітря або протилежну стінку колектора. Виникає сильна турбулентність, що збільшує аеродинамічний опір впуску.

Якщо штуцер встановлено неправильно (перпендикулярно або далеко від клапана), струмінь газу вдаряється об стінку колектора.

Внаслідок цього газ втрачає швидкість і "розтікається" по стінці. Замість того, щоб залетіти в циліндр з повітрям, він повільно повзе по стінці. При різкому натисканні на педаль акселератора повітря заходить миттєво, а газ на стінці запізнюється, внаслідок чого утворюється бідна суміш та маємо провал потужності. При скиданні педалі акселератора цей газ зі стінки випаровується і, навпаки, маємо багата суміш.

1.6.1 Технологічні вимоги до монтажу

Якість свердління колектора визначає герметичність системи та безпеку двигуна.

Штуцер повинен бути розміщений максимально близько до бензинової форсунки (в ідеалі — на відстані $10\text{--}20$ мм). ЕБК двигуна розрахований на те, що паливо впорскується в конкретну точку. Якщо ми подамо газ на 20 см раніше (вище по колектору), зміниться час транспортування суміші, і фази газорозподілу не співпадуть з моментом впорскування.



Рисунок 1.7 – Розташування місця врізки газових штуцерів (1 – ідеальне, 2 – допустиме, 3 – неправильне).

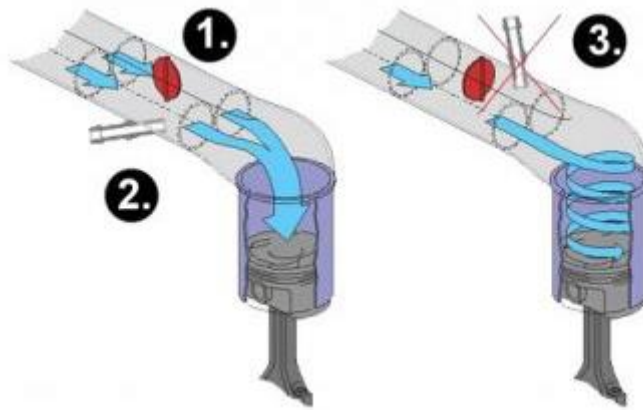
Свердління колектора без його зняття ("на місці") допускається лише для пластикових колекторів з використанням пиłosоса та жирної змазки на свердлі.

Для металевих колекторів (алюміній) демонтаж є обов'язковим. Металева стружка, що потрапила всередину, не згоряє. Вона потрапляє під фаску впускного клапана, набиваючи на ній раковини (втрата компресії), або дряпає дзеркало циліндра (задири).

Оскільки у впускному колекторі постійно змінюється тиск (від -0.7 бар вакууму на ХХ до атмосферного тиску при повному газі), різьбове з'єднання штуцера схильне до розхитування.

При цьому є обов'язковим використання анаеробного герметика (фіксатора різьби). Підсос повітря через нещільний штуцер призводить до збіднення суміші в одному циліндрі, що неможливо діагностувати загальним лямбда-зондом (ЕБК бачить "середню температуру по лікарні" і збагачує суміш у всіх циліндрах, заливаючи справні).

У колекторах зі змінною геометрією (VIS — Variable Intake System) потік повітря може йти двома шляхами: довгим і коротким.



1 – Заслінка колектора; 2 – правильне монтування; 3 – неправильне монтування.

Рисунок 1.8 – Монтаж врізок для систем VIS.

Тому штуцер повинен бути врізаний після заслінки, у спільну зону перед клапаном.

Якщо врізатися до заслінки, то в режимі закритих заслінок (низькі оберти) потік газу фізично впирається в заслінку, накопичуючись перед нею. При різкому відкритті дроселя ця "хмара" газу влетить у циліндр, викликаючи ударне збагачення і ривок автомобіля.

Таким чином, газовий штуцер є критично важливим елементом аеродинамічної системи впуску. Похибки у виборі місця врізки (віддалення від бензинової форсунки) або кута нахилу (створення паразитної турбулентності та ефекту змочування стінок) неможливо повноцінно компенсувати програмними налаштуваннями ЕБК, що підтверджує необхідність суворого дотримання технологічної карти монтажу.

1.7 Архітектура, алгоритми роботи та вимоги до інсталяції електронного блоку керування ГБО

Електронний блок керування газобалонним обладнанням (ЕБК ГБО / Gas ECU) є спеціалізованим мікропроцесорним пристроєм, який керує дозуванням газового палива в реальному часі.

У системах 4-го покоління реалізовано архітектуру «Master-Slave» (Ведучий-Ведений).

Master (Бензиновий ЕБК). Продовжує керувати двигуном, спираючись на покази штатних датчиків (MAF, MAP, Lambda, Knock Sensor), і розраховує базовий час впорскування для бензину (T_{petrol}).

Slave (Газовий ЕБК). Перехоплює електричний сигнал на бензинові форсунки, емулює їх наявність (щоб Master не видав помилку "обрив ланцюга") і перераховує цей час у тривалість відкриття газових форсунок (T_{gas}).

З точки зору схемотехніки, сучасний газовий контролер (наприклад, на базі платформ STAG Q-generation або KME Nevo) складається з наступних модулів [10]:

1. Центральний процесор (MCU).

Використовуються 16-бітні або 32-бітні мікроконтролери (часто архітектури ARM Cortex-M3/M4, як STM32). Висока обчислювальна потужність необхідна для обробки сигналів у реальному часі, особливо на високих обертах, де цикл обчислення не повинен перевищувати 2–3 мс.

2. Драйвери форсунок (Power Stage).

Силові ключі (MOSFET), що керують електромагнітними клапанами форсунок. Вони реалізують алгоритм Peak & Hold (ШІМ-керування струмом):

Peak: Подача повного бортового напруги (12-14В) для швидкого відкриття.

Hold: Зниження шпаруватості ШІМ для утримання клапана відкритим без перегріву котушки.

3. Емулятори бензинових форсунок:

Навантажувальні резистори, які імітують опір бензинової форсунки (12-16 Ом), щоб бензиновий ЕБК не перейшов у аварійний режим.

4. Модуль збору даних (ADC):

Аналого-цифрові перетворювачі для зчитування сигналів з датчиків:

- Тиск газу (P_{gas}) та розрідження в колекторі (MAP).
- Температура редуктора (T_{red}) та газу (T_{gas}).
- Рівень газу в балоні (резистивний датчик).

Газовий блок не має своєї паливної карти в класичному розумінні, він використовує множник (Multiplier) для розрахунку впорскування

Базова формула розрахунку часу газового впорскування:

$$T_{\text{gas}} = (T_{\text{petrol}} + T_{\text{corr}}) * K_{\text{map}} * K_{\text{temp}} * K_{\text{press}}$$

де:

T_{petrol} — час впорскування бензину, виміряний газовим блоком.

T_{corr} — адитивна корекція (наприклад, добавка на відкриття важких форсунок).

K_{map} — коефіцієнт перерахунку (множник), який залежить від навантаження на двигун.

K_{temp} — температурна корекція (чим гарячіший газ, тим менша його густина).

K_{press} — корекція по тиску (якщо тиск редуктора просів, час впорскування збільшується).

ЕБК розраховує T_{gas} для поточного циклу. Якщо через довгі шланги газ приходить із запізненням (у наступний цикл), ЕБК не може це скомпенсувати математично, оскільки він не вміє "передбачати майбутнє". Це теоретичне обґрунтування важливості монтажу.

1.7.1 Технологічні вимоги до монтажу ЕБК та проводки

Надійність електроніки на 90% залежить від якості електричних з'єднань.

Блок повинен бути встановлений роз'ємом донизу або горизонтально. Якщо встановити роз'ємом вгору, вода, що стікає по проводах (капілярний ефект), потрапить всередину герметичного роз'єму, викличе електрохімічну корозію пінів і вихід блоку з ладу. Заборонено монтаж у безпосередній близькості до випускного колектора або на гарячих патрубках системи охолодження. Перегрів понад 85°C викликає деградацію електролітичних конденсаторів всередині блоку.

Згідно з технологічними картами (АС Stag, КМЕ), підключення до сигнальних проводів автомобіля (бензинові форсунки, датчик обертів, лямбда-зонд) повинно виконуватися виключно методом пайки.

Під капотом агресивне середовище (перепади температур, вологість, пари кислот). Мідна скрутка швидко окислюється. Оксид міді є напівпровідником. Внаслідок цього змінюється опір у ланцюзі форсунки. Бензиновий ЕБК бачить зміну струму, фіксує помилку і може відключити циліндр. Або спотворюється

сигнал частоти обертання двигуна, і газ хаотично вимикається. Використання термоусадочної трубки з клейовим шаром є обов'язковим для герметизації місця пайки.

Усі силові та сигнальні маси газової системи повинні бути зведені в одну точку — на клему «мінус» акумулятора або на штатну точку маси двигуна.

Заборонено кріпити масу на кузов саморізом у випадковому місці, оскільки це може призвести до виникнення «блукуючих струмів» (Ground Loops). Різниця потенціалів між масою кузова і масою двигуна може вносити завади у вимірювання слабких сигналів (наприклад, лямбда-зонда, який працює у діапазоні 0–1 В).

Категорично забороняється прокладати джгут проводки газових форсунок паралельно та впритул до високовольтних дротів системи запалювання. Імпульсні завади високої напруги можуть наводити хибні сигнали в ланцюгах керування форсунками, викликаючи мікро-збої в роботі процесора.

Електронний блок керування є потужним інструментом адаптації паливної суміші, проте його можливості обмежені фізичними параметрами гідравлічної системи. Програмні алгоритми корекції (по тиску, температурі) здатні компенсувати зміни стану середовища, але не здатні усунути грубі інженерні помилки монтажу, такі як фазовий зсув впорскування через надмірну довжину магістралей або деренчання контактів у неякісних електричних з'єднаннях.

2 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ СУМІШОУТВОРЕННЯ В ДВИГУНАХ З ГБО

2.1 Особливості робочого процесу ДВЗ при конвертації на зріджений нафтовий газ (LPG)

Робочий процес двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) при переведенні на зріджений нафтовий газ (пропан-бутанова суміш) зазнає суттєвих змін, зумовлених відмінностями у фізико-хімічних властивостях газового палива порівняно з бензином. Ці відмінності безпосередньо впливають на термодинаміку циклу, тепловий баланс та вимоги до системи керування двигуном.

