

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення екологічної безпеки дизельних двигунів автобусів товариства
з обмеженою відповідальністю «АТП Слободянюк» місто Вінниця»

Виконав: студент 2-го курсу, групи
1АТ-24м спеціальності 274 –
Автомобільний транспорт
Освітньо-професійна програма –
Автомобільний транспорт
Фл Фалюкович О.І.

Керівник: к.т.н., доцент каф. АТМ
Смирнов Є.В.
« 28 » 11 2025 р.

Опонент: к.т.н. доц. каф. АТМ
Савушка В.В.
« 5 » 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри АТМ

Цимбал С.В.
к.т.н., доц. Цимбал С.В.

« 5 » 12 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)

Галузь знань – 27 – Транспорт

Спеціальність – 274 – Автомобільний транспорт

Освітньо-професійна програма – Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри АТМ
к.т.н., доцент Цимбал С.В.

« 25 » 09 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Фалюковичу Олегу Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення екологічної безпеки дизельних двигунів автобусів товариства з обмеженою відповідальністю «АТП Слободянюк» місто Вінниця, керівник роботи Смирнов Євгеній Валерійович, к.т.н., доцент, затверджені наказом ВНТУ від «24» вересня 2025 року № 313.

2. Строк подання здобувачем роботи: 30.11.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Вимоги до конструкції та експлуатації автотранспортних засобів (діючі міжнародні, державні, галузеві стандарти та технічні умови заводів-виробників автомобільної техніки); законодавство України в галузі екологічної безпеки транспортних засобів; досліджувані моделі АТЗ – автобуси ТОВ «АТП Слободянюк»; технічні характеристики автобусів «Атаман»; об'єкт дослідження – зниження токсичності дизельного двигуна на основі безперервного контролю параметрів, що використовуються електронним блоком керування.

4. Зміст текстової частини:

1 Стан проблеми забезпечення екологічної безпеки автомобілів з дизельними двигунами. Аналіз функціонування ТОВ «АТП Слободянюк»

2 Теоретичне обґрунтування можливості підвищення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів з дизельними двигунами

3 Дослідження залежності димності відпрацьованих газів від параметрів, що керуються блоком керування двигуном

4 Методика підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами

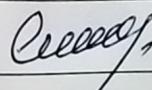
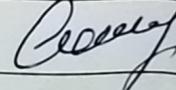
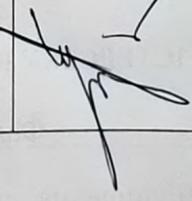
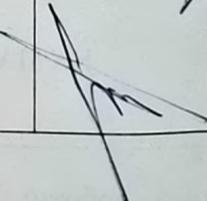
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1-3 Тема, мета та завдання дослідження.

4 Вплив несправностей паливної апаратури Common Rail на екологічні показники дизельних двигунів

- 5 Характеристика ВТБ ТОВ «АТП Слободянюк»
- 6 Концепція методу забезпечення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів
- 7 Комплекс математичних моделей підвищення екологічної безпеки автомобілів дизельними двигунами
- 8 Результати моделювання процесу впорскування та розпилювання дизельного палива циліндр двигуна (1-2 слайди)
- 9 Результати дослідження залежності димності відпрацьованих газів від тривалості впорскування (1-2 слайди)
- 10 Алгоритм реалізації розробленої методики
- 11 Основні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ/підрозділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розв'язання основної задачі	Смирнов Є.В., доцент кафедри АТМ		
Визначення ефективності запропонованих рішень	Буренніков Ю.Ю., професор кафедри АТМ		

7. Дата видачі завдання « 25 » вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення об'єкту та предмету дослідження	25.09-29.09.2025	Вик.
2	Аналіз відомих рішень, постановка задач	30.09-20.10.2025	Вик.
3	Обґрунтування методів досліджень	30.09-20.10.2025	Вик.
4	Розв'язання поставлених задач	21.10-10.11.2025	Вик.
5	Формування висновків по роботі, наукової новизни, практичної цінності результатів	11.11-16.11.2025	Вик.
6	Виконання розділу/підрозділу «Визначення ефективності запропонованих рішень»	17.11-24.11.2025	Вик.
7	Нормоконтроль МКР	25.11-30.11.2025	Вик.
8	Попередній захист МКР	01.12-04.12.2025	Вик.
9	Рецензування МКР	05.12-09.12.2025	Вик.
10	Захист МКР	10.12.2025-12.12.2025	Вик.

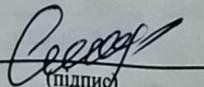
Здобувач



(підпис)

Фалюкович О.І.

Керівник роботи



(підпис)

Смирнов Є.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 629.3

Фалюкович О.І. Підвищення екологічної безпеки дизельних двигунів автобусів товариства з обмеженою відповідальністю «АТП Слободянюк» місто Вінниця. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 274 – Автомобільний транспорт, освітня програма – Автомобільний транспорт. Вінниця: ВНТУ, 2025. 77 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 31 назв; рис.: 15; табл. 9.

В магістерській кваліфікаційній роботі пророблено питання підвищення екологічної безпеки, що запобігає порушенню вимог до димності відпрацьованих газів автомобілів з дизельними двигунами в умовах експлуатації, заснованих на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком керування двигуном. У розділі 1 обґрунтовано необхідність забезпечення екологічної безпеки автомобілів з дизельними двигунами; проаналізовано стан виробничо-технічної бази ТОВ «АТП Слободянюк». В розділі 2 здійснено теоретичні розробки для підвищення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів з дизельними двигунами. В розділі 3 проведено моделювання та експериментальні дослідження залежності димності відпрацьованих газів від параметрів роботи електронного блоку керування. В розділі 4 розроблена методика підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами та виконано оцінку ефективності впровадження методики на прикладі ТОВ «АТП Слободянюк».

Ілюстративна частина складається з 12 плакатів.

Ключові слова: екологічна безпека, діагностування, паливна апаратура, Common Rail, електронний блок керування, димність, форсунка.

ABSTRACT

UDC 629.3

Falyukovich O.I. Improving the environmental safety of diesel engines of buses of the limited liability company "ATP Slobodyanyuk" city of Vinnytsia. Master's qualification work in the specialty 274 - Motor transport, educational program - Motor transport. Vinnytsia: VNTU, 2025. 77 p.

In Ukrainian Language. Bibliography: 31 titles; Fig.: 15; table 9.

The master's qualification work deals with the issue of increasing environmental safety, which prevents violation of the requirements for smoke emission of exhaust gases of vehicles with diesel engines under operating conditions based on continuous monitoring of parameters used by the electronic engine control unit. Section 1 substantiates the need to ensure environmental safety of vehicles with diesel engines; analyzes the state of the production and technical base of LLC "ATP Slobodyanyuk". Section 2 carries out theoretical developments to increase the environmental safety of motor vehicles with diesel engines. Section 3 carries out modeling and experimental studies of the dependence of smoke emission of exhaust gases on the parameters of the electronic control unit. Section 4 presents a methodology for increasing the environmental safety of motor vehicles with diesel engines and evaluates the effectiveness of the implementation of the methodology using the example of LLC "ATP Slobodyanyuk".

The illustrative part consists of 12 posters.

Keywords: environmental safety, diagnostics, fuel equipment, Common Rail, electronic control unit, smoke, injector.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛІВ З ДИЗЕЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТОВ «АТП СЛОБОДЯНЮК»	7
1.1 Аналіз конструкцій систем подачі палива сучасних дизельних двигунів ..	7
1.2 Аналіз несправностей паливної апаратури та їх впливу на працездатність і екологічні показники дизельних двигунів	17
1.3 Аналіз можливостей бортових і зовнішніх інструментів діагностування паливної апаратури Common Rail	22
1.4 Загальна характеристика ТОВ «АТП Слободянюк»	27
1.5 Аналіз і оцінка стану виробничо-технічної бази АТП.....	28
1.6 Висновки	30
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ДИЗЕЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ.....	32
2.1 Концепція методу забезпечення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів	32
2.2 Комплекс математичних моделей у методі підвищення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів з дизельними двигунами.....	39
2.2.1 Обґрунтування залежності параметрів подачі палива від характеристик розпилювача форсунки	39
2.2.2 Обґрунтування залежності параметрів, що характеризують якість розпилення палива, від характеристик розпилювача форсунки	41
2.2.3 Обґрунтування введення діагностичного параметра – тривалості впорскування палива – що залежить від зносу соплових отворів паливної форсунки	43
2.2.4 Обґрунтування залежності димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості упорскування палива	44

	3
2.3 Висновки	46
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ДИМНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ВІД ПАРАМЕТРІВ, ЩО КЕРУЮТЬСЯ БЛОКОМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ.....	48
3.1 Чисельне моделювання процесу впорскування та розпилювання дизельного палива в циліндр двигуна.....	48
3.2 Відбір форсунок для проведення натурального експерименту	54
3.3 Дослідження залежності димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості впорскування	55
3.4 Висновки	60
4 МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ДИЗЕЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ.....	61
4.1 Програмно-апаратний комплекс для реалізації методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів із дизельними двигунами.....	61
4.2 Алгоритм реалізації методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів із дизельними двигунами	64
4.3 Розрахунок попередженого екологічного збитку від забруднення атмосферного повітря	68
4.4 Економічна оцінка впровадження методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів із дизельними двигунами.....	69
4.5 Висновки	71
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина	78
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	

ВСТУП

Актуальність теми.

Забезпечення екологічної безпеки у різних галузях та зниження шкоди навколишньому середовищу від діяльності є однією з головних світових тенденцій. Автомобільний транспорт на сьогодні вважається основним джерелом забруднення атмосферного повітря у великих містах. За результатами сучасних досліджень дрібні тверді частинки є головним чинником, що знижує екологічну безпеку автомобільного транспорту. Основними джерелами таких частинок є продукти зносу шин, гальмівних колодок, а також відпрацьовані гази, особливо в двигунах, які використовують дизельне паливо.

Для зниження зазначених негативних ефектів на автомобільному транспорті розроблено та реалізуються конструктивні та експлуатаційні заходи. Однак існуючі бортові системи самодіагностики допускають експлуатацію автомобілів з порушенням вимог до димності відпрацьованих газів без появи сигналізації про несправність, а встановлена в нормативних документах періодичність перевірок і несвочасне усунення причин перевищення нормативних значень димності нерідко призводять до тривалої експлуатації автомобілів з порушенням нормативних вимог до димності.

В умовах існування зазначених недоліків заходів, що забезпечують відповідність складу відпрацьованих газів нормативним вимогам, для досягнення необхідного рівня екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельним двигуном актуальним є розширення функцій системи бортової самодіагностики для забезпечення інформування про зміну значень параметрів роботи паливної апаратури, що відповідає погіршенню екологічних показників. відпрацьованих газів. Отже розробка методів і систем безперервного контролю димності, заснованих на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком управління, є актуальним і перспективним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження по темі магістерської роботи належить до основних наукових напрямків кафедри «Автомобілі та транспортний менеджмент» Вінницького національного технічного університету.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка методики та засобів підвищення екологічної безпеки, що запобігає порушенню вимог до димності відпрацьованих газів автомобілів з дизельними двигунами в умовах експлуатації, заснованих на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком керування двигуном.

Задачі магістерської кваліфікаційної роботи:

- провести аналіз існуючих методів контролю димності відпрацьованих газів дизельних двигунів;
- проаналізувати сучасний стан виробничо-технічної бази ТОВ «АТП Слободянюк»;
- обґрунтувати можливість введення діагностичного параметра, що залежить від зношування соплових отворів розпилювача форсунки і є параметром робочого процесу, який використовується електронним блоком управління, та розробити математичну модель, що дозволяє контролювати димність відпрацьованих газів на основі зазначеного діагностичного параметра;
- виконати моделювання та експериментальні дослідження з метою підтвердження доцільності запропонованого дагностичного параметра та отримання залежності димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від значень введеного діагностичного параметра;
- розробити методику підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів із дизельним двигуном та запропонувати програмно-апаратний комплекс її реалізації;
- оцінити економічний ефект від впровадження розробок в ТОВ «АТП Слободянюк».

Об'єктом дослідження є зниження токсичності дизельного двигуна на основі безперервного контролю параметрів, що використовуються електронним блоком керування.

Предметом дослідження є алгоритми оцінки технічного стану паливної апаратури на основі параметрів системи бортової самодіагностики та моделі роботи електронного блоку керування двигуном.

Новизна роботи:

– удосконалено метод контролю димності відпрацьованих газів автомобілів з дизельними двигунами в умовах експлуатації, заснований на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком керування двигуном;

– отримано залежність димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості впорскування палива.

Практична цінність роботи полягає у розробці методики та програмно-апаратного комплексу контролю димності відпрацьованих газів по зміні тривалості керуючих сигналів форсунки в процесі експлуатації автотранспортних засобів.

Апробація результатів. Основні положення магістерської роботи апробовано на всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)».

Публікації. За результатами виконання магістерської кваліфікаційної роботи опубліковані 1 тези доповіді [17].

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛІВ З ДИЗЕЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТОВ «АТП СЛОБОДЯНЮК»

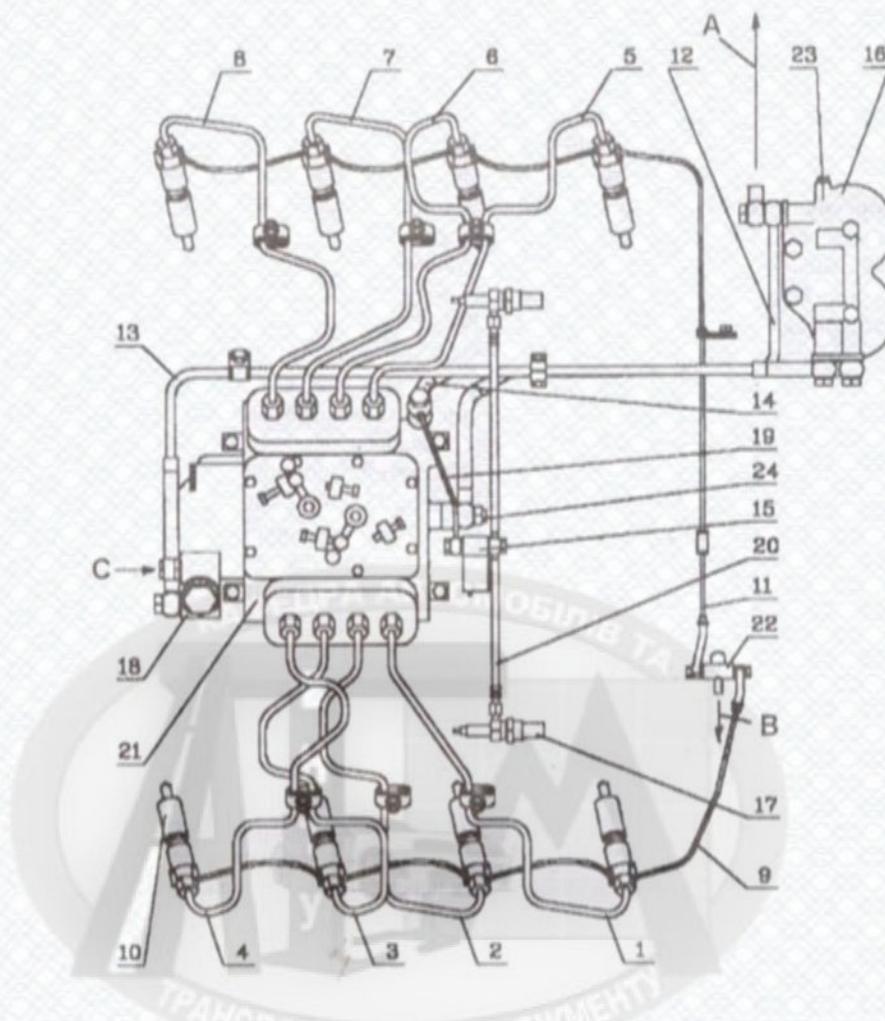
1.1 Аналіз конструкцій систем подачі палива сучасних дизельних двигунів

Традиційною системою подачі палива для дизельних двигунів є система роздільного упорскування. У таких системах практично або повністю відсутні електронні компоненти. Керуюча дія для відкриття форсунок здійснюється механічним способом – збільшенням тиску в магістралях подачі палива до форсунок. Такі системи мають порівняно невисокий тиск упорскування, що впливає на якість розпилювання палива [9, 20]. Крім того, у процесі подачі палива у магістралях виникають пульсації тиску, що спричиняє передчасні відмови.