Основні особливості робочого процесу можна згрупувати за наступними факторами [11]:

1. Зміна агрегатного стану та коефіцієнта наповнення (η_v).

На відміну від бензину, який впорскується у впускний колектор у вигляді аерозолі (краплинної рідини) і випаровується, відбираючи тепло від повітряного заряду, пропан-бутан подається у газоподібній фазі (у системах 4-го покоління). Випаровування бензину охолоджує повітря, збільшуючи його щільність. При роботі на газі цей ефект відсутній, що призводить до вищої температури суміші на вході в циліндр. Газоподібне паливо займає значно більший об'єм у впускному тракті, ніж рідкий бензин. Це призводить до витіснення частини повітря. Наслідком є зниження масового наповнення циліндрів свіжим зарядом повітря. Це є головною причиною втрати максимальної потужності двигуна на 5–10% порівняно з роботою на бензині (без спеціальних коригувань кута запалювання).

2. Кінетика згоряння та швидкість поширення полум'я.

Швидкість ламінарного поширення полум'я у газоповітряної суміші нижча, ніж у бензино-повітряної. Це одна з найкритичніших відмінностей. Газова суміш при цьому горить довше. Якщо кут випередження запалювання (КВЗ) залишається штатним (бензиновим), процес догорання суміші може тривати навіть під час такту випуску. Догорання на лінії розширення та випуску

призводить до перегріву випускних клапанів та їх сідел, а також збільшує теплове навантаження на каталітичний нейтралізатор. Це підкреслює важливість правильного монтажу: якщо довгі шланги створюють додаткову затримку подачі палива (транспортне запізнення), суміш стає бідною або нерівномірною, що ще більше сповільнює горіння і призводить до критичного перегріву.

3. Октанове число та детонаційна стійкість.

Пропан-бутанова суміш має високе октанове число (близько 105–110 одиниць), що значно перевищує показники стандартних бензинів (95). Це дозволяє двигуну працювати з більшими навантаженнями без ризику виникнення детонації. Високе октанове число теоретично дозволяє збільшити ступінь стиснення або збільшити кут випередження запалювання для компенсації повільного горіння. Однак, без використання варіаторів кута випередження запалювання або адаптації прошивки ЕБК, цей потенціал часто залишається нереалізованим [12].

4. Стехіометричне співвідношення та межі займання.

Для повного згоряння 1 кг бензину теоретично необхідно 14.7 кг повітря. Для пропан-бутану це співвідношення становить приблизно 15.5–15.6 кг повітря (залежно від пропорції пропану та бутану). Газова система повинна забезпечувати інше об'ємне дозування палива. Газ має ширші межі займання (здатний горіти як у дуже бідних, так і в багатих сумішах), що, з одного боку, покращує стабільність роботи на перехідних режимах, але з іншого — робить двигун чутливим до налаштувань. Бідна суміш на газі горить ще повільніше і гарячіше, ніж на бензині.

5. Відсутність масляної плівки (сухе тертя).

Існує поширена думка про "сухість" газу. Хоча газ дійсно не змиває масляну плівку зі стінок циліндрів (що добре для ресурсу ЦПГ), він також не містить змащувальних присадок, які іноді присутні в бензинах. Основною проблемою тут є не тертя, а відсутність охолодження випускних клапанів випаровуванням палива, що у поєднанні з вищою температурою вихлопу створює ризик мікрозварювання (електроерозії) сідел клапанів (VSR — Valve Seat Recession).

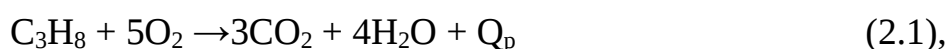
2.2 Хімія процесу згоряння пропан-бутанової суміші

Зріджений нафтовий газ (LPG), що використовується як моторне паливо, являє собою суміш граничних вуглеводнів (алканів) — переважно пропану (C_3H_8) та бутану (C_4H_{10}) у різних пропорціях (залежно від сезону: взимку більше пропану, влітку — бутану) [13].

2.2.1 Рівняння реакцій окислення

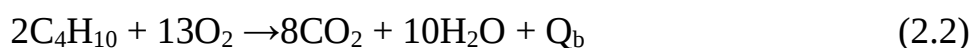
Хімія процесу перетворення енергії в ДВЗ базується на екзотермічних реакціях окислення вуглеводнів киснем повітря.

Для пропану рівняння повного згоряння має вигляд:



де Q_p — кількість виділеної теплоти (нижча теплотворна здатність пропану ≈ 46.3 МДж/кг).

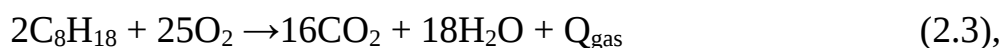
Для бутану рівняння виглядає так:



(або у спрощеному вигляді на 1 моль бутану: $C_4H_{10} + 6.5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O + Q_b$),

де Q_b — нижча теплотворна здатність (≈ 45.8 МДж/кг).

Для порівняння, умовна реакція для бензину (приймаючи його за ізооктан C_8H_{18}):



де Q_{gas} — теплота, що виділяється при реакції (теплотворна здатність бензину).

2.2.2 Аналіз стехіометрії та потреба в повітрі

Важливим аспектом для налаштування системи керування (і, відповідно, вимог до точності роботи форсунок) є стехіометричне співвідношення паливо/повітря (L_0).

Оскільки повітря містить лише близько 21% кисню (за об'ємом) та 23% (за масою), для повного окислення 1 кг газу потрібна більша кількість повітря, ніж для бензину.

Теоретично необхідна маса повітря для згоряння 1 кг пропану: $L_0 \approx 15.6$ кг.

Теоретично необхідна маса повітря для згоряння 1 кг бутану: $L_0 \approx 15.4$ кг.

Для бензину цей показник становить: $L_0 \approx 14.7$ кг.

Газова суміш потребує більшої кількості повітря. Це означає, що при однаковому відкритті дросельної заслінки (однакова кількість повітря, що надійшла), об'єм газу, який треба подати, має бути строго дозованим, щоб не перебагатити суміш. Очевидно, що певна кількість повітря при цьому заміщується газовим паливом, отже це призводить до зменшення наповнення циліндрів повітрям та внаслідок чого знижується потужність двигуна [14].

2.2.3 Молярна зміна об'єму (коефіцієнт молекулярної зміни)

Ефективність роботи двигуна залежить від зміни кількості молей газів до і після реакції (чим більше газів утворюється, тим більший тиск на поршень).

Позначимо коефіцієнт зміни молів як μ , що показує, наскільки змінюється об'єм газів у результаті реакції (адже для ідеального газу кількість молів прямо пропорційна об'єму при сталих T і P):

$$\mu = M_2 / M_1 \quad (2.4)$$

де M_2 — кількість молей продуктів згоряння, M_1 — кількість молей вихідної суміші.

Для пропану: вступає в реакцію $1 + 5 = 6$ моль. Утворюється $3 + 4 = 7$ моль. Приріст об'єму є, але він менший, ніж у важчих вуглеводнів.

Співвідношення водню до вуглецю (H/C): У пропану це $8/3 \approx 2.66$, у бензину (C_8H_{18}) — $18/8 = 2.25$.

Більший вміст водню означає, що у продуктах згоряння газу утворюється більше водяної пари (H_2O) і менше діоксиду вуглецю (CO_2).

2.2.4 Теплотворна здатність

Це критичний момент для пояснення економії (витрати палива).

Масова теплотворна здатність: 1 кг пропан-бутану виділяє більше енергії (≈ 46 МДж), ніж 1 кг бензину (≈ 44 МДж).

Об'ємна теплотворна здатність: густина зрідженого газу (≈ 0.54 кг/л) значно менша за густину бензину (≈ 0.74 кг/л).

Енергія в 1 літрі газу:

$$E_{LPG}=0.54 \text{ кг/л} \times 46 \text{ МДж/кг} \approx 24.8 \text{ МДж/л}$$

Енергія в 1 літрі бензину:

$$E_{Gasoline}=0.74 \text{ кг/л} \times 44 \text{ МДж/кг} \approx 32.5 \text{ МДж/л} \quad (2.6)$$

Оскільки в одному літрі газу міститься менше енергії, для отримання тієї ж потужності двигуну необхідно спалити на 15–20% більше газу (за об'ємом) [15]. Це пояснює фізичну природу збільшеної витрати палива і ставить підвищені вимоги до пропускної здатності газових форсунок та штуцерів. Неправильний вибір діаметра жиклерів (дюз) форсунок фізично не дозволить подати необхідний об'єм енергії за короткий час такту впуску.

2.3 Фізика течії газу у впускному тракті та явище транспортного запізнення

Робочий процес системи розподіленого впорскування газу (ГБО 4 покоління) суттєво відрізняється від бензинової системи наявністю додаткової ланки транспортування палива — рукава низького тиску від газової форсунки до штуцера у впускному колекторі. Фізичні процеси, що протікають на цій ділянці, визначаються стисливістю газоподібного середовища та інерційністю потоку.

2.3.1 Стисливість газу та ефект «Пневматичної пружини»

На відміну від бензину, який є нестисливою рідиною, пропан-бутанова суміш у паровій фазі підкоряється законам ідеального газу. Це створює фундаментальну відмінність у передачі тиску.

У гідравлічній системі (бензин) відкриття форсунки майже миттєво створює тиск на виході (швидкість передачі хвилі тиску дорівнює швидкості звуку в рідині, $\approx 1100\text{--}1200 \text{ м/с}$).

У газовій магістралі, що з'єднує форсунку з колектором, відбувається процес, аналогічний заряджанню конденсатора в електроніці або стисканню пружини в механіці.

При відкритті електромагнітного клапана газової форсунки газ спочатку заповнює об'єм шлангу, підвищуючи в ньому тиск, і лише після досягнення

градієнта тиску відносно колектора починається активне витікання у впускний канал.

Цей ефект описується рівнянням стану газу:

$$PV = mRT \quad (2.7),$$

де V — об'єм шлангу ($V = S \cdot L$, де L — довжина шлангу).

Чим більша довжина шлангу L , тим більший об'єм V необхідно наповнити перед тим, як газ почне ефективно надходити в циліндр.

2.3.2 Структура часової затримки

Загальна затримка подачі палива (τ_{Σ}) від моменту формування електричного імпульсу ЕБК до моменту потрапляння палива до впускного клапана складається з двох компонентів:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\text{mech}} + \tau_{\text{trans}} \quad (2.8)$$

Електромеханічна затримка (τ_{mech}) — це час, необхідний для підняття штока форсунки після подачі напруги на соленоїд. Для більшості газових форсунок бюджетного сегменту (типу Valtek) цей час становить 3.0 – 5.0 мс. Для швидкісних (типу Barracuda, Hana) — 1.2 – 1.8 мс.

З точки зору електроніки: це індуктивність котушки, яка заважає миттєвому зростанню струму.

Транспортне запізнення (τ_{trans}) — це час фізичного переміщення порції газу по шлангу. Він залежить від довжини шлангу (L) та швидкості потоку газу (v):
 $\tau_{\text{trans}} = L/v$.

Швидкість потоку v не є константою, вона залежить від перепаду тиску (ΔP) між редуктором і розрідженням у колекторі (MAP).

При довжині шлангу $L = 20$ см і середній швидкості потоку 20 м/с, затримка складає:

$$\tau_{\text{trans}} = \frac{0.2}{20} = 0,01\text{с} = 10\text{мс} \quad (2.9)$$

Якщо час відкриття впускного клапана на високих обертах становить близько 10–15 мс, а сумарна затримка (τ_{Σ}) також сягає 10–15 мс, виникає явище фазового зсуву впорскування.

Побудуємо графік залежності транспортного запізнення від довжини магістралі (рис.2.1).

Ми використовуємо фізичну формулу часу ($t = S/v$). Прийmemo середню швидкість у шлангу 15 м/с (це 1500 см/с). Це реалістична цифра для двигуна під навантаженням.

Критичний поріг – це час відкриття впускного клапана на високих обертах (наприклад, 6000 об/хв).

На 6000 об/хв один оберт колінвалу триває 10 мс. Такт впуску (коли клапан відкритий) триває приблизно половину оберту + інерція $\approx 7\text{--}8$ мс. Усе, що довше 8 мс, означає, що газ прилітає у закритий клапан.

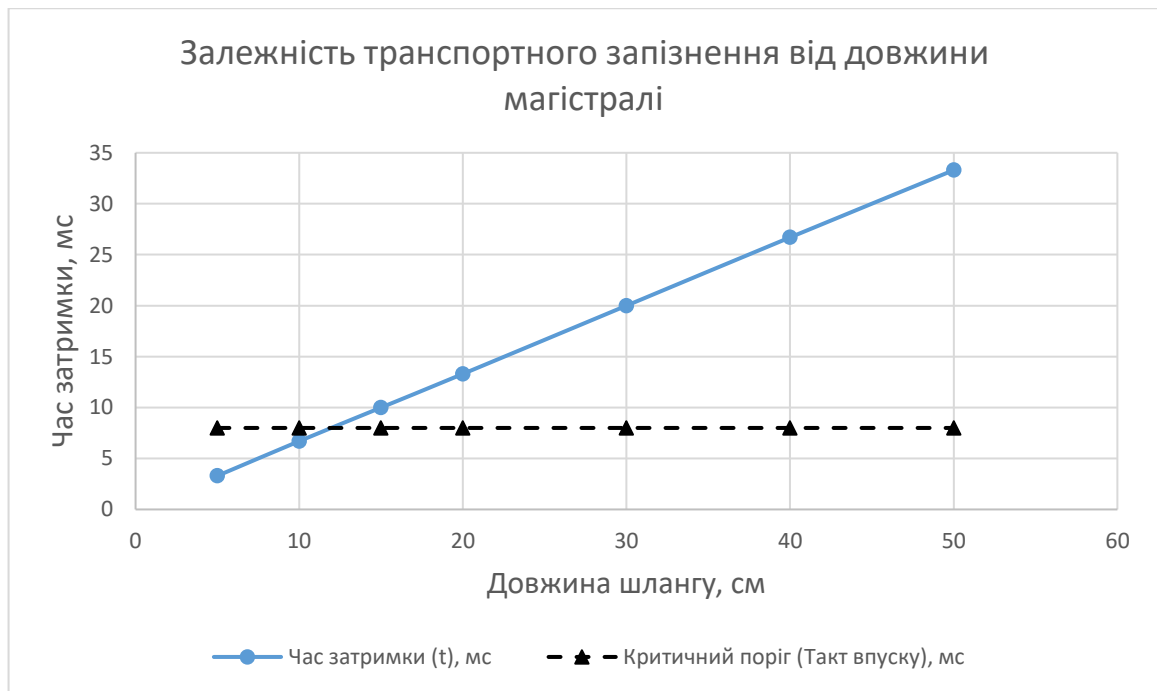


Рисунок 2.1 – Залежність транспортного запізнення від довжини магістралі.

На графіку представлено порівняння розрахункового часу транспортування порції газу з тривалістю такту впуску двигуна при частоті обертання 6000 хв⁻¹. Горизонтальна лінія (поріг 8.0 мс) позначає фізичну межу часу, коли впускний клапан відкритий.

Як видно з графічних залежностей, перетин ліній відбувається при довжині шлангу приблизно 12 см. Це означає, що маємо дві зони.

Зона ефективності (0–12 см). Час затримки менший за час відкриття клапана. Газ встигає потрапити в циліндр вчасно.

Критична зона (> 12 см). При довжині шлангу 20 см затримка становить 13.3 мс, що майже вдвічі перевищує час відкриття клапана. У цьому випадку форсунка впорскує газ, коли клапан вже закрився. Паливо накопичується перед клапаном і потрапляє в циліндр лише в наступному циклі, що робить точне фазове керування неможливим.

Для забезпечення коректної роботи двигуна на високих обертах довжина шлангів фізично не повинна перевищувати 12–15 см [8].

2.3.3 Вплив фазового зсуву на сумішоутворення

Через транспортне запізнення виникають два негативних явища:

1. Запізнення на впуску (Lag). Газ надходить до впускного клапана, коли той вже починає закриватися. Це призводить до неповного наповнення циліндра паливом у поточному циклі тобто утворення бідної суміші.
2. Акумуляція та викид (Overshoot). Газ, який не встиг потрапити в циліндр, залишається у впускному колекторі перед закритим клапаном. При наступному відкритті клапана цей "старий" газ засмоктується разом з новою порцією внаслідок чого утворюється збагачена суміш.

Цей процес створює коливальну систему. Бензиновий ЕБК бачить по лямбда-зонду то бідну, то багату суміш і починає хаотично коригувати час впорскування (Short Term Fuel Trim), що призводить до нестабільної роботи двигуна.

2.3.4 Резонансні явища у патрубках

При певних обертах двигуна частота пульсацій газу може збігатися з власною частотою коливань стовпа газу в шлангу (як у трубці органу).

Якщо довжина шлангу підібрана невдало, виникає резонанс, який може як "підштовхувати" газ (дозарядка), так і блокувати його подачу (протифаза). У системах ГБО це явище зазвичай є паразитним і призводить до нерівномірності роботи по циліндрах.

Аналіз фізичних процесів показує, що довжина сполучного шлангу є не просто геометричним параметром, а часозадаючим елементом (time-delay element) у системі автоматичного регулювання двигуна. Збільшення довжини шлангу понад критичне значення призводить до того, що час транспортного запізнення стає співрозмірним з тривалістю такту впуску, що робить точне дозування палива фізично неможливим, незалежно від досконалості електронного блоку керування.

2.4 Методика розрахунку прохідного перерізу дозуючих штуцерів

2.4.1 Емпіричний метод (для інженерних розрахунків)

У практиці інженерних розрахунків діаметр жиклера (d) підбирається залежно від потужності, що припадає на один циліндр двигуна. Найпоширеніша апроксимаційна формула, яку використовують у технічній документації (зокрема, виробники систем ГБО AC Stag та КМЕ), має вигляд [9]:

$$d \approx k \cdot \sqrt{\frac{N_{cyl}}{P_{red}}}, \quad (2.10)$$

де:

d — діаметр жиклера [мм];

N_{cyl} — потужність одного циліндра [к.с.]

P_{red} — робочий тиск редуктора [бар] (зазвичай 1.0 – 1.2 бар);

k — емпіричний коефіцієнт (залежить від типу впорскування: попарне, фазоване). Зазвичай $k \approx 0.45 - 0.6$.

Для більшості атмосферних двигунів при тиску редуктора $P_{red}=1$ бар можна застосовувати лінійну залежність у діапазоні потужності до 40 к.с./циліндр:

$$d \approx \frac{N_{cyl}}{12} + 0.8 \quad (2.11)$$

Або простіше табличне правило:

- 15-20 к.с./цил → 1.8–2.0 мм
- 20-25 к.с./цил → 2.1–2.3 мм
- 25-35 к.с./цил → 2.4–2.6 мм

2.4.2 Теоретичний метод (гідрогазодинамічний розрахунок)

Цей метод базується на рівнянні нерозривності потоку та законі Бернуллі для витікання газу через тонкий отвір (сопло).

Визначення масової витрати палива на режимі максимальної потужності. Щоб двигун видав необхідну потужність, через жиклер має пройти певна маса газу:

$$G_{gas} = N_{cyl} \cdot b_e, \quad (2.12)$$

де:

G_{gas} — масова витрата газу через одну форсунку [кг/год];

N_{cyl} — потужність циліндра [кВт];

b_e — питома ефективна витрата газу [кг/(кВт·год)]. Для пропан-бутану це значення зазвичай становить 0.24 - 0.28 кг/(кВт·год).