Частою причиною зниження ефективності роботи двигунів з таким типом паливної апаратури є зниження максимального тиску та зменшення циклової подачі палива [19-21, 24].

Також традиційні системи подачі палива для дизелів з механічним регулюванням відрізняються високим рівнем викидів шкідливих речовин у вихлопних газах та збільшеною витратою палива. В даний час таку систему живлення встановлюють на частину автотракторних засобів великої вантажопідйомності. Основи конструкції такої системи можна розглянути на прикладі розповсюдженої системи з розділеним упорскуванням двигунів КАМАЗ (рис. 1.1.) [9, 20, 26].

Збільшення тиску впорскування палива сприяє підвищенню швидкості витікання палива з форсунки та зменшенню діаметра крапель, що покращує розпилення і, відповідно, підвищує ефективність згоряння паливоповітряної суміші в циліндрі двигуна, що веде до збільшення потужності дизеля та зниження витрати палива.



1-8 - паливні трубки високого тиску; 9 - дренажна паливна трубка форсунок лівих головок; 10 - форсунка; 11 - дренажна паливна трубка форсунок правих головок; 12 - трубка паливна відвідна ПНВТ; 13 - трубка відвідна паливного насоса; 14 - трубка паливна підвідна ПНВТ; 15 - клапан електрофакельного пристрою; 16 - фільтр тонкого очищення палива; 17 - свічка факельна; 18 - паливопідкачуючий насос; 19 - трубка підведення палива до клапана електрофакельного пристрою; 20 - трубка паливна від магнітного клапана до штифтових свічок; 21 - ПНВТ; 22 - трійник; 23 - клапан-жиклер; 24 - перепускний клапан ПНВТ; А, В - злив палива в бак; С - підведення палива від фільтра грубого очищення палива

Рисунок 1.1 – Паливна апаратура КАМАЗ із розділеним упрскуванням.

Однак, зі збільшенням тиску впрскування виникає необхідність більш точного виготовлення прецизійних компонентів [24-27].

Традиційні паливні системи не можуть повністю задовольнити сучасні вимоги щодо паливної економічності, зниження викидів токсичних речовин та зменшення рівня шуму. Причини такі:

- низький тиск упорскування;
- недостатня точність дозування палива.

З метою зменшення забруднення довкілля останніми роками проводиться політика посилення вимог до складу відпрацьованих газів. Для досягнення високих екологічних та економічних показників дизельних двигунів необхідне комплексне застосування сучасних конструктивних та технологічних рішень [19-20, 24-27]. Технічні покращення в системі подачі палива та системі управління робочими процесами двигунів стали основою для розробки більш ефективних та екологічно чистих дизельних силових установок.

Для досягнення високої ефективності роботи дизельного двигуна та покращення екологічних та економічних характеристик необхідно забезпечити якісне сумішоутворення та рівномірну подачу палива. Сучасні системи упорскування палива повинні бути здатні адаптуватися під різні робочі режими двигуна, враховуючи велику кількість факторів, що впливають на процес згоряння, таких як циклова подача палива; кут випередження упорскування; тиск упорскування; температура палива та охолоджуючої рідини; параметри повітряного тракту.

Системи з електронним управлінням упорскуванням палива дають набагато більше можливостей для оптимізації процесу упорскування, що значно покращує характеристики роботи дизельних двигунів. За допомогою електроніки легко контролюється більшість параметрів паливної апаратури дизельного двигуна за допомогою датчиків. Електронний блок управління аналізує їх показання за допомогою програмного забезпечення, і потім відправляє керуючі сигнали на виконавчі механізми, які регулюють такі параметри робочого процесу як циклова подача, кут випередження, тиск упорскування та ін. Це реалізовано в системах з насос-форсунками (НФ) [19] (рисунок 1.2) та акумуляторних системах (Common rail, CR) [19-20, 24-27].



Рисунок 1.2 – Будова насос-форсунки

У системі подачі палива з насос-форсунками насос і форсунка розміщені в одному корпусі, що робить систему надзвичайно компактною. Через малу відстань між насосом і розпилювачем (близько 30 мм) втрати тиску мінімальні. Паливо під високим тиском присутнє в розпилювачі тільки під час упорскування, що зменшує виток через ущільнення.

У системі з насос-форсунками кожен циліндр оснащений окремою насос-форсункою, що усуває необхідність у довгих з'єднувальних трубопроводах, у яких можуть виникати хвилеві явища. Така система значно підвищує точність дозування палива і унеможливорює проблеми, пов'язані зі зміною тиску в системі, що виникає через пульсації або хвильові ефекти в трубопроводах.

Цикл упорскування палива в системах, що розглядаються, складається з трьох послідовних етапів, кожен з яких має свою функціональну значущість для оптимізації процесу згоряння і зниження шкідливих викидів: пілотне (перед-) упорскування; основне (масове) упорскування; наступне (пост-) упорскування.

Попереднє впорскування забезпечує плавне займання паливно-повітряної суміші та стабільність поширення фронту полум'я. Основне впорскування забезпечує формування оптимальної паливно-повітряної суміші та її ефективне згоряння на всіх режимах функціонування двигуна внутрішнього згоряння, що є критично важливим для досягнення високих показників енергоефективності. Пост-впорскування виконує екологічні функції, включаючи регенерацію сажового фільтра, що є ключовим фактором відповідності сучасним екологічним стандартам.

Переваги: знижені коливань тиску, високий тиск впорскування.

Недоліки: трудомісткість монтажу; нерівномірність подачі палива при високих обертах двигуна; кількість поступорскувань обмежена особливостями конструкції.

Нерівномірність і нестабільність подачі палива пов'язані з тим, що на високих обертах виникають крутильні коливання кулачкового вала. Одним з істотних експлуатаційних недоліків системи з насос-форсунками є високі вимоги до якості палива. Це пов'язано з особливостями конструкції насос-форсунок.

Система насос-форсунок має істотний недолік у вигляді високої вартості через використання високоточних компонентів і складну технологію виробництва. Ремонт таких систем вимагає спеціалізованого обладнання та висококваліфікованих фахівців, що робить його трудомістким і дорогим. Істотним недоліком системи є прив'язка якості розпилення до частоти обертання вала – на низьких обертах, коли тиск впорскування падає, якість розпилення палива погіршується, що призводить до недостатнього змішування палива з повітрям.

До числа недоліків насос-форсунок відноситься відсутність можливості регулювати тиск для кожного окремого впорскування при постійному прискоренні плунжера [19-20].

Рішення про відповідність транспортного засобу екологічному стандарту приймається після проходження їздового циклу, який триває близько 30 хвилин, протягом яких швидкість і навантаження на двигун кілька разів змінюються від нуля до максимуму. Тому системи з насос-форсунками, в яких якість розпилення палива погіршується при зниженні частоти обертання колінчастого вала, не можуть

конкурувати з системами CR за рівнем викидів шкідливих речовин у вихлопних газах [20-22].

Паливна система Common Rail складається з двох контурів подачі палива, що керуються електронним блоком управління. Спочатку під низьким тиском, а потім під високим. На рис. 1.3 представлено будову паливної системи Common Rail.

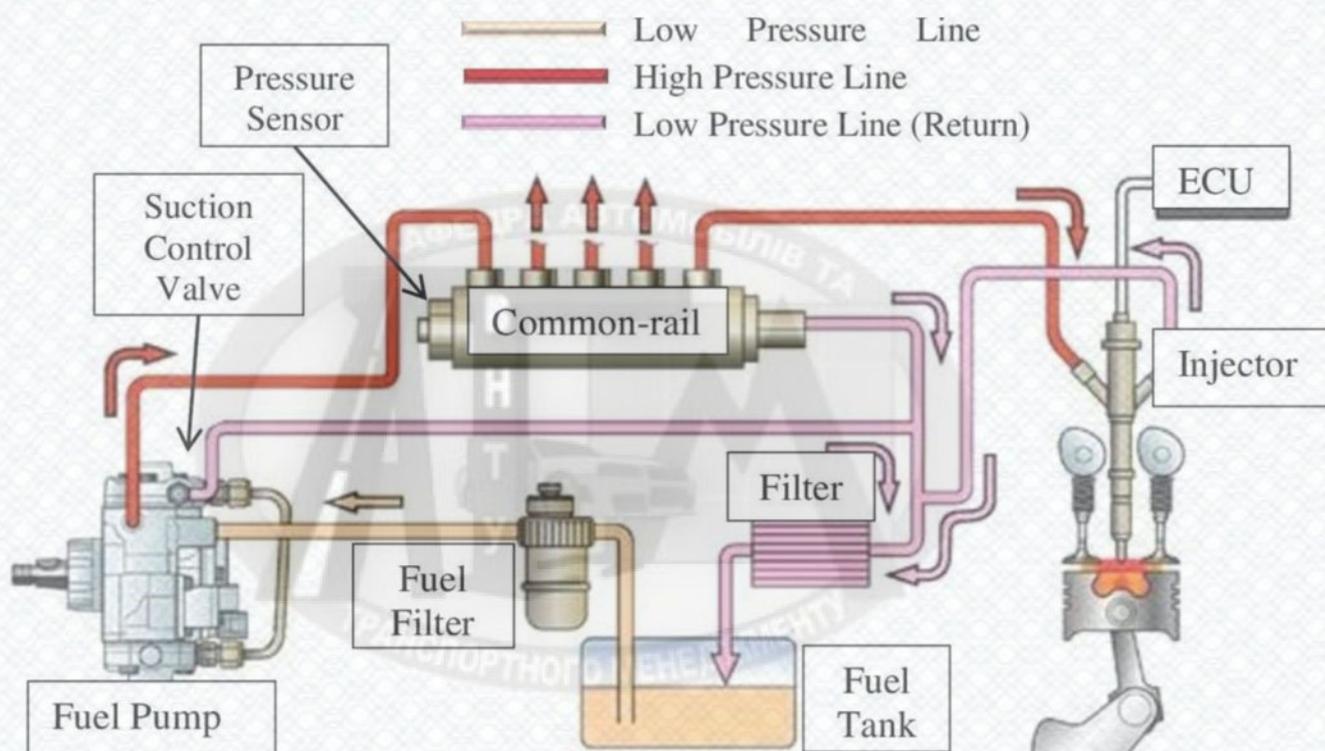


Рисунок 1.3 – Схема системи впорскування палива Common Rail.

Для транспортування палива з резервуара (fuel tank) використовується насос низького тиску, що забезпечує попередню фільтрацію (fuel filter) і деемульгацію палива. Далі підготовлене паливо направляєється в паливний насос високого тиску (ПНВТ, fuel pump). Привід плунжерів здійснюється через кулачковий вал з оптимізованим профілем, що взаємодіє з штовхачем. Конфігурація кулачкового механізму дозволяє здійснювати дозовану подачу палива в акумулятор тиску (Common Rail) при кожному циклі обертання кулачкового вала. Регулювання параметрів подачі палива реалізується блоком управління двигуном (ECU), що контролює роботу системи в реальному часі. Електронний блок управління (ЕБУ) керує відкриттям форсунок (injector) за допомогою електро- або п'єзогідравлічного

механізму, що дозволяє точно контролювати кількість і момент впорскування палива для оптимального згорання в циліндрі [21-22]. Блок управління отримує сигнали з датчиків положення колінчастого і розподільного валів, що дозволяє точно відстежувати фази і регулювати процес впорскування палива.

Блок управління двигуном регулює параметри системи впорскування в залежності від поточних умов роботи двигуна.

У системі управління дизельним двигуном блок управління отримує інформацію від багатьох датчиків, що дозволяє точно регулювати початок впорскування і обсяг палива, що подається. Ключовими параметрами, що використовуються електронним блоком управління, є: частота обертання колінчастого вала двигуна; положення колінчастого вала (датчик Холла); положення педалі акселератора; кількість повітря, що надійшла в циліндр (або абсолютний тиск у впускному колекторі); температура охолоджуючої рідини і повітря; тиск повітря і палива; кисневий датчик (лямбда-зонд).

На підставі даних з датчиків ЕБУ керує системою впорскування, коригуючи тиск палива і тривалість вприскування, залежно від частоти обертання колінчастого вала двигуна і його поточного навантаження. Наприклад, в режимі холостого ходу тиск впорскування мінімальний, щоб знизити шум і знос елементів паливної апаратури і двигуна, а при прискоренні він збільшується для поліпшення відгуку двигуна і підвищення його потужності.

Перехід на систему живлення Common Rail в дизельних двигунах є значним кроком вперед у порівнянні з традиційними системами впорскування. По-перше, потужність двигуна збільшується за рахунок того, що система Common Rail дозволяє більш точно і гнучко регулювати параметри впорскування палива. По-друге, екологічність роботи двигуна значно поліпшується.

Основними недоліками системи Common Rail є складність обслуговування і високі вимоги до кваліфікації технічного персоналу. Підвищення інтенсивності горіння палива в акумуляторних системах викликає значне підвищення температури компонентів двигуна в порівнянні з двигунами, оснащеними

традиційними системами подачі палива. Що, в свою чергу, створює підвищені теплові навантаження на моторну оливу.

Система Common Rail продовжує набирати популярність, і на даний момент близько 83% всіх випущених дизельних двигунів оснащені саме такою системою, що значно перевищує показник 2008 року, коли частка становила лише 24%. Система отримала визнання завдяки ефективності, підвищенню екологічності та економічності роботи двигуна.

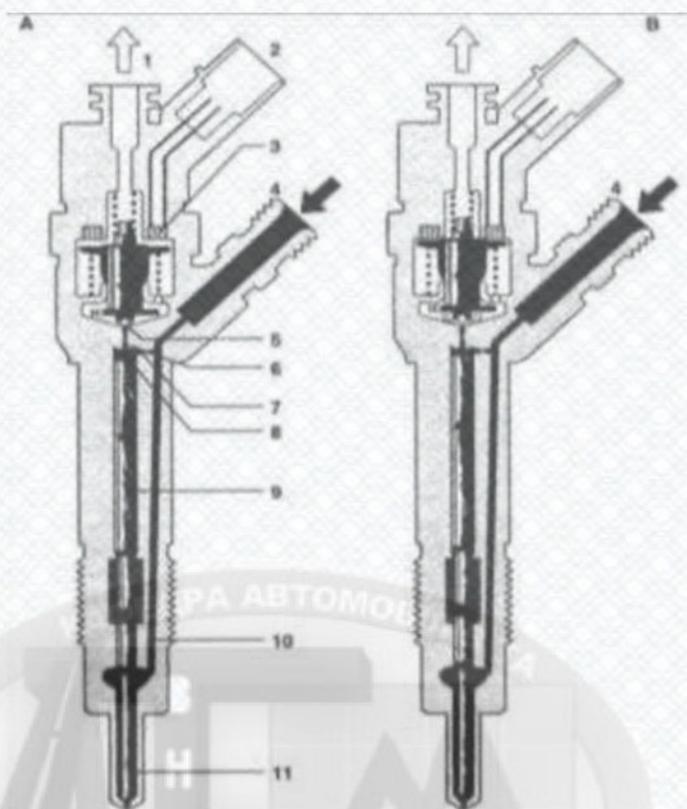
На ринку представлені кілька провідних виробників системи, включаючи BOSCH, DELPHI, DENSO і SIEMENS [19-20, 24-27]. Кожен з брендів розробив свою версію технології, але всі вони забезпечують високий ступінь точності і контролю за процесом впорскування палива, що покращує характеристики роботи дизельних двигунів.

Сьогодні система Common Rail є однією з найпоширеніших і надійних для використання в дизельних двигунах автомобілів. Незважаючи на високу ефективність і надійність системи Common Rail, термін служби і якість роботи безпосередньо залежать від правильної експлуатації, а також від регулярного виконання необхідних регламентних робіт з технічного обслуговування і поточного ремонту.

Розглянемо паливну апаратуру, що використовується в системі впорскування Common Rail. На рис. 1.4 представлена стандартна схема електрогідравлічної форсунки двигуна, що використовує систему живлення Common Rail.

Основне завдання форсунки — точно і ефективно подавати паливо в камеру згоряння в заданий момент часу, що необхідно для оптимізації роботи двигуна.

Робота форсунки починається з того, що ЕБУ, отримуючи інформацію про поточний стан двигуна (частота обертання колінчастого вала, навантаження, температура та інші параметри), посилає сигнал на електромагнітний клапан форсунки.



1 – повернення палива; 2 – електричний роз'єм; 3 – пусковий елемент (електромагнітний клапан); 4 – вхід палива від акумулятора тиску; 5 - кульковий клапан; 6 - отвір витоку; 7 - отвір подачі; 8 - відсік управління клапаном; 9 - плунжер управління клапаном; 10 - канал подачі палива до розпилювача; 11 - голка розпилювача.