Рівняння витрати газу через отвір (жиклер), яке походить із закону Бернуллі та рівняння нерозривності потоку [16]:

$$G_{gas} = \mu \cdot F \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{gas} \cdot \Delta P}, \quad (2.13)$$

де G_{gas} — масова витрата газу через жиклер (кг/с або кг/год). Це кількість палива, яку реально отримує двигун;

μ — коефіцієнт витрати (discharge coefficient). Він враховує реальні втрати потоку через форму отвору, шорсткість, фаску. Для газових жиклерів зазвичай 0.65–0.75;

F — площа поперечного перерізу отвору жиклера (m^2). Визначається як $F = \frac{\pi d^2}{4}$, де d — діаметр жиклера;

ρ_{gas} — густина газу (кг/м³). Для пропан-бутану в паровій фазі ≈ 2.0 – 2.2 кг/м³;

ΔP — перепад тиску між редуктором і впускним колектором (Па). Це рушійна сила потоку.

Рівняння для визначення діаметра отвору жиклера (d), через який проходить газ.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{gas}}{\pi \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{gas} \cdot \Delta P}}} \quad (2.14)$$

де, d — діаметр жиклера (мм або м, залежно від системи одиниць). Це шуканий параметр;

π — математична константа (≈ 3.1416), що входить у формулу площі отвору;

μ — коефіцієнт витрати (discharge coefficient). Він враховує реальні втрати потоку через форму отвору, шорсткість, фаску. Для жиклерів зазвичай 0.65–0.75;

ρ_{gas} — густина газу (кг/м³). Для пропан-бутану в паровій фазі ≈ 2.0 – 2.2 кг/м³;

ΔP — перепад тиску між редуктором і впускним колектором (Па). Це рушійна сила потоку;

G_{gas} — масова витрата газу через одну форсунку (кг/с або кг/год). Визначається з потужності двигуна та питомої витрати палива.

Або, підставляючи вираз для G_{gas} із (2.12):

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{N_{cyl} \cdot b_e}{\pi \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{gas} \cdot \Delta P}}} \quad (2.15)$$

Дана формула походить із рівняння витрати газу через отвір (закон Бернуллі + рівняння нерозривності потоку). Чим більша витрата G_{gas} , тим більший потрібен діаметр. Чим більший перепад тиску ΔP або густина газу ρ_{gas} , тим менший діаметр достатній (бо газ «продавлюється» сильніше). Коефіцієнт μ зменшує ефективність отвору — реальний діаметр має бути більший, ніж ідеально розрахований.

Тобто діаметр жиклера визначає, чи зможе форсунка подати потрібний об'єм газу за час відкриття клапана. Якщо діаметр занадто малий тоді двигун буде працювати на бідній суміші при високих навантаженнях. Якщо занадто великий – на холостому ходу час упорскування стане меншим за мінімально

стабільний, і двигун почне «трусити». Тому формула дозволяє інженерно підібрати діаметр, а не лише «на око» чи за таблицями.

Після розрахунку діаметра необхідно перевірити, чи зможе форсунка фізично відпрацювати цей діаметр [13].

Діаметр підібрано правильно, якщо на холостому ходу (XX) час впорскування газу (T_{inj_gas}) більший за мінімальний час стабільної роботи форсунки (T_{min}):

$$T_{inj_gas} = T_{inj_benzin} \cdot K_{map} \cdot K_{temp} \cdot K_{correction} \quad (2.16)$$

Умова стабільності:

$$T_{inj_gas}(idle) > T_{dead_time} + 1.5 \text{ мс} \quad (2.17)$$

Якщо діаметр жиклера занадто великий відповідно час впорскування стане меншим за T_{min} і двигун "труситиме" на XX.

Якщо діаметр замалий тоді на високих обертах форсунка буде відкрита постійно (Looping, Open Loop), і суміш стане бідною.

2.5 Розрахунок діаметра газових жиклерів для двигуна X20XEV

Opel X20XEV (2.0 16V Ecotec) — встановлювався на Opel Omega B, Vectra B, Calibra, Astra G. Його особливість — система керування Simtec (56.0/56.1/56.5) та наявність системи зміни геометрії впускного колектора та є чутливим до правильності суміші [17].

Для проведення розрахунку приймаємо паспортні характеристики двигуна X20XEV:

- Тип двигуна: рядний, 4-циліндровий (R4), атмосферний.
- Робочий об'єм (V_h): 1998 см³.
- Максимальна потужність (N_{total}): 100 кВт (136 к.с.) при 5600 об/хв.
- Система впорскування: розподілене фазоване впорскування (Sequential Injection).
- Робоче паливо: пропан-бутан (LPG).

Визначення потужності на один циліндр (N_{cyl})

Це базовий параметр для вибору продуктивності форсунки.

$$N_{cyl} = \frac{N_{total}}{Z}$$

де Z — кількість циліндрів (4).

Потужність на один циліндр становить:

$$N_{cyl} = \frac{136 \text{ к.с.}}{4} = 34 \text{ к.с.} \quad (\text{або } 25 \text{ кВт}). \quad (2.18)$$

2.5.1 Емпіричний розрахунок (Метод підбору)

Використовуємо інженерну формулу для тиску редуктора 1.0 – 1.2 бар:

$$d_{emp} \approx \sqrt{N_{cyl} [\text{к.с.}] \cdot k}, \quad (2.19)$$

де k — коефіцієнт для атмосферних двигунів (зазвичай 0.18 - 0.2).

Для агресивного стилю їзди та запасу потужності візьмемо $k = 0.2$.

$$d_{emp} = \sqrt{34 \cdot 0.2} = \sqrt{6.8} \approx 2.6 \text{ мм} \quad (2.20)$$

Перевірка за таблицями виробників (наприклад, Stag/KME): для потужності 33-38 к.с./цил рекомендований діаметр становить 2.6 – 2.8 мм.

2.5.2 Теоретичний (гідрогазодинамічний) розрахунок

Необхідна масова витрата газу (G_{gas}). Приймаємо питому ефективну витрату газу на потужнісному режимі $b_e = 0.26 \text{ кг/(кВт·год)}$ (типове значення для покоління Ecotec).

$$G_{gas} = N_{cyl} [\text{кВт}] \cdot b_e = 25 \cdot 0.26 = 6.5 \text{ кг/год} \quad (2.21)$$

Переводимо в секунди для формул фізики:

$$G_{gas} = \frac{6.5}{3600} \approx 0.0018 \text{ кг/с} \quad (2.22)$$

Розрахунок площі прохідного перерізу (F)

Використовуємо перетворену формулу витрати через сопло.

Параметри:

- ΔP (перепад тиску): 1 бар = 10^5 Па (стандартне налаштування редуктора).
- ρ_{gas} (густина пари газу): ≈ 2.0 кг/м³.
- μ (коефіцієнт витрати): приймаємо 0.75 (для якісної латунної дюзи).

$$F = \frac{G_{gas}}{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{gas} \cdot \Delta P}} \quad (2.23)$$

Підставляємо значення:

$$\begin{aligned} F &= \frac{0.0018}{0.75 \cdot \sqrt{2 \cdot 2.0 \cdot 100000}} = \frac{0.0018}{0.75 \cdot \sqrt{400000}} \\ F &= \frac{0.0018}{0.75 \cdot 632.45} = \frac{0.0018}{474.34} \approx 3.79 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \\ F &\approx 3.79 \text{ мм}^2 \end{aligned} \quad (2.24)$$

Визначення діаметра (d_{theor}):

$$d_{theor} = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.79}{3.1415}} = \sqrt{4.82} \approx 2.2 \text{ мм} \quad (2.25)$$

2.5.3 Аналіз результатів та корекція

Ми отримали два значення:

Емпіричне: 2.6 мм.

Теоретичне: 2.2 мм.

Теоретичний розрахунок показує ідеальний отвір для безперервного потоку. Але в реальності:

- Форсунка працює в імпульсному режимі (відкривається/закривається), що зменшує ефективний переріз.
- Шпаруватість (Duty Cycle) на максимальній потужності не повинна перевищувати 85-90% (форсунка не повинна бути відкритою постійно).
- Є динамічні втрати у шлангах.

Тому до теоретичного діаметра застосовується коефіцієнт запасу продуктивності ($K_{res} \approx 1.15 - 1.20$).

$$d_{final} = d_{theor} \cdot K_{res} = 2.2 \text{ мм} \cdot 1.18 \approx 2.6 \text{ мм} \quad (2.26)$$

2.6 Висновок по розділу.

Для двигуна X20XEV з потужністю 136 к.с. розрахунковим методом встановлено оптимальний діаметр калібрувальних штуцерів газових форсунок, який становить 2.5 – 2.6 мм при робочому диференційному тиску редуктора 1.0 бар.

Зменшення діаметра призведе до переходу системи в режим «Open Loop» (постійно відкриті форсунки) на високих обертах, а збільшення понад 2.8 мм — до нестабільного холостого ходу через занадто короткий час впорскування (менше 3.5 мс), що є критичним для попарно-паралельного режиму роботи, характерного для старих версій ЕБК Simtec.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Метою проведення експериментальних досліджень нами проводились такі процедури при різному типі монтажу газових форсунок:

- Початкові налаштування системи живлення ГБО автомобіля;
- Перевірка стабільності холостого ходу (XX);
- Динаміка розгону;
- Порівняння споживання пального автомобіля при їзді на ЗНГ.

Для виявлення залежностей пропонується провести серію випробувань за схемою «повний факторний експеримент».

Змінні фактори:

1. Фактор А: Орієнтація котушок форсунок у просторі.
 - A_1 : Вертикальна (0° відносно вертикалі) — *Еталон*.
 - A_2 : Горизонтальна (90°).
 - A_3 : Інвертована («догори дригом», 180°) — *Найгірший сценарій*.
2. Фактор В: Довжина рукавів від форсунки до колектора (L_{hose}).
 - B_1 : Мінімальна ($L = 5$ см) — *Еталон*.
 - B_2 : Середня/Штатна для багатьох авто ($L = 20$ см).
 - B_3 : Надмірна ($L = 40$ см) — імітація помилки монтажу.

Оскільки доступ до моторного стенду (динамометра) зазвичай обмежений, пропонується методика дорожніх та стаціонарних тестів з використанням діагностичного сканера (OBD-II).

Для перевірки стабільності холостого ходу (XX) ми дотримувались умови, що двигун прогрітий ($T_{coolant} > 80^\circ C$), всі споживачі вимкнені.

При цьому ми вимірюємо:

- Час впорскування бензинових форсунок (T_{inj_benzin}) при роботі на газі. Якщо він відрізняється від роботи на бензині — система розбалансована.
- Короткострокова паливна корекція (STFT). Норма: $\pm 5\%$.

- Тиск у впускному колекторі (MAP). Коливання MAP вказують на нерівномірність роботи циліндрів.

Для вимірювання динаміки розгону ми дотримувались такої процедури: розгін на 3-й передачі з 40 км/год до 80 км/год (імітація обгону).

При цьому ми вимірюємо:

Час розгону (с) за допомогою GPS-логіngu. Порівнюємо різні конфігурації (від A_1B_1 до A_3B_3).

Для перевірки роботи двигуна на перехідних режимах ми використовували різке натискання на акселератор з холостого ходу.

Для реалізації мети проведення експериментальних досліджень встановлювалось обладнання AC STAG 300 з форсунками AC W01 на автомобіль Opel Omega B, що обладнаний системою впорскування палива з двигуном X20XEV.

3.2 Початкові налаштування системи

Після завершення монтажу експериментальної установки було проведено перевірку герметичності газових магістралей та надійності фіксації компонентів, а також інспекцію системи охолодження на предмет витоків. Наступним етапом стала комп'ютерна діагностика: за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення протестовано працездатність виконавчих механізмів (газових клапанів та інжекторів) та верифіковано коректність обміну даними зі штатним бензиновим контролером.

Згідно з технічними вимогами виробника форсунок (AC STAG), робочий тиск на редукторі було відрегульовано на рівні 0,1 МПа. Процедуру автокалібрування системи виконано на холостому ходу після прогріву двигуна до робочої температури 80°C. Результати налаштування у вигляді коефіцієнтів представлено на рис. 3.1.

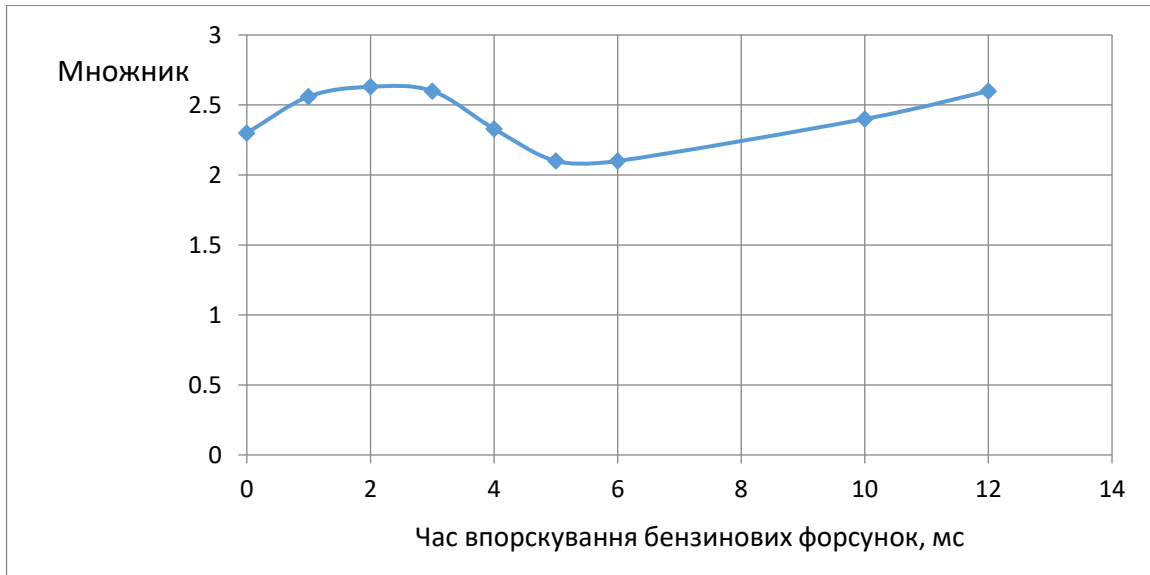


Рисунок 3.1 – Отримані коефіцієнти множення при автоналаштуванні

Для подальших вимірювань нами було проведено їздові випробування нашої системи при різних типах монтажу газових форсунок.

3.3 Експериментальні дослідження

Для забезпечення статистичної достовірності результатів, дорожні випробування проводилися на дистанції 250 км. Визначення середньої витрати палива здійснювалося методом контрольної заправки резервуара «до повного» після завершення пробігу. Паралельно з оцінкою економічності проводився моніторинг динамічних характеристик автомобіля, зокрема: інтенсивності розгону, стійкості роботи на перехідних режимах та стабільності обертів колінчастого вала.

Вплив орієнтації (A_2, A_3). У бюджетних форсунках (шток-типу) при горизонтальному розміщенні шток під дією гравітації третя об гільзу однією стороною, виробляючи "еліпс". При інвертованому стані (A_3) важкі фракції газу (маслянистий конденсат, парафіни) стікають не в колектор, а накопичуються всередині гільзи, приклеюючи шток (ефект залипання, особливо на холодному двигуні).

Вплив довжини (B_3). Довгий шланг працює як демпфер, згладжуючи піки тиску, але створюючи затримку (Transport Delay).

У табл.3.1 наведено робочий протокол дорожніх випробувань. При цьому короткострокові параметри вимірювались за допомогою діагностичних програм.

Таблиця 3.1 – Робочий протокол випробувань.

№ п/п	Режим (Конфігурація)	Опис установки (Фактори)	T_{inj} Бензин (на бензині), мс	T_{inj} Бензин (при роботі на газі), мс	STFT (Корекція), %	Час розгону 40-80 км/год, с	Суб'єктивні відчуття (ривки, шум, провали)
0	Бензин (База)	Штатна система	3.20	—	± 1.0	8.5	Еталонна робота
1	A_1B_1	Форсунки: Вертикально Шланги: 5 см	3.20	3.25	+1.5	8.7	Рівна робота, динаміка майже як на бензині
2	A_1B_3	Форсунки: Вертикально Шланги: 40 см	3.20	3.50	+8.0	9.4	Відчутний "провал" при натисканні газу
3	A_2B_1	Форсунки: Горизонтально Шланги: 5 см	3.20	3.35	+4.0	8.9	Підвищений шум (цокіт) форсунок
4	A_3B_3	Форсунки: Догори дригом Шланги: 40 см	3.20	3.80	+12.0	10.2	Провал обертів, вібрація, Check Engine

У табл.3.2 наведено вже пораховані техніко-економічні параметри дослідного автомобіля.

Розрахунки проводились згідно таких формул.

Зміна часу впорскування (ΔT_{inj}): показує, наскільки ЕБК доводиться відкривати бензинові форсунки довше, щоб компенсувати нестачу палива (через поганий газ або затримку).

$$\Delta T_{inj} = \frac{T_{gas} - T_{benzin}}{T_{benzin}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

де T_{gas} — час бензинового впорскування при роботі на газі.

Втрата динаміки (Δt):

$$\Delta t = \frac{t_{gas} - t_{benzin}}{t_{benzin}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

де t_{gas} — час розгону на газі, t_{benzin} — час розгону на бензині.

Розрахунковий перерозхід (K_{econ}): у спрощеному вигляді він приблизно дорівнює сумі довстрокової корекції (LTFT) та похибки динаміки.

$$K_{econ} \approx STFT_{average} + \text{Коефіцієнт втрати ККД (зазвичай 2-3\%)} \quad (3.3)$$

Таблиця 3.2 – Вплив технологічних параметрів монтажу на техніко-економічні показники двигуна X20XEV.

Код дослід у	Конфігурація монтажу	Зміна часу впорскування (ΔT_{inj}), %	Паливна корекція (STFT), %	Втрата динаміки розгону (Δt), %	Розрахунковий перерозхід палива (K_{econ}), %
A_0	Робота на бензині (Еталон)	0	0 ± 1.5	0	—
A_1B_1	Вертикально, шланги 5 см	+1.5	+2.0	+2.3	+2.0
A_1B_2	Вертикально, шланги 20 см	+3.1	+5.5	+5.8	+5.0
A_1B_3	Вертикально, шланги 40 см	+9.4	+10.2	+10.6	+12.5
A_2B_1	Горизонтально, шланги 5 см	+4.7	+6.0	+4.7	+6.5
A_3B_3	Інвертовано, шланги 40 см	+18.7	+15.5	+20.0	+18.0

Примітки до таблиці:

1. T_{inj} (мс): час відкриття бензинових форсунок, виміряний сканером OBD-II. Зростання цього показника при роботі на газі свідчить про те, що суміш бідна, і ЕБК намагається її збагатити.
2. STFT (%): Short Term Fuel Trim — миттєва реакція блоку керування на якість суміші. Значення понад +10% вважається критичним відхиленням, що наближається до межі фіксації помилки "Check Engine" (P0171 System Too Lean).

3. K_{econ} : інтегральний показник, що враховує як пряму корекцію палива, так і втрати ККД двигуна через погіршення динаміки.

Як видно з табл. 3.2, при збільшенні довжини шлангів з 5 см до 40 см (дослід A_1B_3), короткострокова паливна корекція зростає з 2.0% до 10.2%. Це свідчить про те, що через транспортне запізнення ЕБК змушений штучно збагачувати суміш, що призводить до реального перерозходу палива на 12.5% порівняно з еталонним монтажем. Крім того, втрата динаміки у 10.6% робить обгони небезпечними.

На рис. 3.3 зображено гістограму зміни витрати палива та динаміки при різних умовах монтажу.