Рисунок 1.4 –Електрогідравлічна форсунка системи живлення Common Rail

Форсунка включає кілька ключових компонентів, кожен з яких виконує свою функцію для забезпечення ефективного впорскування палива:

- розпилювач;
- гідравлічна система;
- електромагнітний клапан.

Форсунка керує подачею палива в камеру згоряння з використанням комбінації гідравлічного та електромагнітного механізмів. Паливо під тиском надходить з акумулятора високого тиску через канал до розпилювача і далі в камеру управління. Камера пов'язана з електромагнітним клапаном, який отримує сигнал від ЕБУ. Коли електромагнітний клапан закривається, отвір витоку в камері

управління теж закривається, сумарний тиск на верхній торець голки стає більшим, ніж тиск на конусний торець, що призводить до закриття голки і припинення подачі. Коли клапан відкривається, отвір витоку відкривається, тиск в камері управління знижується, і голка розпилювача відкривається, дозволяючи паливу надходити в камеру згоряння.

Кількість палива, необхідна для управління відкриттям голки розпилювача, подається одночасно з паливом, яке потрібно для подачі в циліндр. Паливо проходить через отвір витоку, пов'язаний з клапаном, і повертається в паливопровід. Додатково частина палива втрачається в напрямних штовхача клапана і самій голці розпилювача [19].

Більш прогресивним і складним пристроєм для впорскування палива в дизельних двигунах вважається п'єзоелектрична форсунка (п'єзофорсунка). Переваги п'єзофорсунки полягають у високій швидкості спрацьовування, яка в чотири рази швидша, ніж у електромагнітних клапанів, що дозволяє здійснювати до 9 впорскувань за один робочий цикл [27]. В результаті, п'єзофорсунки здатні здійснювати стійке багатофазне впорскування, з мінімальними порціями попереднього впорскування, скорочуючи проміжок часу між попереднім і основним впорскуваннями, що істотно покращує характеристики згоряння.

Крім того, п'єзофорсунки мають компактну конструкцію. Збільшення ККД форсунки забезпечується також за рахунок того, що вони вимагають менших витрат на управління в порівнянні з електрогідравлічними форсунками.

Складність конструкції п'єзофорсунки призводить до складного взаємозв'язку процесів, що відбуваються в роботі. Через це гідродинамічна система п'єзофорсунки має вузький діапазон значень структурних параметрів, в якому вона працює ефективно [19-20, 27].

1.2 Аналіз несправностей паливної апаратури та їх впливу на працездатність і екологічні показники дизельних двигунів

Існуючий парк рухомого складу в останні роки постійно розвивається; вносяться конструктивні зміни, посилюються вимоги до ремонтпридатності та надійності, і відповідно змінюються вимоги, що стосуються розробки, обслуговування та експлуатації.

Відповідно до вимог ДСТУ, надійність визначається як одна з характеристик механізму – його здатність зберігати в заданих межах значення всіх параметрів, встановлених нормативною документацією, що забезпечують можливість виконувати задані функції у відповідних режимах і умовах експлуатації, зберігаючи при цьому в межах допустимих значень експлуатаційні показники.

У будь-якому автотранспортному засобі двигун є одним з ключових компонентів, від роботи якого залежить здатність всієї машини виконувати функції відповідно до її призначення. Надійність дизельного двигуна залежить від якісних характеристик паливної апаратури. У автомобілів різних марок статистика відмов двигуна внаслідок несправного стану паливної апаратури становить 20–50 відсотків [16, 21]. Потужність такого двигуна, рівень споживання палива і безперебійна робота визначаються саме справністю паливної апаратури. Кореляція між надійністю паливної апаратури і частими відмовами дизеля підтверджується цілим рядом досліджень [4, 7, 14, 15, 23].

Зниження експлуатаційних показників дизельного двигуна, пов'язане з неякісним функціонуванням паливної апаратури, згідно зі статистикою, таке: зниження продуктивності – до 70%; зниження потужності – до 20%; надмірна витрата палива – до 25%.

Склад відпрацьованих газів у дизельному двигуні залежить від ряду факторів, серед яких найбільше значення мають: динаміка повітряного потоку; випередження впорскування; тиск палива; температура в камері згоряння; середній діаметр крапель і їх розподіл за об'ємом камери згоряння; концентрація кисню.

Також слід враховувати підвищене сажоутворення в умовах поганого розпилення палива і зниження кількості кисню, тоді як при підвищенні концентрації кисню і високій температурі згоряння палива утворення NO_x посилюється. На рис. 1.5 схематично представлений хімічний склад відпрацьованих газів дизельного двигуна.

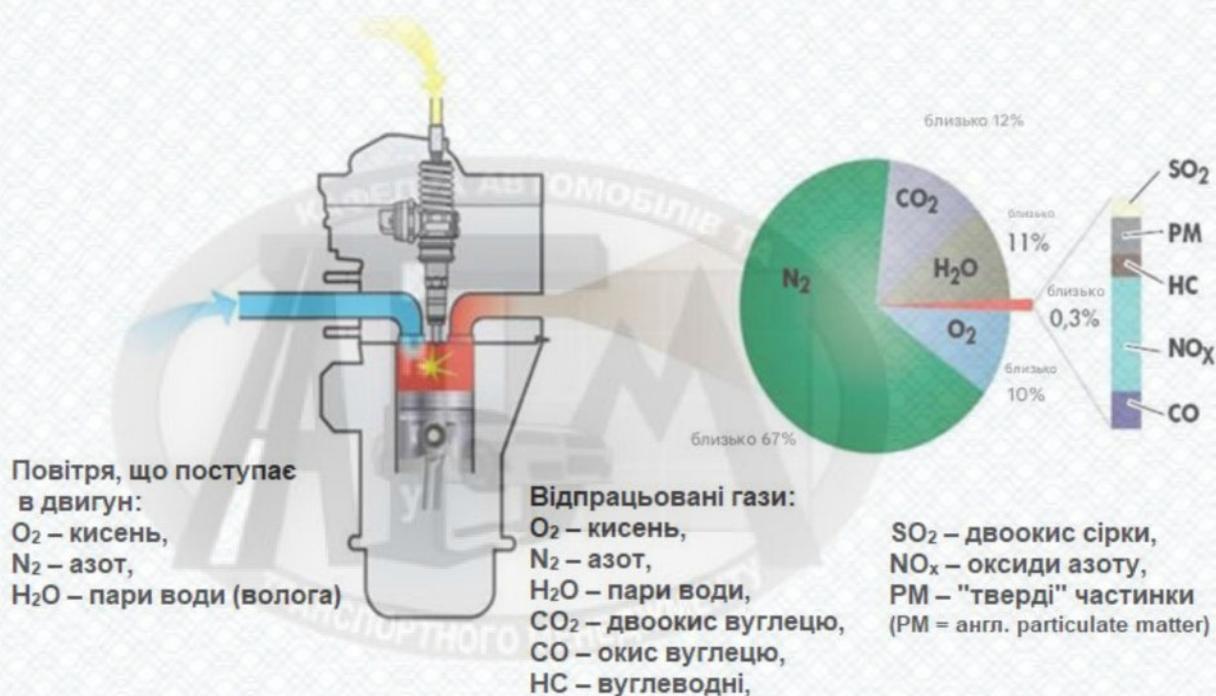


Рисунок 1.5 – Склад відпрацьованих газів дизельного двигуна

Нестабільна робота і падіння потужності двигуна, помітні для водія, неминуче виникають при порушеннях роботи турбіни або системи подачі повітря. Подібні несправності можна виявити також за рахунок застосування передбачених засобів самодіагностики.

У свою чергу, порушення функціонування паливних форсунок часто не призводять до помітних змін у роботі ДВЗ протягом тривалого періоду, хоча весь цей час порушується процес утворення суміші – зростають показники температури згоряння і витрати палива, суміш згорає не в повному обсязі, на поршні виникають відкладення, плівка оливи на поверхні циліндра руйнується тощо. Крім того,

внаслідок підвищення навантаження на системи нейтралізації відпрацьованих газів, їх ресурс помітно знижується, зростає негативний вплив на навколишнє середовище.

Найбільш поширені два типи несправностей в системі паливних форсунок: механічний (гідроабразивний) знос компонентів і збої в роботі електромагнітного клапана або заїдання голки розпилювача. Зазначені дефекти викликають порушення точності дозування палива, що, в свою чергу, призводить до змін процесу згоряння всередині камери.

Системи самодіагностики автомобілів фіксують відхилення в параметрах роботи форсунок, після чого блок управління двигуном починає коригувати час їх відкриття шляхом його збільшення або зменшення. При цьому навіть при виході характеристик форсунок за межі регульовального діапазону індикація несправностей на панелі приладів не здійснюється, що може сприяти продовженню експлуатації двигуна при підвищених навантаженнях протягом тривалого періоду часу. Даний алгоритм роботи ЕБУ характерний для багатьох дизельних двигунів з електронним управлінням впорскуванням.

Нерівномірна подача палива в усі циліндри двигуна стає причиною його нестабільної роботи на холостому ході, виникнення провалів в роботі окремих циліндрів і значного збільшення рівня вібрації агрегату. Екологічність дизельного двигуна та ефективність його роботи безпосередньо залежать від тиску подачі та якості розпилення палива, при цьому наявність твердих частинок у паливі призводить до швидкого переходу форсунок до несправного стану.

Під час технічного обслуговування паливної апаратури проводиться комплекс відновлювальних заходів, що включає як регулювання існуючих вузлів, так і заміну елементів, що вийшли з ладу, на нові. Для забезпечення працездатності та надійності системи живлення необхідне точне визначення технічного стану та своєчасне надання технічного впливу [7, 14, 23].

Ознаками зміни технічного стану системи живлення можна вважати підвищення витрати палива, підвищення токсичності відпрацьованих газів, зниження потужності та інше [7, 8, 11, 14, 23].

Паливна апаратура сучасного дизельного двигуна є складною технічною системою, надійність якої може бути оцінена через аналіз показників, що визначають відхилення вихідних параметрів від встановлених нормативних значень (основних технічних характеристик) [7, 8, 11, 14, 23].

У сучасних системах управління характеристиками подачі палива здійснюється програмним забезпеченням електронного блоку управління двигуном, яке націлене на оптимізацію процесів розпилення, змішування і згоряння палива для кожного конкретного режиму роботи агрегату [16].

Визначення оптимальних характеристик подачі палива є складним завданням, що вимагає врахування багатьох динамічно-змінних факторів. До таких параметрів належать тривалість впорскування палива і тиск палива, при цьому вимоги, що пред'являються до них, часто мають суперечливий характер.

Згідно з даними різних досліджень, паливна апаратура є одним з найбільш навантажених вузлів сучасного дизельного двигуна, схильним до високих механічних і термічних навантажень [7, 8, 11, 14, 16, 23-27].

Однією з основних ознак порушення зазначених процесів є підвищена витрата палива, що підтверджується результатами досліджень, згідно з якими перевитрата палива на автотранспортних підприємствах може становити до 40%. Це призводить до відповідного збільшення викидів з відпрацьованими газами. Такому перевитрачання можна запобігти при своєчасному виявленні зміни технічного стану паливної апаратури. Проаналізувавши статистичні дані про відмови і несправності, пов'язані з паливною апаратурою, можна зробити висновок про те, що більшість з них відносяться до паливних форсунок [23-24, 26].

На рис. 1.6 представлена статистика причин підвищення димності у дизельних автомобілів з системою Common Rail (у відсотках), заснована на аналізі даних сервісних центрів, технічних досліджень та експертних оцінок.

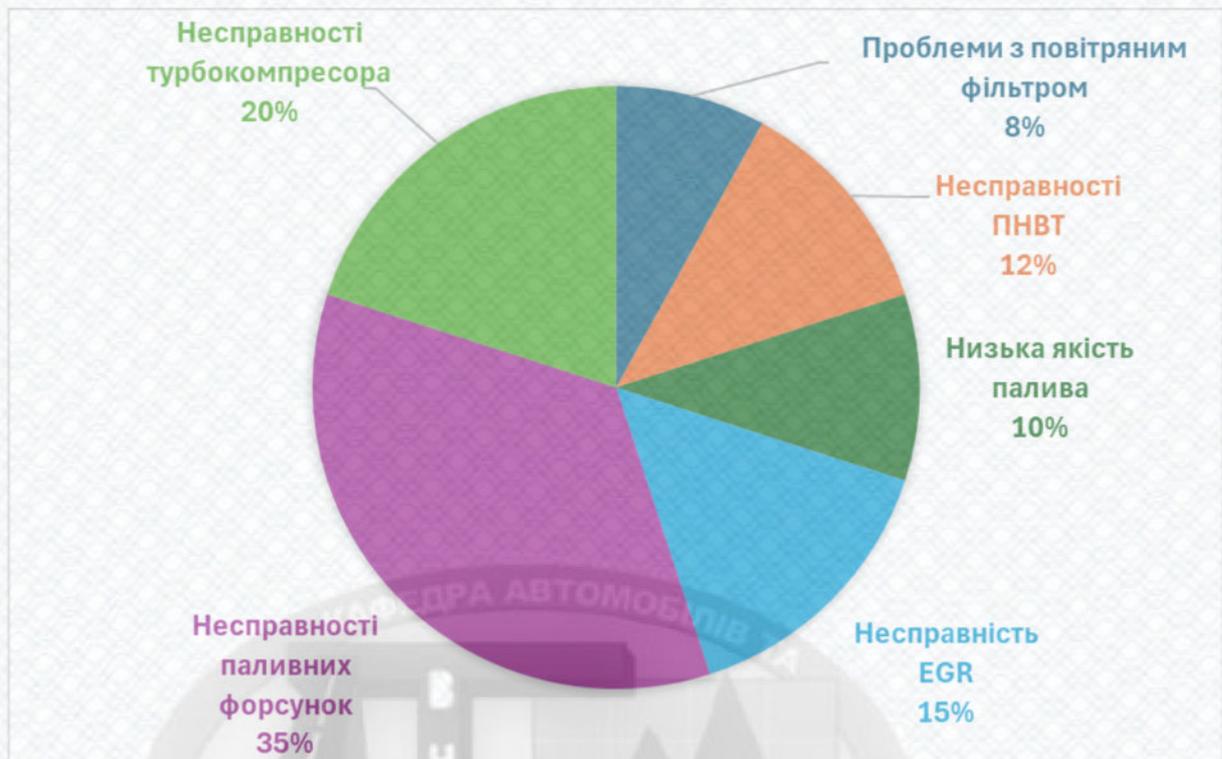


Рисунок 1.6 – Статистика причин підвищення димності у дизельних автомобілів із системою Common Rail

Несправності паливної апаратури умовно можна розділити на два види. При несправностях першого виду подальша експлуатація двигуна найчастіше неможлива. Прикладом може служити відмова ПНВТ, яка може виникнути з ряду причин:

- пошкодження розподільного вала;
- несправність підшипників кулачкового вала;
- задирки і заклинювання плунжерів ПНВТ;
- зріз шпонки шліцьової втулки приводу насоса та ін.

При несправностях другого виду можливе продовження експлуатації транспортного засобу, однак при цьому знижується потужність, погіршуються екологічні та економічні показники роботи двигуна. Згідно з дослідженням, проведеним в ХНАДУ, до 90% відмов паливної апаратури сучасних дизельних двигунів викликані експлуатаційними факторами – використання палива низької якості або палива з домішками або несвоєчасною заміною паливного фільтра.

Причинами несправності паливних форсунок у більшості випадків є:

1. при наявності електрогідравлічної форсунки – поломка електромагнітної котушки;
2. дефекти поверхонь керуючого клапана, як посадочних, так і замикаючих;
3. дефекти поверхні робочого конуса голки, а також місця посадки форсунки в розпилювачі;
4. утворення на поверхні розпилювача і корпусі керуючого клапана забруднень і відкладень;
5. термічні і кавітаційні порушення поверхні розпилювача;
6. порушення форми отворів розпилювача [8, 11, 13].

Згідно з результатами різних досліджень саме паливні форсунки є компонентом, що обмежує надійність сучасного дизельного двигуна [22].