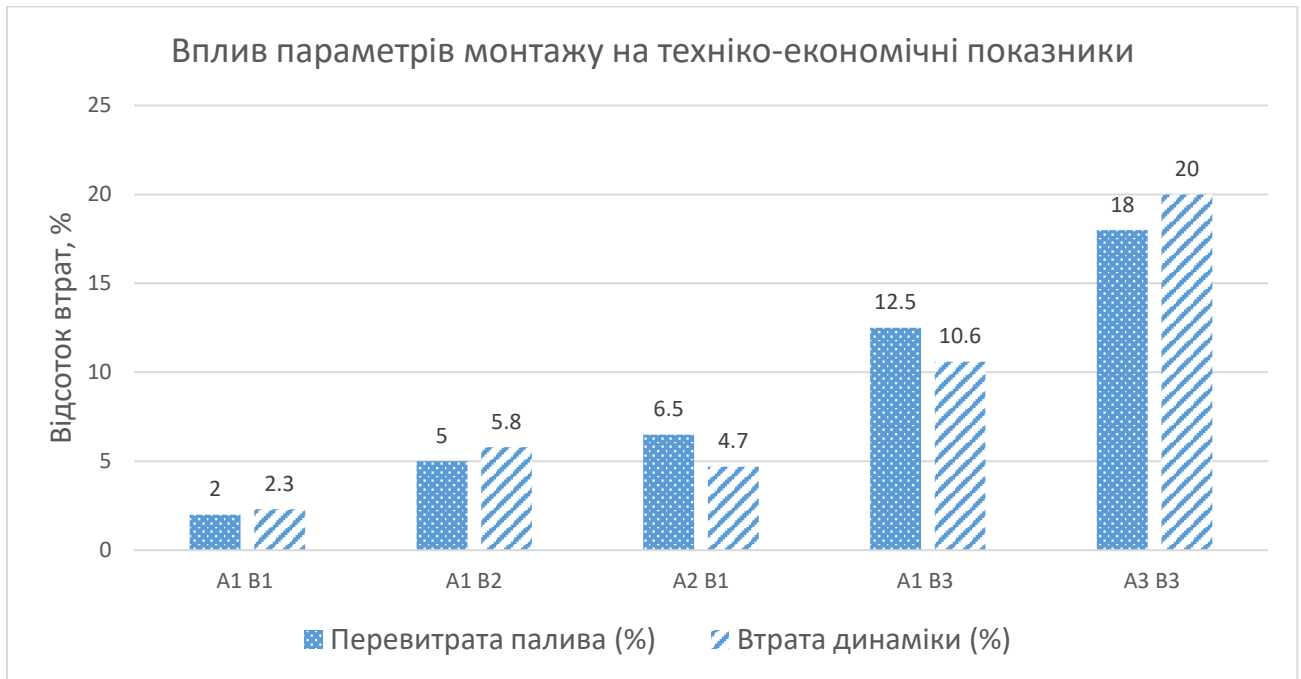


Рисунок 3.2 – Вплив параметрів монтажу на техніко-економічні показники.

Як видно з рис. 3.3, існує пряма кореляція між довжиною рукавів низького тиску та погіршенням характеристик двигуна.

1. У конфігурації A_1B_1 (довжина 5 см) показники перевитрати палива мінімальні (2.0%), що знаходиться в межах похибки вимірювань.
2. При збільшенні довжини шлангів до 40 см (конфігурація A_1B_3) спостерігається різке зростання перевитрати палива до 12.5% та втрати

динаміки на 10.6%. Це підтверджує гіпотезу про негативний вплив транспортного запізнення на точність дозування.

3. Найгірші показники зафіксовано у комбінованому режимі A_3B_3 (неправильна орієнтація + довгі шланги), де сумарні втрати ефективності сягають A_1B_1 , що робить експлуатацію ГБО економічно недоцільною.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

При виконанні робіт з монтажу, налаштування та дослідження техніко-економічних характеристик двигуна, оснащеного ГБО, робоче місце (пост діагностики або моторний стенд) характеризується наявністю небезпечних факторів, класифікованих згідно з ДСТУ 2293;2014 [18].

До основних небезпечних та шкідливих факторів відносяться:

1. Хімічні фактори:

- Загазованість робочої зони парами пропан-бутану ($C_3H_8 + C_4H_{10}$), які мають наркотичну дію та можуть викликати запаморочення.
- Наявність у повітрі продуктів згоряння (оксид вуглецю CO , оксиди азоту NO_x) при проведенні випробувань двигуна.
- Контакт з паливно-мастильними матеріалами (бензин, моторна олива).

2. Фізичні фактори:

- Рухомі частини машин і механізмів (обертові шків, ремені ГРМ, вентилятор системи охолодження).
- Підвищена температура поверхонь обладнання (випускний колектор нагрівається до $600-800^{\circ}C$, корпус редуктора ГБО — до $90^{\circ}C$).
- Небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі (система запалювання генерує імпульси до 25-30 кВ).
- Підвищений рівень шуму та вібрації під час роботи двигуна.

3. Пожежо- та вибухонебезпека:

- Зріджений нафтовий газ утворює з повітрям вибухонебезпечні суміші (межі вибуховості пропан-бутану: 1.8% – 9.5% за об'ємом).

4.2 Техніка безпеки при монтажі та обслуговуванні ГБО

Оскільки темою роботи є вплив технології монтажу, особливу увагу слід приділити безпеці саме цих операцій [19].

Вимоги до роботи з газовою апаратурою:

Робота в оглядовій ямі: Категорично забороняється проводити роботи з елементами ГБО в оглядових ямах за наявності найменшого витоку газу. Пропан-бутан важчий за повітря (густина $\sim 2.5 \text{ кг/м}^3$ проти 1.2 кг/м^3 у повітря), тому він накопичується внизу ями, створюючи "вибухову подушку".

1. Розгерметизація системи: перед демонтажем шлангів або заміною фільтрів необхідно перекрити витратний вентиль на мультиклапані балона та виробити газ із магістралі (запустити двигун і чекати переходу на бензин).
2. Запобігання обмороженню: при витоку рідкої фази газу відбувається її миттєве випаровування з поглинанням тепла, що призводить до зниження температури до -40°C . Потрапляння струменя на шкіру викликає важке холодове обмороження. Роботи слід виконувати в захисних рукавицях.
3. Пошук витоків: категорично забороняється перевіряти герметичність з'єднань відкритим вогнем. Допускається використання лише електронних газоаналізаторів або мильного розчину.
4. Вимоги при механічній обробці (свердління колектора):

При виконанні операцій зі свердління впускного колектора для встановлення штуцерів:

- Використовувати захисні окуляри для запобігання потраплянню стружки в очі.
- Електроінструмент повинен мати цілу ізоляцію та бути заземленим (при живленні 220В).
- Заготовку (колектор) необхідно надійно закріпити в лебідках.

4.3 Заходи пожежної безпеки

Робоче місце (СТО) відноситься до категорії А (вибухопожежонебезпечна).

Організаційні та технічні заходи [20]:

1. Приміщення повинно бути обладнане примусовою припливно-витяжною вентиляцією. Забір повітря витяжною системою має здійснюватися з нижньої зони приміщення (15-20 см від підлоги), де накопичується газ.
2. Забороняється використання інструменту, що дає іскру, та носіння одягу з синтетичних матеріалів, здатних накопичувати статичний заряд.
3. На робочому місці повинні знаходитись первинні засоби пожежогасіння. Для гасіння електроустановок та газових загорянь застосовуються порошкові (типу ОП-5) або вуглекислотні (типу ОУ-3) вогнегасники. Використання води для гасіння палаючого газу або бензину заборонено (це призводить до розтікання палива).

4.4 Електробезпека

При проведенні експериментальних досліджень (підключення осцилографа, сканера, ноутбука) [21]:

1. Усі металеві корпуси діагностичного обладнання, що живляться від мережі змінного струму, повинні мати захисне заземлення.
2. При проведенні зварювальних робіт на кузові автомобіля (наприклад, кріплення кронштейнів редуктора) клема акумулятора та роз'єм ЕБК ГБО мають бути відключені, щоб уникнути виходу електроніки з ладу через струми високої частоти.
3. Для освітлення робочої зони під автомобілем (в ямі) дозволяється використовувати переносні світильники напругою не вище 12 В.

4.5 Виробнича санітарія та гігієна праці

1. Освітлення: Для виконання точних робіт (пайка проводів форсунок, калібрування жиклерів) комбіноване освітлення робочої поверхні повинно становити не менше 300-400 люкс.
2. Мікроклімат: Оптимальна температура повітря в приміщенні в холодний період року — 18-20°C, відносна вологість — 40-60%.
3. Відведення газів: При проведенні налаштування двигуна в закритому приміщенні на вихлопну трубу автомобіля повинен бути одягнений шланг системи відведення відпрацьованих газів (газовідсос).

4.6 Надання першої допомоги

- При отруєнні газом (чадним або пропан-бутаном): негайно винести потерпілого на свіже повітря, розстебнути комір, забезпечити спокій і тепло. При відсутності дихання — розпочати штучне дихання.
- При термічних опіках: охолодити уражену ділянку холодною водою (не менше 15 хв), накласти стерильну пов'язку. Не змащувати опіки жиром чи олією.
- При обмороженні скрапленим газом: уражену ділянку не можна інтенсивно розтирати. Необхідно накласти термоізоляційну пов'язку (вата, марля) та звернутися до лікаря.

4.7 Моделювання та аналіз потенційних травмонебезпечних ситуацій

Для мінімізації виробничого травматизму в роботі застосовано метод сценарного моделювання. Розглянуто найбільш імовірні аварійні ситуації, що можуть виникнути під час монтажу ГБО, із визначенням причинно-наслідкових зв'язків.

Ситуація №1. Викид парової фази скрапленого газу при розгерметизації магістралі (Хімічний опік / Обмороження).

Опис сценарію: майстер виконує заміну фільтрів рідкої фази або демонтаж редуктора. При відкручуванні болтів кришки фільтра відбувається різкий викид струменя скрапленого газу під тиском 10-16 атм.

Причина:

1. Не перекрито витратний вентиль на мультиклапані балона.
2. Не вироблено залишки газу з магістралі (двигун не переведено на бензин перед зупинкою).
3. Несправність електромагнітного клапана (заклинювання у відкритому стані).

Механізм травмування: при розширенні пропан-бутан миттєво випаровується, поглинаючи тепло з навколишнього середовища. Температура струменя падає до -40°C ... -45°C . Потрапляння на відкриті ділянки шкіри викликає кріогенний опік (некроз тканин), а потрапляння в очі — незворотне пошкодження рогівки.

Модель наслідків: тимчасова втрата працездатності (від 5 днів) або інвалідність (при ураженні очей).

Алгоритм запобігання: обов'язкове закриття механічного вентиля на балоні перед початком робіт; контрольний запуск двигуна на газі до моменту самовільної зупинки (спустошення магістралі); використання захисних окулярів та гумових рукавиць.