1.3 Аналіз можливостей бортових і зовнішніх інструментів діагностування паливної апаратури Common Rail

Система керування двигуном (СКД) містить датчики, керуючий пристрій, виконавчі механізми (приводи) і підсистему подачі палива. Датчики призначені для видачі інформації в керуючий пристрій. Обов'язковою для будь-якої СКД є інформація:

- про положення колінчастого вала (верхньої мертвої точки 1-го циліндра) – ця інформація необхідна для визначення кута випередження запалювання (для бензинових двигунів) і кута випередження вприскування (для дизельних двигунів);
- про частоту обертання колінчастого вала, що впливає на коригування таких показників, підтримку обертів на холостому ході, дозування палива при гальмуванні і високих обертах, кут випередження вприскування;
- про кількість повітря, що всмоктується двигуном, що необхідно для формування складу паливно-повітряної суміші, а також для визначення навантаження на двигун;

- про температуру охолоджуючої рідини – для визначення температури двигуна;
- про температуру повітря – для розрахунку маси всмоктуваного повітря;
- про кількість надлишкового кисню у відпрацьованих газах – в системах із зворотним зв'язком за складом суміші та нейтралізатором відпрацьованих газів;
- про включення запалювання – для попереднього включення паливного насоса в більшості систем.

Можуть використовуватися і додаткові датчики. Так, наприклад, про температуру палива – в жарких країнах, про атмосферний тиск – у високогірних.

Керуючий пристрій служить для прийому, оцінки та обробки інформації від датчиків, розрахунку керуючих впливів та їх відправки на виконавчі механізми. Електронні керуючі пристрої, крім того, здійснюють адаптацію до стану двигуна, самодіагностику деяких параметрів самого керуючого пристрою, виконавчих механізмів і датчиків, а при деяких їх поломках забезпечують аварійний режим роботи двигуна, що дозволяє водієві без особливих проблем дістатися до найближчої СТОА.

ЕБУ часто називають контролером (control - англ. - управління). ЕБУ перших електронних систем впорскування палива (наприклад, L-Jetronic) були аналоговими. Сучасний контролер являє собою складний електронний цифровий мікропроцесорний пристрій. Він містить входи (АЦП), мікропроцесор, оперативну і постійну пам'ять (ОЗУ і ПЗУ), виходи (ЦАП і силові каскади), блок кодової самодіагностики. ПЗУ прошивається на заводі-виробнику і містить матриці паливодозування і запалювання конкретного двигуна, контрольні параметри датчиків, виконавчих механізмів і двигуна для порівняння їх з реальними, адаптації і видачі кодів самодіагностики в разі визнання невідповідності як поломки. Деякі датчики при поломці можуть бути «замінені» величинами, що витягуються з ПЗУ, однак ця «заміна» хоча і є істотною, але все ж має обмежений характер.

Так, наприклад, якщо опір датчика температури охолоджуючої рідини не відповідає температурі, але при цьому не вийшов за свої граничні межі, то контролер не визнає його несправним, і характеристики двигуна істотно

погіршуються. Тільки в разі виходу опору датчика за межі контрольованих параметрів, він визнається несправним і «замінюється» заздалегідь вписаною в ПЗУ постійною величиною, що відповідає прогрітому двигуну, тобто гарячий двигун буде працювати добре, але виникнуть проблеми з холодним пуском і прогріванням. Деякі просунуті системи виконують «заміну» для 400°C і 800°C, але це не знімає проблему в цілому.

Незважаючи на бурхливий розвиток засобів самодіагностики, вони також не вирішують проблему діагностики в цілому. Так, кодове діагностування здатне оцінити тільки невідповідність електричних параметрів, і то найчастіше в крайніх випадках (обрив, коротке замикання, вихід за контрольовані межі). У той же час характеристики системи багато в чому залежать від стану механічних і гідравлічних параметрів, не контрольованих системою самодіагностики. Так, наприклад, форсунка перевіряється тільки за параметром «опір обмотки», куди входить і стан ланцюга до обмотки. Разом з тим форсунка тільки тоді є справною, коли відповідає цілому ряду інших найважливіших параметрів: продуктивність, внутрішня і зовнішня герметичність по паливу, герметичність по повітрю, якість розпилу, струм включення, струм утримання, струм вимкнення та інші. Тобто, 90% параметрів залишається поза контролем з боку системи самодіагностики, і це стосується не тільки форсунок. Дуже часто, не маючи можливості описати непередбачену поломку, система самодіагностики видає не один, а кілька кодів одночасно, вказуючи на поломку багатьох вузлів, що вводить діагностів в оману. Навіть при видачі одного коду діагноз часто залишається невизначеним.

Своєчасна діагностика елементів системи живлення дозволяє знизити кількість викидів у навколишнє середовище, зменшити інтенсивність відмов і скоротити витрати на експлуатацію. Більша частина існуючих методів діагностування передбачає зняття форсунок з дизельного двигуна для перевірки на стенді, установку додаткового обладнання на лінію високого тиску, вимірювання в зворотній магістралі обсягу палива.

Для визначення показників циклової подачі палива використовуються прямий і мензурочний методи. При цьому неточності, пов'язані з другим з них,

обумовлені паливним осадом на стінках мензурок, утворенням піни, а також тим, що при знятті показань можлива суб'єктивна інтерпретація результатів.

Прямий (безмензурочний) метод забезпечує більш високу точність результатів; витратомір, що використовується при застосуванні даної методики, може бути або об'ємним, або поршневим, причому в другому випадку обладнанню притаманний ряд недоліків, таких, як високий рівень інерційності (внаслідок чого окремі впорскування не можуть відстежуватися) і впорскування тестової рідини при опорі середовища через атмосферний тиск. Оцінка безперебійності подачі ускладнена через інерційність, тобто показники циклової подачі визначаються тільки за середнім значенням. Оцінка показників впорскування за допомогою об'ємних витратомірів здійснюється за рахунок подачі тестової рідини в замкнуту ємність, заповнену тестовою рідиною, стисливість якої і забезпечує функціонування витратоміра. У камері такий витратомір створює при впорскуванні близький до показників циліндра протитиск, що дозволяє отримати точні результати за рахунок наближеності стендових умов роботи форсунки до умов в ході експлуатації двигуна. Швидкодія таких витратомірів дає можливість визначати безперебійність циклу подачі, одночасно виявляючи недоліки функціонування форсунок.

Ті ж рішення використовуються на діагностичних стендах для оцінки форсунок паливної системи «Common Rail», конструкція яких в більшості випадків включає наступні елементи:

- ПНВТ з електроприводом;
- ємність для тестової рідини (бак);
- високоточний витратомір (електронний);
- контролер, оснащений ПЗ для створення імпульсів, що подаються на форсунки;
- обладнання, що забезпечує стабілізацію температурних показників.

Основна функція такого обладнання полягає у визначенні під час функціонування форсунок ключових показників, а саме: продуктивності, швидкодії, характеристик сигналу, що подається на електромагнітний клапан

управління, витрати палива на управління, опору обмотки котушки клапана, температури палива при перепуску, тривалості затримки при спрацьовуванні клапана. Форсунки управляються за рахунок генерування створюваних і керованих за допомогою спеціального програмного забезпечення силових імпульсів (тобто управління здійснюється з ПК). У представленій системі клапани тиску і витрати управляються незалежним регулятором [13].

Крім діагностування паливної апаратури на стендах у різних дослідженнях зустрічаються також і інші методи без зняття форсунок з двигуна [11]. Для реалізації цих методів застосовують поєднання діагностичного сканера і різних комплектів для діагностування систем Common rail, наприклад, комплекс для діагностування «Common Rail Tester» [15-16].

Також у різних дослідженнях описується газоаналітичний метод діагностування паливоподаючої апаратури дизеля [13]. У цьому методі технічний стан паливної апаратури визначається за показниками димності та вмісту CO₂ у відпрацьованих газах.

У роботі [7] запропоновано методику діагностування п'єзоелектричних форсунок без демонтажу, за допомогою аналізу наступних діагностичних параметрів:

- корекція циклової подачі палива;
- калібрування нульової подачі;
- параметри керуючого імпульсу;
- опір форсунки;
- витрата палива на керування.

Схожі з перерахованими вище розбірні та безрозбірні методи описуються також у працях [2, 4, 10, 21, 23]. Слід зазначити, що кожен з цих методів вимагає зняття автомобіля з лінії, проведення робіт зі зняття та встановлення паливної апаратури або додаткового обладнання, або перевірку автотранспортного засобу на спеціальних стендах, що тягне за собою додаткові витрати, а також може знижувати ресурс елементів паливної апаратури.

Тому для автомобілів потрібен новий підхід до визначення технічного стану паливних форсунок, що забезпечує дотримання вимог до димності відпрацьованих газів і не передбачає виведення транспортного засобу з експлуатації. Цей підхід може бути реалізований за допомогою методу, в основу якого покладено безперервний контроль параметрів, що використовуються електронним блоком управління двигуном. Таким чином, зазначений метод ґрунтується на дослідженні залежності параметрів подачі палива від характеристик розпилювача паливної форсунки.

1.4 Загальна характеристика ТОВ «АТП Слободянюк»

Автотранспортне підприємство ТОВ «АТП Слободянюк» було засновано її власником Слободянюком Олександром Андрійовичем 26 грудня 2000 року. Воно розташоване в м. Вінниця по вул. Салтикова-Щедріна, 112.

Основною діяльністю ТОВ «АТП Слободянюк» є виконання міських, приміських та міжміських автобусних перевезень у м. Вінниці та Вінницькій області, перевезення на замовлення. Крім того АТП надає іншим дрібним пасажирським перевізникам послуги з планування, диспетчеризації та передрейсового контролю технічного стану транспортних засобів і медичного контролю водіїв.

Крім основного виду діяльності ТОВ «АТП Слободянюк» надає послуги з ТО і ремонту автомобілів; займається продажем автомобільної техніки, запасних частин і приналежностей до автомобільної техніки.

З 2006 року ТОВ «АТП Слободянюк» є офіційним дилером "ІСУЗУ-АТАМАН УКРАЇНА" та здійснює продаж, ТО, ремонт та гарантійне обслуговування автобусів "АТАМАН" (раніше «Богдан») та вантажівок "ISUZU". З 2009 року АТП розвинуло мережу з продажу запчастин до автомобілів "ISUZU" та займає лідерські позиції на території України.

Для виконання перевезення пасажирів на Міських, міжміських та приміських маршрутах переважно використовують автобуси малого класу марки Ataman. Крім того використовуються автобуси Mercedes Sprinter/

Організаційна структура «АТП Слободянюк» налічує в собі службу експлуатації, службу управління, технічну службу та бухгалтерський відділ (рис. 1.7).

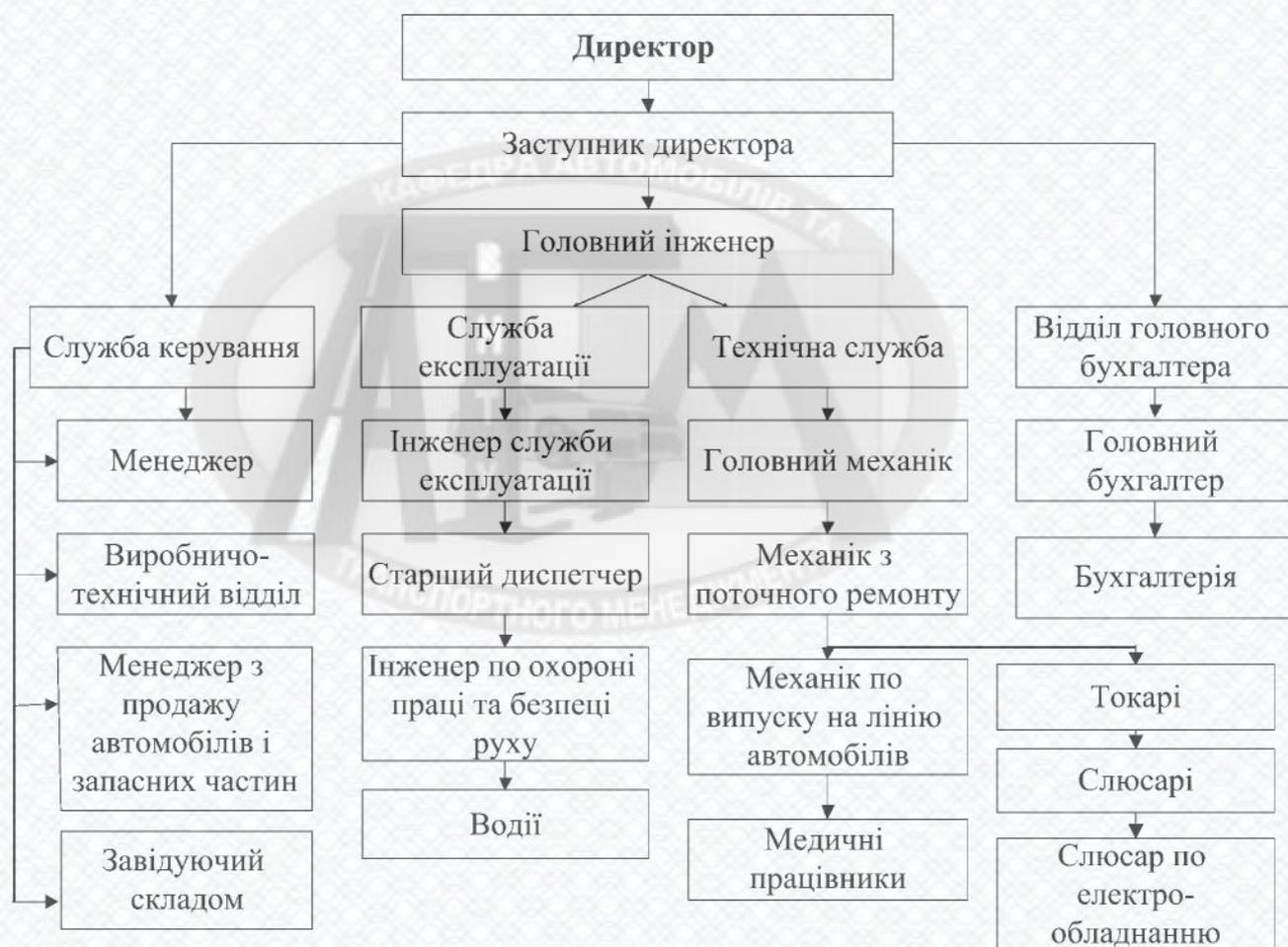


Рисунок 1.7 – Організаційна структура управління ТОВ «АТП Слободянюк»

1.5 Аналіз і оцінка стану виробничо-технічної бази АТП

Територія АТП являє собою ділянку неправильної форми, розташоване за адресою м. Вінниця по вул. Салтикова-Щедрина, 112. Загальна площа території АТП складає 0,96 га. Коефіцієнт забудови складає близько 20%, проїзди, проходи,

стоянки та ін. майданчики займають близько 50%, зелені насадження – близько 30%. Основне покриття земельної ділянки – асфальтобетон, рельєф місцевості – рівнинний.

Виробничо-технічна база підприємства має такі складові:

- ремонтна майстерня, в якій знаходяться зони та дільниці, які виконують операції з ТО і ПР автобусів (576 м²);
- чотири тупикових оглядових канами;
- агрегатний цех;
- слюсарний цех;
- відкрита стоянка автобусів (1012 м²);
- адміністративні та побутові приміщення (96 м²);
- допоміжні приміщення (357 м²);
- склад (570 м²).

На оглядових канавах проводяться роботи по ТО-1, ТО-2, ПР автобусів, які працюють на АТП, а також відбувається обслуговування автобусів і автомобілів як окрема послуга.

Пости ТО та ПР – універсальні, обладнані оглядовими канавами, забезпечені обладнанням та інструментом. Пости розташовані під кутом 90° до осі проїзду. Обладнання зони ТО і ПР автобусів має значний термін використання і має певне зношування. Більшість робіт на підприємстві виконується фактично вручну, тобто без наявного спеціалізованого технологічного обладнання, частково роботу по ремонту та обслуговуванню автобусів виконують самі водії автобусів.

Контрольно - технічний пункт має:

- приміщення для механіка технічного стану транспортних засобів;
- навіс і оглядову канаву для огляду транспортних засобів.

Для забезпечення підприємства водою використовується місцева комунікаційна мережа з технічною та питною водою. Електропостачання від мережі 400/230 В.

Аналіз основного технологічного обладнання зон та дільниць показує невисоку забезпеченість АТП високопродуктивним спеціалізованим обладнанням,

що призводить до низьких показників механізації робіт. Наявне обладнання має певне зношення. Прибирально-мийні роботи виконуються на відкритому майданчику.

Зберігання автобусів здійснюється на відкритому майданчику без підігріву. Автобуси розташовуються під кутом 90° до осі проїзду, із незалежним виїздом.

Аналіз стану ВТБ показує, що:

- площі зон і ділянок цілком задовольняють потреби підприємства;
- зони і ділянки АТП недостатньо укомплектовані сучасним технологічним обладнанням та спеціалізованим устаткуванням. Забезпеченість ручним інструментом на гарному рівні;
- частина наявного обладнання потребує заміни на більш сучасне та ефективне.

1.6 Висновки

1. Основними причинами, що знижують екологічні показники експлуатації автомобільних транспортних засобів з дизельними двигунами, є несправності паливної апаратури, зокрема – несправності паливних форсунок. До 80% сучасних автомобілів з дизельними двигунами, що знаходяться в експлуатації, обладнані системою подачі палива Common Rail. Це по-требує часткового демонтажу основних елементів конструкції перед проведенням діагностування для підключення додаткових механізмів або монтажу компонентів системи подачі палива на діагностичні стенди, що також передбачає значні простої.

2. Обладнання, що використовується для діагностування систем подачі палива Common Rail, не забезпечує необхідної точності показань, а бортові системи самодіагностики можуть допускати експлуатацію автомобіля з несправностями паливної системи без їх індикації.

3. Перспективним напрямком у даній сфері є удосконалення методів підвищення екологічної безпеки, що запобігає порушенню вимог до димності

відпрацьованих газів під час експлуатації автомобільного транспорту з дизельними двигунами, заснованого на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком управління двигуном.

4. Виконавши аналіз структури і стану ВТБ ТОВ «АТП Слободянюк», можна зробити висновок, що темпи розвитку наявної ВТБ відстають від темпів розвитку рухомого складу. Це вимагає проведення удосконалення наявної ВТБ як для підвищення експлуатаційної надійності власних автобусів і забезпечення можливостей надання автосервісних послуг, так і для отримання можливостей обслуговування перспективних автомобільних конструкцій.



2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ДИЗЕЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ

2.1 Концепція методу забезпечення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів

Забезпечення екологічної безпеки транспортних засобів (ЕБТЗ) є ключовим завданням сталого розвитку, що вимагає комплексного підходу до мінімізації антропогенного впливу. В умовах зростання кількості транспортних засобів та посилення екологічних норм необхідність системного підходу до аналізу ЕБТЗ стає все більш актуальною. У зв'язку з цим було проведено системний аналіз факторів забезпечення екологічної безпеки транспортних засобів. Їх декомпозиція наведена на рисунку 2.1.

В рамках методології системного аналізу ключові фактори ЕБТЗ декомпонуються на три підсистеми, що формують 5 множин параметрів:

1. Параметри, пов'язані з поведінкою та навичками оператора транспортного засобу (у традиційній термінології – водія) представлені групою параметрів $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$;

2. Структурні параметри, що характеризують технічний стан двигуна, представлені групою параметрів $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;

3. Параметри, що використовуються електронним блоком управління, які є інтерпретацією множини параметрів X , представлені групою параметрів $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$;

4. Керуючі впливи, що формуються електронним блоком управління для впливу на виконавчі механізми, представлені групою параметрів $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$;

5. Умови експлуатації та зовнішнього середовища представлені групою параметрів $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$.

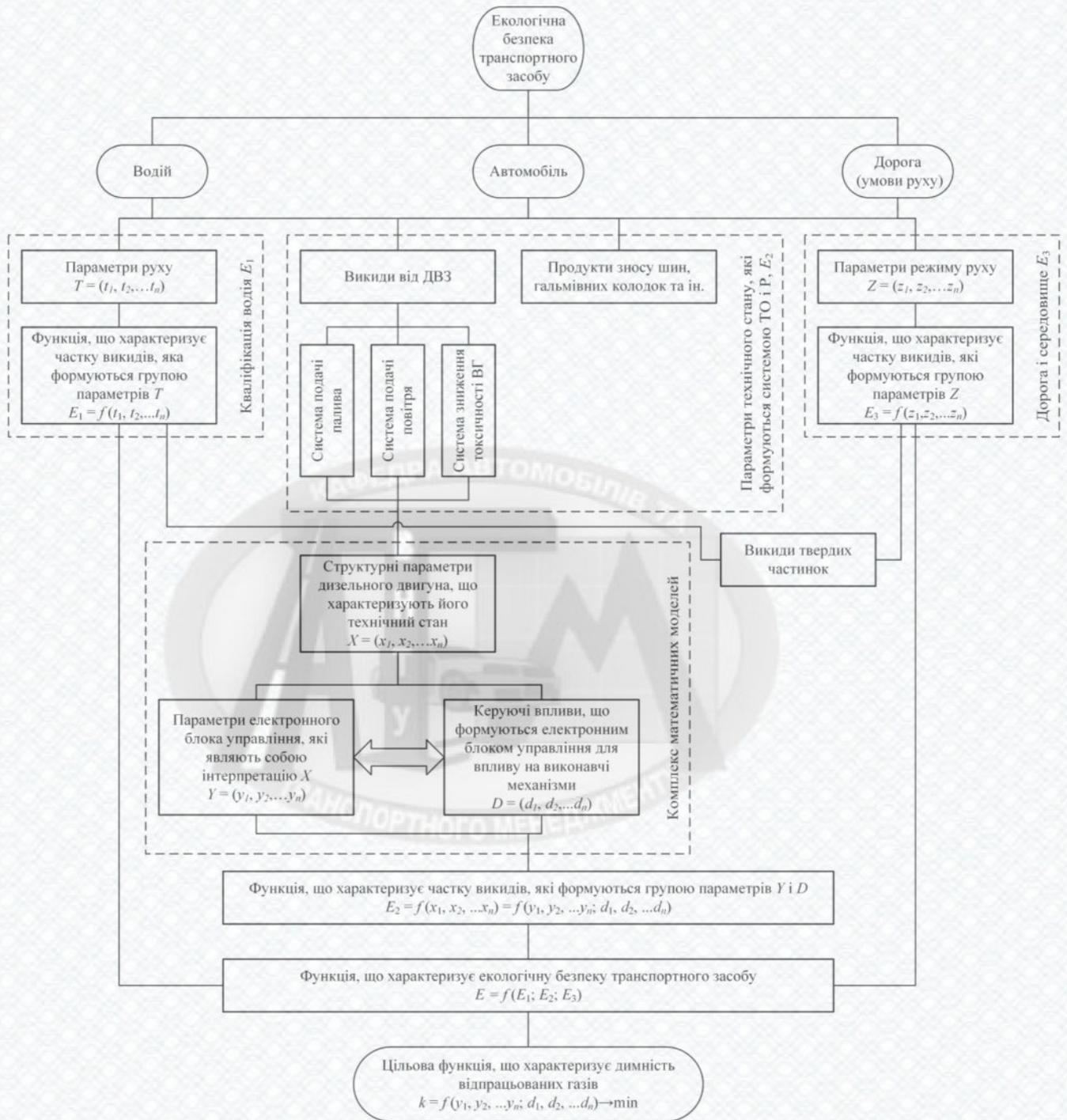


Рисунок 2.1 – Декомпозиція екологічної безпеки транспортних засобів

Представлені групи параметрів дозволяють описати 3 підсистеми ЕБТЗ за допомогою функцій E_1, E_2, E_3 .

Підсистема E_1 – водій має значний вплив на ЕБТЗ через вибір режимів руху та дотримання ПДР. Підсистема E_1 описується функцією $E_1 = f(t_1, t_2, \dots, t_n)$. Основні параметри цієї групи представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри групи параметрів Т

№	Значення параметра	Опис та вплив
t_1	Швидкість руху	Зростання сил опору руху в міру збільшення швидкості (>80 км/год) призводить до збільшення витрати палива на 10–15%
t_2	Прискорення/гальмування	Часті різкі маневри підвищують знос гальмівних колодок на 20%
t_3	Стиль водіння	Різкі прискорення на 15–20% підвищують викиди NO_x
t_4	Використання інтелектуальних систем допомоги водієві (ADAS)	ADAS забезпечують рух у встановлених режимах, зменшуючи викиди на 8–10%
t_5	Вибір швидкісного режиму та дистанції	Порушення дистанції збільшує частоту гальмувань (t_2).
t_6	Використання допоміжних засобів	Навігатори з економічними маршрутами скорочують пробіг на 5–7%.
t_7	Час водіння	Втома водія знижує контроль над t_1 – t_6 .
t_8	Планування маршруту	Попереднє планування маршруту знижує тривалість простоїв на холостому ході (z_2).
t_9	Використання ручного режиму передач	Збільшує контроль над обертами двигуна (y_3).
t_{10}	Прискорення/гальмування	Постійне гальмування/прискорення підвищує знос шин (x_5) на 15%.
t_{11}	Дотримання правил екологічного водіння	Еко-режим знижує навантаження на ДВЗ, призводить до зниження (y_1 – y_7) і зменшує димність

Низька кваліфікація водія корелює з неоптимальним управлінням параметрами t_1 – t_{11} . Навчання екологічному водінню (Eco-Driving) знижує викиди CO_2 на 12–18%. Наприклад, дотримання режиму t_{11} (екологічне водіння) дозволяє мінімізувати різкі прискорення (t_2), що знижує y_1 - тривалість впорскування і знижує димність відпрацьованих газів на 3-10%.

Підсистема E_3 - умови руху в вулично-дорожньому середовищі, сформовані зовнішніми факторами, що впливають на ЕБТЗ. Підсистема представлена функцією $E_3 = (z_1, z_2, \dots, z_n)$. Найбільш значущі параметри цієї підсистеми представлені в таблиці 2.2. Підсистеми E_3 і E_2 взаємодіють між собою. Наприклад, параметри z_1 (якість покриття) і z_6 (ухил) підсилюють знос шин (x_5) і турбокомпресора (x_3). Погодні умови (z_3) знижують ефективність каталітичних

нейтралізаторів, що відбивається в y_6 (температура впускного повітря). Наприклад, в морозну погоду ($z_3 < 0^\circ\text{C}$) температура впускного повітря (y_6) падає нижче 40°C , що погіршує згоряння палива і підвищує димність на 15%. Аналогічним чином взаємодіють E_1 з E_2 і E_1 з E_3 .

Таблиця 2.2 – Основні параметри групи параметрів Z

№	Значення параметра	Опис та вплив
z_1	Якість покриття	Нерівності дороги збільшують опір коченню на 10–15%.
z_2	Інтенсивність трафіку	Затори збільшують час холостого ходу, підвищуючи викиди CO на 25%
z_3	Погодні умови	Обледеніння призводить до збільшення навантаження на ДВЗ, підвищуючи витрату палива на 10%.
z_4	Ширина смуги	Звуження дороги підсилює t_2 (різкі маневри).
z_5	Ухил дороги	Круті підйоми ($>10\%$) збільшують навантаження на ДВЗ.
z_6	Щільність населення	В урбанізованих зонах затори (z_2) виникають частіше
z_7	Рівень шуму	Високий рівень шуму (>80 дБ) збільшує t_7 (втома водія).
z_8	Стан освітлення	Недостатнє освітлення дороги підвищує частоту гальмування (t_2).
z_9	Наявність смуг розгону/гальмування	Оптимізує t_3 (стиль водіння) і знижує знос шин (x_5).

Підсистема E_2 – Автомобіль – являє собою сукупність параметрів, що характеризують технічний стан дизельного двигуна. Можна відзначити, що ці параметри є структурними параметрами і, як правило, вимагають порівняно великих витрат часу і спеціального, як правило, дорогого, обладнання для їх вимірювання. У деяких випадках вимагають часткового або повного розбирання агрегату для їх вимірювання. До цієї групи можна віднести групу параметрів $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Основні параметри цієї групи для дизельних двигунів представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні параметри групи параметрів X

№	Значення параметра	Опис та вплив
x_1	Знос форсунок	Знижує точність дозування
x_2	Компресія двигуна	Зниження компресії підвищує димність відпрацьованих газів.
x_3	Стан турбіни	Знос турбіни знижує ККД дизельного ДВЗ на 5–8%
x_4	Ефективність EGR	Недостатня рециркуляція відпрацьованих газів підвищує NOx на 20–30%.
x_5	Знос шин	Питома емісія мікрочастинок гуми становить до 50% від загального забруднення атмосфери твердими частинками
x_6	Стан сажового фільтра (DPF)	Стан DPF при його наявності визначає кількість викидів і впливає на тиск відпрацьованих газів в системі випуску
x_7	Температура охолоджуючої рідини	Зниження нижче 80°C погіршує згорання.
x_8	Тиск палива в Common rail	Зниження тиску погіршує розпилення палива
x_9	Стан паливного фільтра	Засмічення фільтра впливає на тиск в рампі (y_2).
x_{10}	Знос поршневої групи	Знижує герметичність циліндрів, збільшуючи кількість продуктів неповного згорання палива
x_{11}	Стан випускної системи	Засмічення елементів випускного колектора збільшує зворотну тягу, підвищуючи навантаження на двигун.

З огляду на вищесказане, раціонально переходити до оцінки значення X непрямым способом з використанням діагностичних параметрів, що використовуються електронним блоком управління. Параметри, що використовуються електронним блоком управління, представлені групою параметрів $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, формуються після перетворення сигналів, отриманих електронним блоком управління від датчиків системи управління двигуном. Ці параметри визначають характер керуючих впливів, що формуються електронним блоком управління, що визначає режим роботи. Керуючі впливи визначаються керуючими сигналами, які представлені групою параметрів $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$. Основні параметри груп Y і D для дизельних двигунів представлені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні параметри груп параметрів Y і D

№	Значення параметра	Опис та вплив
y_1	Тиск палива у Common rail	Визначає якість розпилення
y_2	Частота обертання колінчастого валу двигуна	Впливає на газодинаміку та повноту згоряння палива
y_3	Тиск у впускному колекторі	Визначає кількість палива (d_1) і регулювання наддуву (d_3).
y_4	Температура впускного повітря	Визначає температуру робочої суміші та ефективність згоряння
y_5	Вміст кисню в відпрацьованих газах	Показання датчика кисню впливають на коректність роботи системи рециркуляції відпрацьованих газів і на правильність утворення суміші
y_6	Положення педалі акселератора	Визначає d_1 і d_3 , які формують значення y_2 і y_3 .
d_1	Час впорскування	Залежить від продуктивності форсунок, стану соплових отворів, тиску в рампі тощо.
d_2	Пропорційність EGR	20–25% для Євро-4.
d_3	Режим роботи турбіни	Визначає d_1 .
d_4	Регулятор тиску ПНВТ	Визначає y_1

Таким чином підсистеми E_1 , E_2 і E_3 можна представити у вигляді функцій E_1 , E_2 і E_3 :

$$E_1 = f(t_1, t_2, \dots, t_n), \quad (2.1)$$

$$E_2 = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n), \quad (2.2)$$

$$E_3 = f(z_1, z_2, \dots, z_n). \quad (2.3)$$

З урахуванням результатів декомпозиції можна представити рівень екологічної безпеки E як функцію:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = f(t_1, t_2, \dots, t_n; y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n; z_1, z_2, \dots, z_n). \quad (2.4)$$

Проведене дослідження дозволяє стверджувати, що група параметрів E_2 (автомобіль) є домінуючим фактором у забезпеченні екологічної безпеки транспортних засобів експлуатаційними методами, оскільки його параметри

безпосередньо контролюються в процесі технічної експлуатації. Системний аналіз дозволив виявити, що параметри E_2 (наприклад, знос форсунок) безпосередньо визначають рівень викидів РМ-частинок і NO_x . Гілки E_1 і E_3 мають опосередкований вплив, посилюючи негативні ефекти параметрів E_2 . Наприклад, висока інтенсивність трафіку (z_2) призводить до збільшення часу холостого ходу, що погіршує ефективність роботи ЕБУ (d_2 - пропорційність EGR) і підвищує викиди CO .

Тоді цільову функцію, що оцінює димність відпрацьованих газів, можна представити як:

$$k = f(y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n). \quad (2.5)$$

Таким чином підтверджується гіпотеза, що підсистема E_2 (автомобіль) є ключовим фактором ЕБТЗ. Параметри механічних компонентів ($x_1, x_2 \dots x_n$) і ЕБУ ($y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n$) безпосередньо контролюються в процесі експлуатації, що дозволяє ефективно впливати на рівень викидів. Гілки E_1 (водій) і E_3 (дорога) підсилюють негативний вплив, але їх вплив є вторинним. Для теоретичного підтвердження результатів декомпозиції та точного визначення виду математичних залежностей необхідна розробка комплексу математичних моделей, що описують вплив параметрів, які використовуються електронним блоком управління ($y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n$) на димність відпрацьованих газів.

Тоді комплекс математичних моделей, що описують взаємозв'язок значень параметрів, використовуваних блоком управління двигуном, з димністю відпрацьованих газів можна представити у вигляді схеми, наведеної на рисунку 2.2.