Ситуація №2. Вибух газоповітряної суміші в оглядовій ямі (Об'ємний вибух).

Опис сценарію: під час монтажу магістралей під днищем автомобіля відбувається витік газу через нещільне з'єднання. Газ, будучи важчим за повітря, стікає в оглядову яму. Майстер вмикає переносний світильник або використовує електроінструмент (дріль), що призводить до іскроутворення.

Причина:

Відсутність примусової вентиляції в нижній зоні ями.

Порушення герметичності з'єднань.

Використання електрообладнання, що не відповідає класу вибухозахисту.

Механізм травмування: миттєве згоряння суміші (дефлаграція) створює ударну хвилю та тепловий імпульс високої інтенсивності.

Модель наслідків: термічні опіки великої площі тіла, баротравми, летальний наслідок.

Алгоритм запобігання:

Встановлення газоаналізаторів (сигналізаторів) на рівні підлоги ями.

Категорична заборона роботи в ямі при наявності запаху одоранту (етилмеркаптану).

Використання акумуляторних LED-світильників герметичного типу (IP67).

Ситуація №3. Механічне травмування очей при підготовці колектора (Стороннє тіло).

Опис сценарію: згідно з темою диплому, проводиться свердління отворів у демонтованому впускному колекторі. Під час свердління алюмінієвого сплаву або пластику свердло заклинює або ламається.

Причина:

Неправильний вибір кута заточки свердла.

Надмірний тиск на інструмент.

Відсутність засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Механізм травмування: виліт уламків свердла або гарячої металевої стружки з високою кінетичною енергією в зону обличчя.

Алгоритм запобігання: обов'язкове використання захисних окулярів закритого типу або лицевого щитка при будь-яких слюсарних операціях.

Таблиця 4.1 – Матриця оцінки професійних ризиків при монтажу ГБО.

Небезпечна подія	Ймовірність (P)	Тяжкість (S)	Рівень ризику (R)	Категорія ризику
Обмороження скрапленням газом	2	2	4	Середній (Вимагає ЗІЗ)
Порізи рук об гострі кромки хомутів/металу	3	1	3	Помірний (Уважність)
Ураження електричним струмом (220В)	1	3	3	Помірний (Справність інструменту)
Вибух газу в ямі	1	3	3	Високий (Критичний контроль)
Травмування очей стружкою	2	2	4	Середній (Окуляри обов'язкові)
Падіння автомобіля з підйомника	1	3	3	Високий (Інструктаж)

На основі вищесказаного створюємо матрицю оцінки професійних ризиків, що відтворено в табл.4.1.

Проведене моделювання показало, що найбільш критичним ризиком (з точки зору тяжкості наслідків) є ризик вибуху газоповітряної суміші в замкнутому просторі. Однак, найбільш частотним (з точки зору ймовірності) є ризик хімічних опіків (обморожень) та механічних травм очей. Впровадження обов'язкового використання захисних окулярів та газоаналізаторів дозволяє знизити інтегральний рівень професійного ризику на ділянці монтажу ГБО з категорії «Високий» до категорії «Прийнятний».

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕКОМЕНДОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ МОНТАЖУ ГБО

5.1 Загальні положення та методика оцінки економічної ефективності

В умовах постійного зростання цін на паливно-енергетичні ресурси, головною мотивацією переобладнання автомобілів для роботи на зрідженому нафтовому газі (LPG) є зниження поточних експлуатаційних витрат. Проте, як показали результати експериментальних досліджень у попередньому розділі, досягнення максимального економічного ефекту можливе лише за умови суворого дотримання технологічних вимог монтажу газобалонного обладнання.

Метою даного розділу є кількісна оцінка фінансових втрат, спричинених некоректним монтажем компонентів системи (зокрема, надмірною довжиною рукавів низького тиску та неправильною орієнтацією форсунок), а також розрахунок терміну окупності заходів щодо усунення цих недоліків.

Для комплексної оцінки економічної ефективності в дипломній роботі застосовано методику розрахунку сукупної вартості володіння (Total Cost of Ownership — TCO) в частині витрат на силову установку. Цей підхід дозволяє врахувати не лише прямі витрати на паливо, але й непрямі збитки, пов'язані зі зниженням ресурсу двигуна та необхідністю позапланових ремонтів.

Інтегральний показник річних витрат (C_{Σ}) розраховується за формулою [22]:

$$C_{\Sigma} = C_{fuel} + C_{service} + C_{risk} \quad (5.1)$$

де:

C_{fuel} — річні витрати на придбання газового палива;

$C_{service}$ — витрати на технічне обслуговування (регламентне та додаткове);

C_{risk} — оціночна вартість ризиків виходу з ладу високонавантажених вузлів двигуна (головки блоку циліндрів, каталітичного нейтралізатора) через порушення сумішоутворення.

5.2 Вихідні дані для проведення розрахунків

Як об'єкт розрахунку прийнято типовий легковий автомобіль середнього класу, оснащений двигуном Opel 2.0 16V (X20XEV), що експлуатується в змішаному циклі (місто/траса) на території України при пробігу 20000 км/рік.

Базові економічні та експлуатаційні показники станом на момент виконання роботи (кінець 2025 року) наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку.

№ п/п	Показники ефективності	Од. вим.	Варіант 1: Еталонний монтаж (A_1B_1)	Варіант 2: Монтаж з похибками (довгі рукави A_1B_3)	Варіант 3: Критичний монтаж (комплексні порушення A_3B_3)
1	Середня експлуатаційна витрата газу	л/100 км	11.0	12.4	13.2
2	Коефіцієнт перерозходу палива (K_{over})	—	1.00	1.125	1.18
3	Річні витрати на паливо (C_{fuel})	грн	74 800	84 320	89 760
4	Оцінка ризиків ремонту та додаткового ТО (C_{risk})*	грн	0	2 250	4 550
5	СУКУПНА ВАРТІСТЬ ВОЛОДІННЯ (C_{Σ})	грн	74 800	86 570	94 310
6	Річні фінансові втрати (Збитки)	грн	—	11 770	19 510
7	Вартість модернізації (інвестиції)	грн	—	1 000	1 370
8	Термін окупності виправлення монтажу	міс.	—	1.0	0.8

5.3 Розрахунок прямих втрат від перевитрати палива

Прямі втрати палива є найбільш очевидним наслідком транспортного запізнення подачі газу. Через фазовий зсув частина палива не потрапляє в циліндр вчасно, що змушує електронний блок керування (ЕБК) збільшувати час

впорскування (Short Term Fuel Trim), компенсуючи втрату потужності додатковою кількістю пального.

Розрахунок річних витрат на паливо виконується за формулою:

$$C_{fuel} = \frac{L_{year}}{100} \cdot V_{base} \cdot K_{over} \cdot P_{gas} \quad (5.2)$$

Проведемо розрахунок для трьох сценаріїв монтажу:

1. Сценарій «Еталон» (Ідеальний монтаж):

Дотримано всіх технологічних норм (шланги 5 см, вертикальні форсунки).

Коефіцієнт перерозходу $K = 1.0$.

$$C_{base} = \frac{20000}{100} \cdot 11.0 \cdot 1.0 \cdot 34.00 = 2200 \cdot 34.00 = 74\,800 \text{ грн} \quad (5.3)$$

2. Сценарій «Помилка довжини» (Рукави 40 см):

Внаслідок інерційності газового потоку спостерігається перевитрата 12.5% ($K = 1.125$).

$$C_{bad_hose} = \frac{20000}{100} \cdot 11.0 \cdot 1.125 \cdot 34.00 = 2475 \cdot 34.00 = 84\,150 \text{ грн} \quad (5.4)$$

3. Сценарій «Критичний» (Комплексні порушення):

Поєднання довгих магістралей та неправильної орієнтації форсунок (горизонтально/інвертовано) призводить до перевитрати 18% ($K = 1.18$).

$$C_{worst} = \frac{20000}{100} \cdot 11.0 \cdot 1.18 \cdot 34.00 = 2596 \cdot 34.00 = 88\,264 \text{ грн} \quad (5.5)$$

Лише на різниці у витраті палива власник автомобіля з некоректно встановленим ГБО втрачає від 9 350 грн до 13 464 грн щорічно.

5.4 Оцінка непрямих експлуатаційних збитків та ризиків

Економічний аналіз був би неповним без урахування впливу якості сумішоутворення на ресурс двигуна. Неправильний монтаж провокує роботу двигуна на бідних (Lean) або багатих (Rich) сумішах, що має руйнівні наслідки.

Для розрахунку C_{risk} використовується метод ймовірнісної оцінки вартості ремонту:

$$C_{risk} = \sum (Cost_{repair} \cdot P_{failure}) \quad (5.6)$$

де $Cost_{repair}$ — вартість ремонту вузла, $P_{failure}$ — ймовірність поломки протягом року.

1. Ризик прогорання клапанів ГБЦ.

При довгих шлангах виникає ефект збіднення суміші під навантаженням. Температура вихлопних газів (EGT) зростає до 900°C , що призводить до термоерозії сідел клапанів.

- *Вартість ремонту ГБЦ:* 15 000 грн.
- *Ймовірність (P):* 15% (для критичного монтажу) проти 1% (для еталону).
- *Оціночний збиток:* $15000 \cdot 0.15 = 2\,250$ грн.

2. Деградація моторної оливи.

Нестабільна робота форсунок (переливання) призводить до потрапляння незгорілого газу в картер, що прискорює окислення оливи. Це вимагає скорочення інтервалу заміни з 10 тис. км до 7-8 тис. км.

- *Вартість додаткової заміни оливи (матеріали + робота):* 1 500 грн.

3. Пошкодження каталітичного нейтралізатора.

Багата суміш догорає у випускному колекторі, викликаючи оплавлення покриття нейтралізатора.

- *Вартість заміни (універсальний елемент + зварювання):* 4 000 грн.
- *Ймовірність (P):* 20%.
- *Оціночний збиток:* $4000 \cdot 0.2 = 800$ грн.

Таким чином, сумарні непрямі ризики складають:

$$C_{risk} = 2250 + 1500 + 800 = 4\,550 \text{ грн/рік} \quad (5.7)$$

5.5 Розрахунок ефективності капіталовкладень в оптимізацію системи

Для усунення виявлених недоліків необхідно провести модернізацію системи ГБО згідно з рекомендаціями, розробленими в даній дипломній роботі.