У даному комплексі 1 – моделі, що обумовлюють взаємозв'язок між конструктивними параметрами, що характеризують знос форсунки, і параметрами, що використовуються електронним блоком управління, 2 – моделі, що обумовлюють взаємозв'язок між параметрами, що характеризують знос форсунки, і параметрами, що характеризують подачу палива і якість його розпилення, 3 – моделі, що обумовлюють взаємозв'язок конструктивних параметрів з димністю

відпрацьованих газів, 4 – моделі, що обумовлюють взаємозв'язок параметрів, що використовуються електронним блоком управління, і димністю відпрацьованих газів.

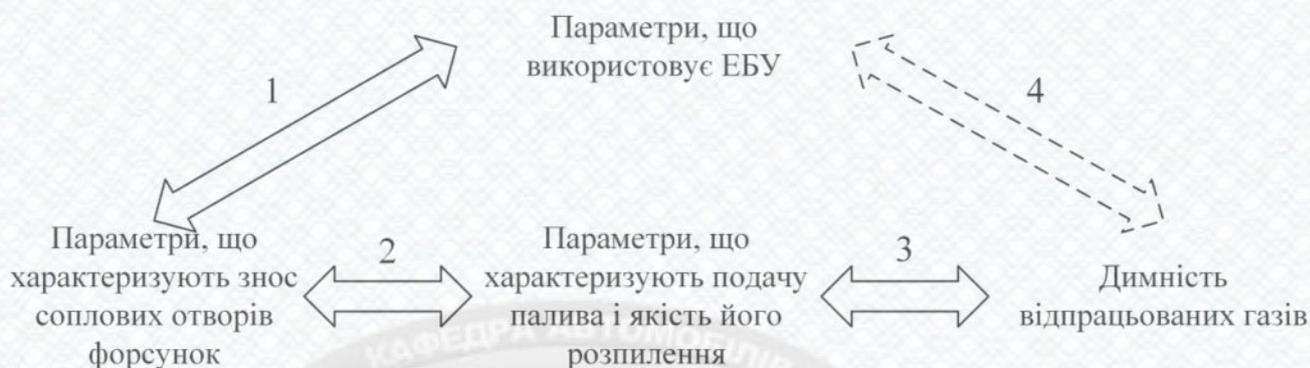


Рисунок 2.2 – Схема комплексу математичних моделей, що описують взаємозв'язок значень параметрів, використовуваних блоком управління двигуном, з димністю відпрацьованих газів

Комплекс передбачає перехід від 1, 2 і 3 типу моделей до розробки моделей 4 типу. Саме вони дозволять реалізувати метод підвищення екологічної безпеки АТС, що запобігає порушенню вимог до димності відпрацьованих газів при експлуатації автомобільного транспорту з дизельними двигунами, заснований на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком управління двигуном.

2.2 Комплекс математичних моделей у методі підвищення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів з дизельними двигунами

2.2.1 Обґрунтування залежності параметрів подачі палива від характеристик розпилювача форсунки

Закономірності, що описують впорскування палива з традиційних форсунок, справедливі і для електрогідравлічних форсунок системи Common rail. Тоді

закономірність витікання палива з відкритої форсунки можна відобразити за допомогою рівняння [22]:

$$p_{\text{рамп}} - p_{\text{цил}} = \frac{Q_{\phi}^2 \cdot \rho_m}{2(\mu_c \cdot f_c)}, \quad (2.6)$$

де $p_{\text{рамп}}$ – тиск палива в паливній рампі, (Н/м²);

$p_{\text{цил}}$ – тиск у циліндрі, (Н/м²);

Q_{ϕ} – об'ємна витрата палива, (м³/с);

ρ_m – густина дизельного палива;

μ – коефіцієнт витрати через перерізи отворів розпилювачів форсунки,

f – площа поперечних перерізів отворів розпилювачів форсунки, (м²).

Рівняння залежності об'ємної витрати палива через отвори розпилювачів форсунки:

$$Q_{\phi} = \mu_c \cdot f_c \sqrt{2 \cdot \frac{p_{\text{рамп}} - p_{\text{цил}}}{\rho_m}} = \mu_c \cdot f_c \cdot \vartheta_m, \quad (2.7)$$

де ϑ_m – теоретична швидкість витікання палива.

Тоді, згідно з рівнянням (2.7), кількість поданого палива пов'язана із зносом форсунки через добуток площі соплових отворів на коефіцієнт витрати палива через сопло – ефективним прохідним перетином [$\mu \cdot f$]. Коефіцієнт витрати палива через сопло μ як правило приймає значення в діапазоні від 0,6 до 0,8 і представляє співвідношення дійсної і теоретичної витрати палива. Однак на практиці найчастіше визначається емпіричним шляхом і в загальному вигляді виражається у вигляді залежності, яка представлена нижче:

$$\mu_i = a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 + a_{i5}x_5 + a_{i6}x_6, \quad (2.8)$$

де a_{i1}, \dots, a_{i6} – регресійні коефіцієнти: x_1 – площа сопла, x_2 – діаметр сопла, x_3 – перепад тиску між корпусом форсунки і циліндром, x_4 – відношення динамічної в'язкості до густини палива, x_5 – температура палива, x_6 – параметр, що характеризує значення числа Рейнольдса.

2.2.2 Обґрунтування залежності параметрів, що характеризують якість розпилення палива, від характеристик розпилювача форсунки

Дослідження в області розпилення палива в циліндрах дизельних двигунів наводяться в [7, 21-23]. Однією з основних характеристик, що застосовуються в розрахунках, є середній діаметр крапель за Заутером, який пропорційний відношенню сумарного об'єму всіх крапель до їх сумарної поверхні

$$d_z = \frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i d_i^2}, \quad (2.9)$$

де d_i – зовнішній діаметр крапель певного розміру;

N_i – кількість крапель з таким діаметром/

Середній діаметр крапель за Заутером розраховується виходячи з умови рівності поверхонь і об'ємів (мас) крапель реального факела розпилю і гіпотетичних крапель середнього розміру. Цей параметр відіграє ключову роль в оцінці загальної поверхні розпилення. Якість розпилення, що характеризується середнім діаметром Заутера, відображає діаметр крапель однорідного туману, який для заданого об'єму рідини створює таку ж площу поверхні випаровування, як і реальний туман. Аналіз наукових робіт [19, 20, 22, 23] дозволяє виділити основні фактори, що істотно впливають на якість розпилення палива. До них відносяться зниження в'язкості і коефіцієнта поверхневого натягу палива, збільшення перепаду тиску в сопловому отворі, зміна тиску середовища, розмір сопла. Фізичними причинами поділу

струменя палива на окремі краплі є такі явища, як капілярний натяг, коливальні процеси всередині струменя і швидкість витікання палива.

Розпилення палива залежить від числа Вебера і Рейнольдса:

$$W_e = \frac{\Delta P \cdot d_c}{\sigma}, \quad (2.10)$$

$$R_e = \frac{\vartheta \cdot d_c}{\nu}, \quad (2.11)$$

де ΔP – перепад тиску (Н/м^2) в сопловому отворі і середовищі, куди здійснюється впорскування;

d_c – діаметр соплового отвору, м;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м ;

ϑ – середня швидкість руху рідини (м/с);

ν – кінематична в'язкість рідини ($\text{м}^2/\text{с}$).

Безрозмірний критерій Лапласа також пов'язує між собою параметри, що впливають на якість розпилення:

$$L_p = \frac{\rho_m \cdot d_c \cdot \sigma}{\mu_m}, \quad (2.12)$$

де μ_m – коефіцієнт динамічної в'язкості палива, $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$.

Оскільки вимірювання розміру крапель у камері згоряння є витратним і трудомістким процесом, то раціонально буде застосовувати емпіричну формулу, відповідно до якої середній діаметр крапель можна представити у вигляді:

$$d_z = d_c \cdot b_1 \left(\frac{\rho_g W_e}{\rho_m} \right)^{b_2} \cdot L_p^{b_3}, \quad (2.13)$$

де $b_1 \dots b_3$ – емпіричні коефіцієнти.

Згідно з виразом (2.7) якість розпилення палива в циліндрі залежить від діаметра соплових отворів. Тобто в міру зносу форсунок розмір крапель буде збільшуватися, а значить, буде знижуватися повнота згоряння палива.

2.2.3 Обґрунтування введення діагностичного параметра – тривалості впорскування палива – що залежить від зносу соплових отворів паливної форсунки

Згідно з рівнянням (2.7), блок управління двигуном, для контролю Q_{ϕ} , може впливати тільки на тривалість впорскування $\tau_{впр}$. Отже, тривалість впорскування $\tau_{впр}$ є параметром, значення якого електронний блок управління двигуном змінює у відповідь на зміну $\mu * f, p_{рамп}, p_{цил}$. Справність інших елементів паливної апаратури передбачає знаходження значень тиску палива в рампі в певному діапазоні, стан циліндропоршневої групи можна охарактеризувати масовою витратою повітря або тиском у впускному колекторі (дані можна отримувати з бортової системи самодіагностики), тоді можна розглядати циклову подачу як:

$$Q_{\phi} = f(\tau_{впр}). \quad (2.14)$$

Тоді тривалість впорскування для форсунок з урахуванням параметрів, що характеризують якість розпилювання та розмір крапель, можна описати за допомогою наступного виразу (справедливого як для механічних, так і для електрогідравлічних паливних форсунок системи Common Rail):

$$\tau_{впр} = (a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 + a_{i5}x_5 + a_{i6}x_6) \frac{4n}{\pi} \times$$

$$\times \left(\frac{d_z}{b_1 \left(\frac{\rho_g W_e}{\rho_m} \right)^{b_2} \cdot L_p^{b_3}} \right)^2 \sqrt{2 \cdot \frac{|P_{рамн} - P_{цил}|}{\rho_m}} / Q_{ц} \quad (2.15)$$

Таким чином обґрунтовано діагностичний параметр, що залежить від зношування соплових отворів розпилювача форсунки.

2.2.4 Обґрунтування залежності димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості упорскування палива

Огляд способів моделювання процесу сажеутворення і розрахунку кількості сажі у відпрацьованих газах дизельного двигуна показало, що основними факторами, що впливають на кількість сажі, є маса або об'єм палива, яке фактично потрапило у циліндр (залежить від величини циклової подачі), середній діаметр крапель, швидкість потоку повітря і його кількість, швидкість потоку повітря і його, процесі експлуатації транспортного засобу чи опосередковано враховані у рівнянні (2.15). Також встановлено, що наслідком зношування форсунки є збільшення кількості палива, що фактично потрапило у циліндр при тому ж часі відкриття форсунки. При цьому при зменшенні діаметра соплового отвору кількість палива, що фактично надійде, буде знижуватися (при закоксуванні сопла). Таким чином, з урахуванням виразу (2.15) можна описати концентрацію сажі як функцію:

$$k = f \left(\tau_{впр}; P_{абс}; P_{рамн}; N_{обр}; EGR_{rate}; \frac{dN}{dt}; T_{ен} \right), \quad (2.16)$$

де p_{abc} – значення абсолютного тиску у впускному колекторі (Н/м²);

$N_{обр}$ – частота обертання колінчастого валу (об/хв);

EGR_{rate} – пропорційність відкриття клапана рециркуляції відпрацьованих газів;

$\frac{dN}{dt}$ – швидкість зміни обертів;

T_{en} – температура впускного повітря.

Рівняння (2.16) у свою чергу може бути представлене у вигляді регресійної моделі:

$$PM = k_0 \cdot \tau_{впр}^{a_1} \cdot N_{обр}^{a_2} \cdot p_{abc}^{a_3} \cdot p_{рамн}^{a_4} \cdot EGR_{rate}^{a_5} \cdot e^{a_6 T_{en}} \cdot \left(1 - \frac{dN}{dt}\right)^{a_7} + b_0, \quad (2.17)$$

де $k_0, b_0, a_1 \dots a_7$ - регресійні коефіцієнти.

Згідно з деякими дослідженнями [7, 13, 22] можна розраховувати кількість шкідливих викидів з відпрацьованих газів за допомогою невеликої кількості діагностичних параметрів та введенням емпіричних коефіцієнтів, які отримують після проведення експерименту.

Слід врахувати, що вимірювання димності проводиться в режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна, в якому деякі параметри можна прийняти як константи. Також необхідно перетворити концентрацію сажі на димність, для чого необхідно ввести базовий коефіцієнт перерахунку, тоді:

$$k = k_{II} \left(k_0 \cdot \tau_{впр}^{a_1} + b_0 \right), \quad (2.18)$$

де k – димність відпрацьованих газів, (м⁻¹);

k_{II} – базовий коефіцієнт перерахунку димності, (м⁻¹/(мг/м³)).

Значення емпіричних коефіцієнтів досліджуваного двигуна можна отримати, застосувавши метод регресійного аналізу. Суть регресійного аналізу зводиться до встановлення рівняння регресії, тобто виду кривої, що характеризує зв'язок між

величинами (аргументом $\tau_{\text{впр}}$ і функцією k), оцінці тісноти зв'язків між ними, достовірності та адекватності результатів вимірювань.

Розрізняють однофакторні (парні) та багатфакторні регресійні залежності.

1) Парна регресія при парній залежності може бути апроксимована прямою лінією, параболою, гіперболою, логарифмічною, степеневою або показовою функцією, поліномом та ін.

2) Двофакторне поле можна апроксимувати площиною, параболоїдом другого порядку, гіперболоїдом.

Критерієм близькості кореляційної залежності між X та Y до лінійної функціональної залежності є коефіцієнт парної або просто коефіцієнт кореляції r , що показує ступінь тісноти зв'язку X та Y .

– при $r = 1,0$ X та Y пов'язані функціональним зв'язком (у даному випадку лінійним), тобто кожному значенню X відповідає лише одне значення Y ;

– якщо $r < 1,0$, то лінійного зв'язку немає;

– при $r = 0$ лінійний кореляційний зв'язок між X та Y відсутній, але може існувати нелінійна регресія.

Зазвичай вважають тісноту зв'язку задовільною при $r > 0,5$; гарною при $r = 0,8 \dots 0,85$. Для визначення відсотка розкиду (мінливості) шуканої функції Y щодо її середнього значення, що визначається мінливістю фактора X , обчислюють коефіцієнт детермінації [12].

2.3 Висновки

1. Розроблено концепцію методу підвищення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів із дизельними двигунами. Концепція базується на такій гіпотезі: Виявлення порушення вимог до відпрацьованих газів безпосередньо в процесі роботи автомобільного дизельного двигуна можливе непрямым способом за рахунок аналізу параметрів, що використовуються електронним блоком керування двигуном, а саме шляхом аналізу зміни часу

відкриття форсунки (тривалість упорскування, циклова подача) як діагностичного параметра, пов'язаного з зносом посадкового місця та голки.

2. Обґрунтовано залежність параметрів подачі палива від характеристик розпилювача; обґрунтовано введення діагностичного параметра – тривалості упорскування палива – залежного від зносу соплових отворів розпилювача форсунки та що дозволяє здійснювати контроль димності відпрацьованих газів.



3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ДИВНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ВІД ПАРАМЕТРІВ, ЩО КЕРУЮТЬСЯ БЛОКОМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ

3.1 Чисельне моделювання процесу впорскування та розпилювання дизельного палива в циліндр двигуна

Для створення чисельної моделі процесу впорскування використовувався програмний комплекс Simcenter Star-CCM+. Simcenter STAR-CCM+ – це комплексне мультифізичне рішення для моделювання виробів та конструкцій, що працюють у реальних умовах.

Simcenter STAR-CCM+ забезпечує автоматичне дослідження та оптимізацію проекту у наборі інструментів моделювання для кожного інженера, дозволяючи ефективно дослідити весь простір проектування, а не зосереджуватись на сценаріях проектування в одній точці. Simcenter надає провідне в галузі програмне забезпечення обчислювальної гідродинаміки (CFD) для швидкого та точного моделювання практично будь-якої інженерної проблеми, пов'язаної з рідинами, конструкціями та всією пов'язаною з ними фізикою [28].

CFD моделювання широко застосовується для розрахунків протікання різних гідрогазодинамічних процесів, у тому числі впорскування та згоряння різних видів палива [28].

Дослідження в рамках магістерської роботи проводилось із залученням виробничої бази ТОВ «АТА Слободянюк». Дане підприємство експлуатує автобуси «Атаман» різних модифікацій. Дані автобуси, в залежності від модифікації і року випуску, оснащено двигунами Isuzu серій 4HG1 та 4HK1.