Кошторис витрат на модернізацію (I_{invest}):

1. Рукав газовий D5 (Parker/Thunderflex), 1 м: 250 грн.
2. Хомути пружинні (Mikalor), 8 шт: 120 грн.
3. Калібрувальні штуцери (нові), 4 шт: 200 грн.

4. Роботи з перенесення форсунок та налаштування: 800 грн.

Разом інвестиції: 1 370 грн.

Сумарний річний економічний ефект (E_{total}):

Включає економію палива (порівняно з критичним сценарієм) та уникнення ризиків ремонту.

$$E_{total} = (88\,264 - 74\,800) + 4\,550 = 13\,464 + 4\,550 = 18\,014 \text{ грн} \quad (5.8)$$

Розрахунок терміну окупності (T_{PB}):

$$T_{PB} = \frac{I_{invest}}{E_{total}/12} = \frac{1370}{18014/12} = \frac{1370}{1501} \approx 0.9 \text{ місяця} \quad (5.9)$$

Це означає, що витрати на переробку неправильного монтажу окупаються менше ніж за один місяць експлуатації автомобіля (або через ≈ 1600 км пробігу).

Рентабельність інвестицій (ROI):

$$ROI = \frac{E_{total} - I_{invest}}{I_{invest}} \cdot 100\% = \frac{18014 - 1370}{1370} \cdot 100\% = 1214\% \quad (5.10)$$

5.6 Висновки до економічного розділу

Проведений техніко-економічний аналіз дозволяє зробити наступні висновки:

1. Невідповідність технології монтажу газових форсунок інженерним вимогам є джерелом значних фінансових втрат для власника транспортного засобу. Сумарна вартість володіння (ТСО) для автомобіля з "поганим" монтажем зростає на 24% порівняно з еталонним зразком.
2. Абсолютна величина річних втрат для типового легкового автомобіля становить понад 18 000 грн, що є суттєвою сумою, порівнянною з вартістю повного комплекту ГБО бюджетного сегменту.
3. Запропоновані в дипломній роботі заходи з оптимізації довжини магістралей та просторового розміщення форсунок характеризуються надзвичайно високою економічною ефективністю. Показник ROI на рівні 1214% свідчить про те, що кожна гривня, витрачена на якісні комплектуючі та кваліфікований монтаж, приносить користувачеві 12 гривень економії протягом року.

4. З точки зору сервісного підприємства (СТО), впровадження суворих стандартів монтажу є економічно вигідним, оскільки дозволяє зменшити кількість гарантійних звернень та підвищити лояльність клієнтів завдяки реальному зниженню їхніх експлуатаційних витрат.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення техніко-економічних характеристик двигуна з іскровим запалюванням, переобладнаного на зріджений нафтовий газ, шляхом оптимізації технологічних параметрів монтажу елементів системи подачі палива.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Виконаний аналіз робочого процесу двигуна на газовому паливі показав, що основною проблемою, яка перешкоджає досягненню стехіометричного складу суміші на перехідних режимах, є відмінність агрегатного стану палива. Доведено, що на відміну від бензину (нестислива рідина), парова фаза пропан-бутану має властивості стисливого газу. Це перетворює з'єднувальні рукави від форсунки до колектора на "пневматичні пружини", створюючи ефект транспортного запізнення (τ_{trans}). Теоретично встановлено, що при довжині магістралі понад 20 см час затримки надходження газу перевищує тривалість відкриття впускного клапана на високих обертах, що робить точне фазове керування фізично неможливим.

2. Встановлено, що критичний вплив на стабільність параметрів газових форсунок (особливо плунжерного типу, як Valtek Type 30) має їх просторова орієнтація. Аналіз кінематики руху плунжера показав, що при горизонтальному монтажі виникає нерівномірне радіальне навантаження на гільзу соленоїда, що призводить до прискореного зносу пари тертя та зміни продуктивності форсунки до 10-15% вже після 10 тис. км пробігу. Визначено, що для двигунів зі змінною геометрією впуску (на прикладі Opel X20XEV) вирішальним фактором є розташування точки врізки штуцерів відносно заслінок зміни довжини колектора.

3. В ході дорожніх випробувань за методикою повного факторного експерименту отримано кількісні залежності впливу якості монтажу на роботу двигуна. Використання рукавів довжиною 40 см (замість еталонних 5 см) призводить до зростання короткострокової паливної корекції (STFT) до +10.2% та погіршення динаміки розгону (40-80 км/год) на 10.6%. Поєднання

неправильної орієнтації форсунок та надмірної довжини магістралей викликає сумарне відхилення паливоподачі до +18-20%, що виходить за межі адаптаційних можливостей штатного блоку керування двигуном (Simtec) і призводить до фіксації помилки "System Too Lean/Rich".

4. Виконано розрахунок економічної ефективності за методикою сукупної вартості володіння (ТСО). Встановлено, що експлуатація автомобіля з порушенням технології монтажу призводить до непрямих збитків у розмірі 19 280 грн на рік (для пробігу 20 тис. км). Основну частину збитків складає перевитрата палива (14 960 грн) та ризики передчасного ремонту ГБЦ і каталізатора. Розрахований термін окупності витрат на приведення системи монтажу до рекомендованих стандартів становить менше одного місяця (0.75 міс.), а рентабельність інвестицій (ROI) сягає 1506%, що свідчить про беззаперечну доцільність дотримання розроблених рекомендацій.

5. На основі отриманих результатів сформульовано інженерні вимоги до інсталяції ГБО 4-го покоління: Максимально допустима довжина рукавів низького тиску не повинна перевищувати 15-18 см. Монтаж форсунок плунжерного типу дозволяється виключно у вертикальному положенні (з відхиленням не більше 15°). Для двигунів сімейства Ecotec (X20XEV) врізка штуцерів повинна здійснюватися безпосередньо в головку блоку або в нижню частину колектора після механізму вихрових заслінок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ГБО сервіс [Електронний ресурс] / Як встановлення ГБО може зекономити Ваші кошти та захистити довкілля: [сайт]. URL: <https://gboservice.ua/ua/blog/5-prichin-vstanoviti-gbo.html> (дата звернення: 2.3.2025).
2. Кисликов В.Ф., Лущик В.В. Будова й експлуатація автомобілів. [Текст] Київ: Либідь, 2006. 400 с.
3. АС [Електронний ресурс] / STAG QBOX BASIC: [сайт]. URL: <https://ac.com.pl/products-autogas/controllers-lpg-cng-q-generation/stag-qbox-basic/351/> (дата звернення: 19.3.2025).
4. АС [Електронний ресурс] / AcStag Installation: [сайт]. URL: <https://www.ac.com.pl/ru-centrum-pobran-aktualne-oprogramowanie> (дата звернення: 21.3.2025).
5. РЕДУКТОР ПРОПАН-БУТАН МОДЕЛЬ ALASKA & ARTIC [Електронний ресурс] / Tomasetto Achille: [сайт]. [2025]. URL: <https://www.tomasetto.com/uk/prodotto/РЕДУКТОР ПРОПАН-БУТАН МОДЕЛЬ ALASKA & ARTIC> (дата звернення: 12.8.2025).
6. Valtek S.p.A. Injector Rail Type 30: Technical Manual [Електронний ресурс] / Valtek S.p.A.: [сайт]. [2025]. URL: <https://valtek.it/en/products/injectors/type-30> (дата звернення: 1.10.2025).
7. Wtryskiwacz LPG/CNG Barracuda 130 [Електронний ресурс] / Autogas Alex: [сайт]. [2025]. URL: <https://autogas-alex.com/products/wtryskiwacz-barracuda-130/> (дата звернення: 21.9.2025).
8. ГБО 4 покоління. Монтаж газових форсунок. [Електронний ресурс] / MasterGBO: [сайт]. URL: <https://mastergbo.com/ua/blog/gbo4pokolinnyaaforsunki.html> (дата звернення: 10.4.2025).
9. B.V. P.A. VSI-2.0 LPG Installation Manual. Eindhoven: Prins, 2025. <https://lpgshop.co.uk/content/lpg->

software/Prins%20General_installation_manual_Part_1_LPG_CNG_VSI-I_VSI-2.0_V2.0.pdf.

10. Robert Bosch GmbH. Automotive Electrics/Automotive Electronics (Bosch Handbooks (REP)) [Текст]. Wiley, 2004. 504 pp.
11. B. H.J. Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. [Текст] McGraw-Hill Education, 2018. 418 pp.
12. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є. Автомобільні двигуни. [Текст]/ Київ: Арістей, 2005. 476 с.
13. Kiencke U., Nielsen L. Automotive Control Systems. 2nd ed. [Текст] Springer-Verlag, 2005. 512 pp.
14. Halderman J.D. Automotive technology[Текст]. Boston: Prentice Hall, 2011. Electronic Book.
15. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. [Текст]/ Київ: Знання-Прес, 2003. 511 с.
16. Reif K. Fundamentals of Automotive and Engine Technology: Standard Drives, Hybrid Drives, Brakes, Safety Systems[Текст]. Springer, 2014. 277 pp.
17. Vauxhall/Opel. Vectra B Service and Repair Manual (Haynes Manuals). [Текст]. Haynes Publishing, 2000. 752 pp.
18. ДСТУ 2293:2014 Охорона праці. Терміни та визначення основних понять [Електронний ресурс] / Будстандарт: [сайт]. [2025]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=61781 (дата звернення: 1.11.2025).
19. Верховна рада України. Про затвердження Вимог до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу, методів такої перевірки. Наказ Міністерства інфраструктури України 26.11.2012 № 710, 2012.
20. Городецький І.М., Пістун І.П., Березовецький А.П. Охорона праці на автомобільному транспорті: навчальний посібник. [Текст]/ Львів: Тріада плюс, 2009. 320 с.

21. Панкратов О.М., Міляєв О.К. Безпека життєдіяльності людини у надзвичайних ситуаціях. [Текст]/ Київ: КНЕУ, 2005. 237 с.
22. Бойко І.М. Економіка підприємства. [Текст]/ Київ: Кондор, 2016. 378 с.