Модель створена з урахуванням основних технічних характеристик більш сучасного двигуна 4HK1, які представлені в таблиці 3.1.

Двигун Isuzu 4HK1 - чотиритактний дизельний агрегат з верхнім розташуванням розподільного валу (SOHC), що забезпечує високу ефективність

роботи. Двигун оснащений ПНВТ із регулятором тиску, а паливна система являє собою акумуляторну систему подачі палива Common Rail.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики двигуна Isuzu 4HK1

Робочий об'єм двигуна, см ³	5193
Екологічний клас	EURO-5 (або EURO-4)
Потужність, к.с.	154
Оберти при максимальній потужності, об/хв.	2600
Крутний момент, Нм	419
Оберти при максимальному крутному моменті, об/хв.	1600
Ступінь стиснення	17,5
Порядок роботи	1-3-4-2

При створенні моделі враховувалися реальні характеристики паливної апаратури двигуна та палива. Деякі параметри, що використовуються при розрахунках моделі, представлені в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Параметри, що використовуються під час розрахунків.

Найменування параметра	Значення	Розмірність
Об'єм циліндра	0,001298	м ³
Діаметр соплового отвору d_c	0,00035	м
Швидкість витікання палива теоретична V_t	680,940526	м/с
Площа соплових отворів	0,0000006	м
Коефіцієнт поверхневого натягу	0,029	н/м
Дійсна швидкість витікання V_d	476,6583682	м/с
p_1 тиск впорскування	50...200	МПа
p_2 тиск в камері	3040000	Па
Динамічна в'язкість палива μ	0,0034	Н·с/м ²

Моделювання проводилося у 4 режимах:

- форсунка зі справним розпилювачем, мінімальний тиск впорскування;
- форсунка зі справним розпилювачем, максимальний тиск впорскування;
- форсунка з гідроабразивним зносом розпилювача, мінімальний тиск впорскування;
- форсунка з гідроабразивним зносом розпилювача, максимальний тиск впорскування.

У моделюванні використовувалися такі фізичні моделі: K-Epsilon модель турбулентності, допустима двошарова K-Epsilon, середнє за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса, модель розділеної течії, ейлерова багатофазність та деякі інші.

У ході розробки моделей перебігу газових сумішей повинні братися до уваги процеси перенесення, пов'язані з феноменом дифузії.

Оскільки дифузійні показники окремих складових суміші різні, в результаті можуть виникнути різні явища. При вирішенні задачі надзвукового обтікання тіл врахування багатоскладового характеру газової суміші є однією з найважливіших проблем. Внаслідок процесів дифузії до поверхні тіла, що обтікається, може додатково надходити тепло, що обумовлює значимість правильного відображення параметрів процесу дифузії. Крім того, вирішення низки внутрішніх завдань також вимагає докладного і коректного опису руху газових середовищ і його результатів. Саме такі завдання вирішуються під час використання моделі Нав'є-Стокса [22].

Метод кінцевих елементів використовується для визначення параметрів процесів що протікають. Область пошуку розв'язання диференціальних рівнянь поділяється на деяке кінцеве число складових чи підобластей, у кожній з яких довільно визначається вид апроксимуючої функції (у найпростішому разі – поліном 1-го ступеня). Апроксимуюча функція поза відповідною підобластю дорівнює 0. У вузлах, тобто на межах підобластей, значення функцій заздалегідь невідомі (тобто є розв'язком задачі). Як правило, показники апроксимуючих функцій визначаються відповідно до того, що у вузлах значення суміжних функцій рівні. Дані показники надалі відображаються у значеннях функцій на межах підобластей. Формується система лінійних алгебраїчних рівнянь, число яких відповідає числу невідомих

значень на межах підобластей, де шукається розв'язки вихідної системи; це значення прямо пропорційно числу підобластей і обмежене виключно можливостями обчислювальної техніки.

Оскільки кількість пов'язаних з кожним елементом підобластей обмежена, система лінійних алгебраїчних рівнянь характеризується розрідженим виглядом, що спрощує її розв'язок [15, 26, 29].

Результати моделювання представлені рис. 3.1 ...3.4.

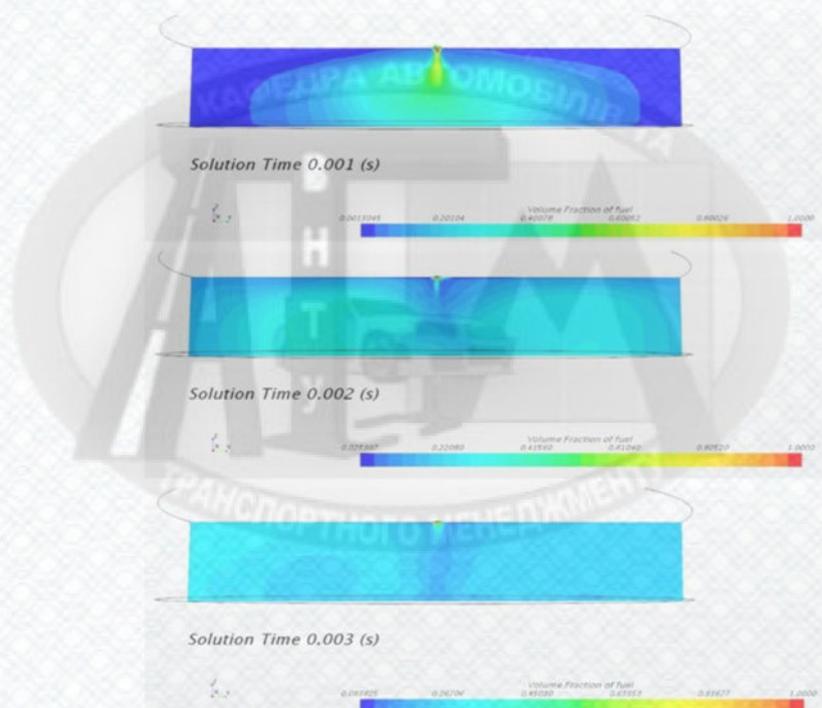


Рисунок 3.1 – Розподіл концентрації палива за об'ємом камери згоряння, розпилювач без гідроабразивного зносу, тиск впорскування мінімальний (у площині поздовжнього перерізу, що проходить через розпилювач)

При справному розпилювачі спостерігається рівномірний розподіл палива по всьому об'єму камери згоряння. При цьому відбувається гарне розпилювання палива без утворення великих крапель.

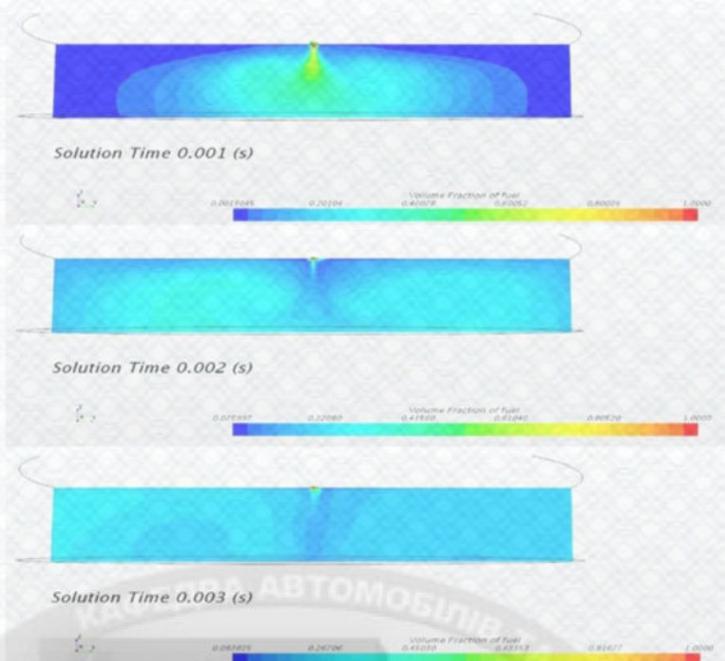


Рисунок 3.2 – Розподіл концентрації палива за об'ємом камери згоряння, розпилювач без гідроабразивного зносу, тиск впорскування максимальний (у площині поздовжнього перерізу, що проходить через розпилювач)

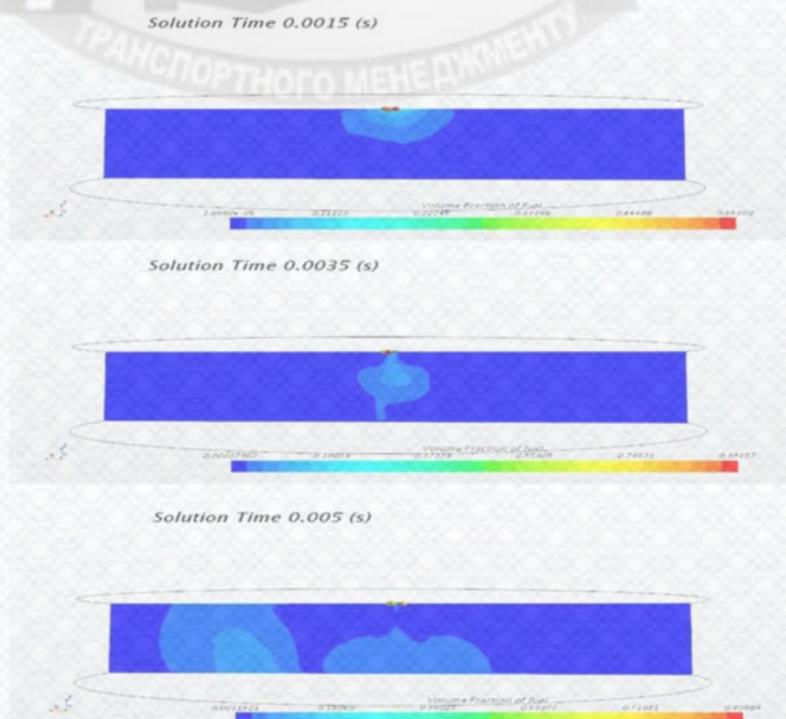


Рисунок 3.3 – Розподіл концентрації палива за об'ємом камери згоряння, розпилювач зі слідами гідроабразивного зносу, тиск впорскування мінімальний (у площині поздовжнього перерізу, що проходить через розпилювач)

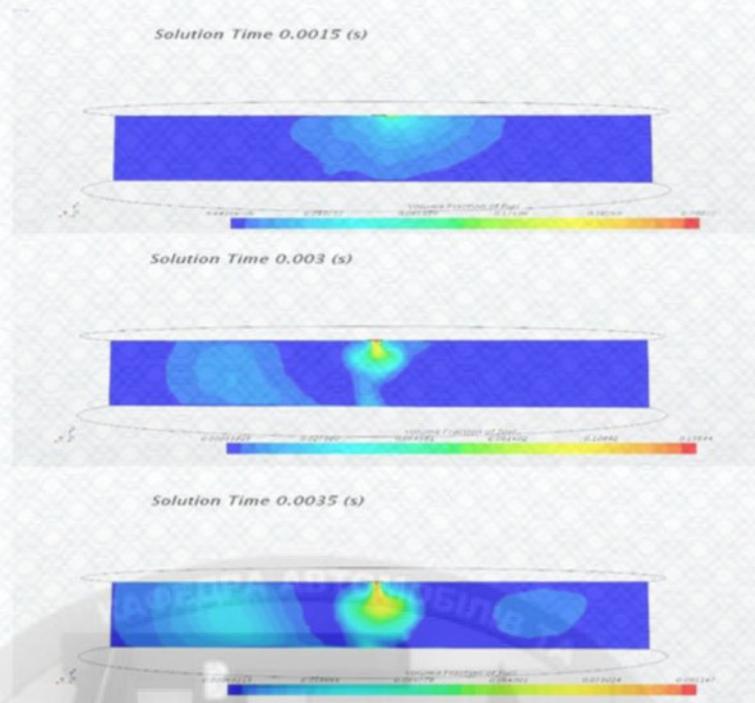


Рисунок 3.4 – Розподіл концентрації палива за об'ємом камери згоряння, розпилювач зі слідами гідроабразивного зносу, тиск впорскування максимальний (у площині поздовжнього перерізу, що проходить через розпилювач)

Значення функції Volume fraction of fuel (f_{xs}), що дозволяє оцінити розподіл частинок палива за заданих умов обсягу камери згоряння, знаходиться в діапазоні $f_{xs} = 0,26...0,5$ по всьому об'єму циліндра при $t=3$ мс, при максимальному і мінімальному тиску впорскування.

При запуску симуляції з пошкодженим розпилювачем (змінена характеристика розпилювача $\mu_c * f_c$, що відповідає зміні форми та розмірів соплових отворів при гідроабразивному зносі):

– [середнє значення $f_{xs} = 0,085$], тобто паливо значно гірше розподіляється по всьому об'єму камери згоряння,

– [локальне у розпилювача $f_{xs} = 0,87$ при $t=3$ мс] для максимального тиску впорскування, що говорить про зниження якості розпилювання палива (тобто збільшення середнього діаметра крапель по Заутеру) та утворення великих крапель.

При мінімальному тиску середнє значення $f_{xs} = 0,15$, в районі розпилювача

$f_{xs} = 0.89$, що, як і в попередньому випадку говорить про погіршення якості розпилювання і рівномірності розподілу палива по камері згоряння, при цьому функція виявлення великих крапель фіксує їх скупчення (див. рис. 3.3-3.4. - Червоні крапки у розпилювача).

За допомогою моделювання підтверджено суттєвий вплив параметра $\mu_c * f_c$ на якість розпилювання та рівномірність розподілу палива по камері згоряння, а також проведена оцінка зміни кількості палива, що фактично потрапило у камеру згоряння за час, що відповідає тривалості впорскування в режимі вільного прискорення колін. CFD моделювання показало, що при зміні сумарної площі соплових отворів на 5% та зміні їх форми, що відповідає гідроабразивному зносу (інші параметри незмінні в процесі моделювання), кількість палива в об'ємі камери згоряння збільшувалася $\approx 10,25\%$. Спираючись на теоретичні моделі утворення сажі при згорянні палива в циліндрах, наведених у розділі 2, можна говорити про те, що подібне збільшення кількості палива призведе до збільшення концентрації частинок сажі у відпрацьованих газах досліджуваного двигуна на $\approx 2...9\%$.

3.2 Відбір форсунок для проведення натурного експерименту

Для оцінки стану елементів форсунок застосовувалася мікроскопія з різною кратністю збільшення 50...1000, яка здійснювалася за допомогою USB-мікроскопа. На першому етапі проводиться дослідження соплових отворів. Для цього використовувалися форсунки, що експлуатувалися на двигуні 4НК1 протягом 30...80 тис. км пробігу. Збільшення площі перерізу соплового отвору внаслідок пошкоджень становило $\approx 15\%$. Також на одному розпилювачі з комплекту виявлено закоксовування соплових отворів.

На другому етапі проводилося дослідження голок. Серед досліджених форсунок помітні сліди зношування були виявлені на форсунці одного з 10 досліджуваних комплектів.

Для проведення експерименту були відібрані форсунки зі слідами гідроабразивного зносу (різної величини зносу) для подальшої установки в двигун та аналізу взаємозв'язку тривалості упорскування та димності відпрацьованих газів. Крім тривалості упорскування контролювалися також такі параметри, як тиск у рампі, тиск наддуву, частота обертання колінчастого валу, положення педалі та ін.

3.3 Дослідження залежності димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості впорскування

Експериментальне дослідження проводилося на кількох комплектах форсунок з різним ступенем зношування.

Для досягнення необхідної точності при проведенні вимірювань потрібно забезпечити їх виконання в умовах встановленого режиму, проте методика перевірки, представлена в ДСТУ 3649:2010, передбачає вимірювання димності тільки на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна, що накладає певні обмеження на методологію проведення експериментів.

Масив отриманих значень становив велику кількість замірів, серед яких понад 40 записів, що відповідають вимірам димності у режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна. Контроль параметрів здійснювався під час підключення до бортової системи самодіагностики за допомогою сканера ISUZU IDSS для комерційної техніки. Контроль димності відпрацьованих газів здійснювався за допомогою переносного аналізатора ІНФРАКАР Д, призначеного для вимірювання димності відпрацьованих газів дизельних двигунів, а також для вимірювання та контролю частоти обертання колінчастого валу автомобілів з 4-тактним двигуном і величини температури моторної оливи двигуна.

Фрагмент отриманого масиву значень наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Фрагмент масиву значень, одержаних з бортової мережі самодіагностики автомобіля

Димність - k	Тривалість впорскування - $\tau_{впр}$	Тиск палива в рампі - $P_{рамп}$	Тиск повітря у впускному колекторі - $P_{абс}$	Частота обертання колінчастого вала - $N_{обр}$	Температура повітря на впуску - $T_{ен}$	Відкриття клапана EGR - EGR_{rate}
1,10	3,10	570	16	3633	30	1
1,03	3,15	530	16	3518	31	2
1,24	3,00	490	15	3378	29	1
1,33	2,95	570	17	3646	30	0
1,33	2,95	580	16	3470	30	2
0,98	3,20	560	16	3611	29	1
0,82	3,40	560	15	3411	28	1
0,84	3,85	570	17	3522	30	0
1,41	2,90	540	16	3560	29	1
1,61	2,80	560	16	3496	30	1
1,72	2,75	570	15	3547	25	2
1,41	2,90	560	17	3386	30	1
1,51	2,85	530	17	3517	28	0
1,83	2,70	570	17	3447	30	1
1,96	2,65	570	16	3491	30	1
1,96	2,65	570	16	3446	30	2
2,99	2,30	560	15	3628	30	1
2,36	2,50	540	17	3456	30	0
2,51	2,45	520	16	3517	27	1
3,34	2,20	570	16	3422	34	1
2,82	2,35	560	16	3584	29	2
2,36	2,50	570	17	3587	30	1
1,96	2,65	540	16	3452	30	0
2,82	2,35	560	16	3364	30	1
2,99	2,30	550	17	3507	30	2

Для формування регресійної моделі, що описує взаємозв'язок значень димності з параметрами, контрольованими електронним блоком управління, було визначено матрицю парних кореляцій на основі коефіцієнтів кореляції Пірсона між основними параметрами, що входять до формули (2.17). Результати розрахунків парних кореляцій представлені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Матриця парних кореляцій

	Димність - k	Тривалість впорскування - $\tau_{впр}$	Тиск палива в рампі - $P_{рамп}$	Тиск повітря у впускному колекторі - $P_{абс}$	Частота обертання колінчастого вала - $N_{обр}$	Температура повітря на впуску - $T_{вп}$	Відкриття клапана EGR - EGR_{rate}
k	1						
$\tau_{впр}$	-0,93	1					
$P_{рамп}$	0,089	-0,05	1				
$P_{абс}$	0,049	-0,02	0,18	1			
$N_{обр}$	0,079	-0,10	-0,13	-0,21	1		
$T_{вп}$	0,24	-0,15	0,17	0,21	0,17	1	
EGR_{rate}	0,17	-0,19	0,04	-0,35	-0,01	-0,11	1

Зіставлення отриманих значень коефіцієнтів кореляції зі шкалою Чеддока говорить про наявність дуже високого негативного зв'язку між димністю відпрацьованих газів і тривалістю впорскування ($r = -0,93$). При цьому взаємний вплив інших параметрів один на одного і на тривалість впорскування можна оцінити як слабкий або не існуючий ($-0,02 \leq r \leq 0,18$). Перевірка отриманих значень за допомогою t -критерію Стьюдента говорить про їхню статистичну значущість.

Для визначення виду зазначеної функціональної залежності було побудовано та проаналізовано представлену на рис. 3.5 діаграму розміщення.

$$y=90,76x^{-3,831} . \quad (3.1)$$

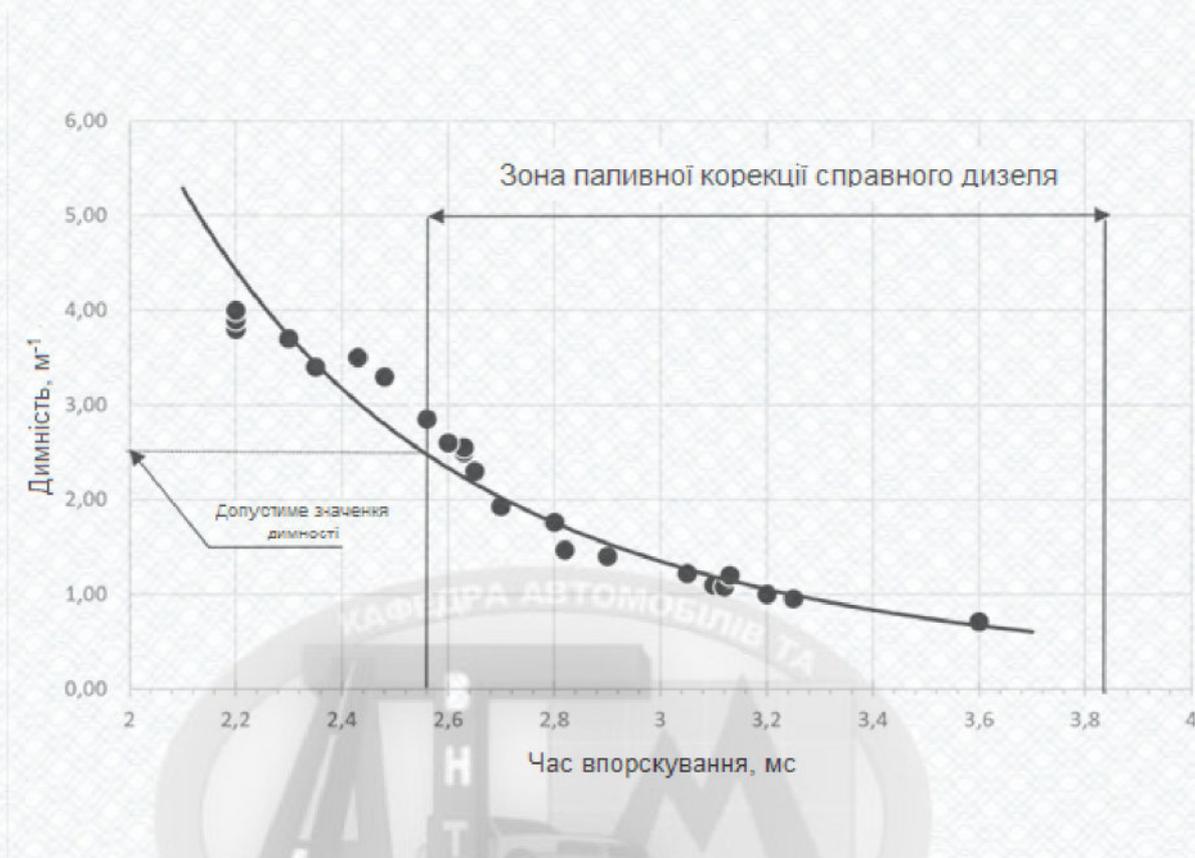


Рисунок 3.5 – Залежність димності відпрацьованих газів дизельного двигуна від часу відкриття форсунки

Отримано рівняння (3.1) – степенева функція з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,94$, $x = \tau_{впр}$ – тривалість впорскування, мінімальне значення для досліджуваного блоку управління становить 2,2 мс, подальше скорочення тривалості впорскування палива неможливе, $y = k$ – димність.

Розраховані значення коефіцієнта детермінації свідчать про адекватність отриманих моделей. Отримані значення коефіцієнтів регресії застосовні лише двигуна Isuzu 4HK1. Для використання з іншими двигунами коефіцієнти рівнянь регресії матимуть інші значення. Однак обґрунтована залежність димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості впорскування палива в частині її характеру універсальна для дизельних двигунів з електронним управлінням впорскування палива. Рівняння визначає поведінка $f(\tau_{впр})$ при різних значеннях тривалості впорскування, і враховує зміни, що виникають також і при зниженні продуктивності форсунки,

тобто закоксування соплових отворів паливних форсунок. Застосування штучних нейронних мереж дозволяє повністю виключити етап збору та обробки інформації для математичного опису взаємозв'язку між діагностичним параметром та зміною технічного стану автомобільного транспортного засобу, що досліджується.

Також необхідно перевірити досліджуваний параметр на відповідність вимогам до діагностичних параметрів. Параметр однозначний – екстремумів у діапазоні вимірів немає. Вихідний параметр (димність) швидко змінюється при зміні діагностичного, тобто чутливий параметр. При постійному значенні структурного параметра розсіювання діагностичного параметра невелике, тобто параметр стабільний. Площа перетину областей щільностей розподілу справного та несправного стану невелика, що говорить про інформативність діагностичного параметра. Для оцінки корисного ефекту від застосування розробленої моделі (на прикладі одного з досліджених комплектів форсунок) необхідно оцінити швидкість досягнення стану, що відповідає перевищенню димності (при 80 тис. км. значення димності перевищили $4,2 \text{ м}^{-1}$). З урахуванням відомого інтервалу перевірки (у середньому для АТП 60 днів) та відомого середньодобового пробігу можна оцінити швидкість зростання димності відпрацьованих газів як відношення зміни димності на час досягнення критичного стану, у поданому випадку $0,01 \text{ м}^{-1}/\text{день}$. Після цього можна оцінити кількість днів із перевищенням димності, які у міжінспекційний інтервал – у разі 30 днів. З урахуванням пробігових викидів та фактичного значення димності для одного автомобіля, своєчасно виявлене з використанням розробленої моделі перевищення димності дозволить запобігти викиду $19,68 \text{ г}$ сажі, тобто знизити викид сажі на $6,3\%$. За більших значень міжінспекційного інтервалу зниження викидів сажі за рахунок використання розробленої моделі може досягати $73,5\%$.

3.4 Висновки

1. Проведено CFD моделювання впорскування форсунки за допомогою програмного комплексу Simcenter Star-CCM+. Моделювання, проведені в 4 режимах підтвердило суттєвий вплив зносу соплових отворів форсунки на якість розпилу палива та його рівномірність розподілу камерою згоряння.

2. Для обґрунтування залежності димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості упорскування палива проведено експериментальне дослідження, що полягає в одночасній фіксації тривалості упорскування палива і значень димності відпрацьованих газів при застосуванні комплектів форсунок із заздалегідь зношеними сопловими отворами, що підтверджено мікроскопією.

3. Отримана залежність димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості впорскування палива в частині її характеру універсальна для дизельних двигунів з електронним управлінням упорскуванням палива системи Common Rail і відрізнятиметься від інших двигунів лише значеннями коефіцієнтів регресії.

4 МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ДИЗЕЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ

4.1 Програмно-апаратний комплекс для реалізації методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів із дизельними двигунами

Для застосування розробленої математичної моделі на зовнішньому пристрої необхідно передавати цьому пристрою значення параметрів, що використовуються електронним блоком керування в режимі реального часу. Отримати значення цих параметрів можливо різними способами, але найзручніше використовувати можливість, що надається системою бортової самодіагностики. Блок керування двигуном отримує інформацію від різних датчиків автомобіля, а також обмінюється інформацією з іншими блоками керування, встановленими в автомобілі, тому є можливість в реальному часі вимагати у нього інформацію необхідну для роботи програмно-апаратного комплексу і в реальному часі отримувати актуальну відповідь.

Інформаційна взаємодія з блоком керування двигуном стандартизована і відбувається по шині передачі даних, наприклад CAN, K-LINE та ін, відповідно до протоколу підключення до системи бортової самодіагностики. У більшості автомобілів, що експлуатуються на даний момент, використовується стандартизований діагностичний роз'єм підключення до цієї системи, так званий OBD2.

Далі необхідно вирішити питання підключення до блоку управління двигуном, отримання необхідної інформації від цього блоку, програмної реалізації математичної моделі, апаратної складової для виконання раніше програмно-реалізованої математичної моделі, передачі інформації від блоку управління двигуном в модель і відображення результатів моделювання.

Програмна реалізація однією з мов програмування високого рівня (C, C++, C#, python тощо) створеної математичної моделі не повинна викликати труднощів.

Ідеальним варіантом впровадження розробок був би додатковий модуль у програмі управління двигуном. Він не потребував би створення жодних додаткових апаратних пристроїв, втручання в схемотехніку транспортного засобу. Але цей варіант зараз неможливий через закритість прошивок (програм управління) блоків управління двигуном. Ці прошивки є ноу-хау та інтелектуальною власністю виробників, які їх ретельно оберігають від будь-якого стороннього втручання.

Таким чином, пріоритетною є розробка власного програмно-апаратного комплексу для вирішення поставленого завдання.

Можна визначити такі основні вимоги до такого програмно-апаратного комплексу:

- вартість – має бути мінімальною;
- доступність компонентів;
- компактність – не повинен займати значуще місце та заважати водію, власнику або проведенню ТО і Р;
- безпека – не повинен впливати на штатні системи автомобіля;
- простота використання – водій/власник транспортного засобу повинні зрозуміло та наочно інформуватися про порушення вимог до димності відпрацьованих газів;
- простота установки – підключення даного програмно-апаратного комплексу не повинно викликати потреби у реєстрації зміни конструкції транспортного засобу.

Існує кілька шляхів реалізації програмно-апаратного комплексу. Вони ґрунтуються на стандарті OBD2.

Наприклад, можна запропонувати пряме підключення до системи бортової самодіагностики через стандартизований роз'єм. Для цього потрібно розробити відповідний контролер, який отримуватиме інформацію щодо шин передачі даних, передбачених виробником автотранспортного засобу, і переводити її в цифровий вигляд для подальшої обробки. Також потрібно розробити пристрій, на якому виконуватиметься програмно-реалізована математична модель, що приймає

параметри від блоку управління двигуном. На додаток знадобиться пристрій індикації станів (екран, світлодіоди, звуковий сигнал тощо).

Переваги цього підходу очевидні:

- пристрій може бути досить компактним;
- пристрій можна розмістити у будь-якому місці за бажанням проектувальника;
- дизайн може бути розроблений відповідно до дизайну конкретного транспортного засобу.

Недоліки:

- складність та вартість розробки;
- абсолютна "закритість" пристрою - відсутність розуміння не розробниками "як це працює".

Як було зазначено вище, є кілька способів реалізації програмно-апаратного комплексу. Якщо не використовувати повний цикл розробки пристрою, то можна запропонувати такий варіант – пристрій збирається з готових стандартних модулів, які вже давно присутні на ринку. Наприклад, як адаптер для підключення до системи бортової самодіагностики широко використовуються пристрої на базі мікросхеми ELM327. Ця мікросхема перетворює протоколи діагностичних шин автомобілів на протокол RS-232 (відомий як послідовний порт IBM сумісних комп'ютерів). Подібні адаптери бувають з різними інтерфейсами з'єднання із зовнішньою обчислювальною технікою, а саме: дротові – USB, RS-232; бездротові - Wi-Fi, Bluetooth.

До цього адаптера можна підключитися з будь-якого пристрою, що має можливості терміналу (наприклад, звичайний ноутбук з програмою терміналом putty) і навіть у ручному режимі відправляти на нього команди/запити та отримувати відповіді.

Якщо використовувати бездротовий інтерфейс, то програмну частину можна реалізувати на будь-якому сучасному компактному пристрої – смартфон, планшет, аж до розумного годинника. Цей варіант дуже дешевий в реалізації, але представляється незручним через необхідність встановлення та налаштування

додаткового ПЗ на пристрої всіх зацікавлених в отриманні інформації осіб (контролерів ВТК, майстрів ТО і Р, відповідальних за випуск транспортного засобу на лінію, водіїв, власників та ін), а також необхідність запуску відповідного програмного модуля.

Для отримання повністю автономного пристрою для роботи розробленого методу потрібно автономний пристрій, що здатний взаємодіяти з адаптером ELM327. Як такий пристрій здатні виступити, наприклад, контролери Arduino, STM32 або ін. При автономному розміщенні на автомобілі всього пристрою можна вибрати будь-який протокол взаємодії між адаптером і контролером, як дротовий, так і бездротовий. Але для підвищення стабільності передачі інформації та здешевлення кінцевого пристрою, слід віддати перевагу дротовому підключенню за інтерфейсом RS-232. Це скоротить кількість модулів сполучення протоколів, а отже, і ціну пристрою, також підвищить надійність.

4.2 Алгоритм реалізації методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів із дизельними двигунами

Після вибору апаратної частини пристрою знадобиться розробка його програмної складової. Залежно від апаратної частини можлива велика варіативність у додаткових функціях пристрою, які можна реалізувати як ПЗ. Наприклад, можуть бути реалізовані такі додаткові функції:

– у пристрої застосовано модуль WI-FI, при в'їзді в автопарк транспортний засіб автоматично приєднується до внутрішньої мережі автопарку та відправляє поточні дані про роботу паливної системи та розрахункову димність відпрацьованих газів на сервер автопарку, звідки його можуть отримати зацікавлені відділи або автоматично формується заявка на діагностування та ремонт;

– у пристрої застосовано модуль GPRS (4G, 5G), автомобіль протягом усього маршруту в режимі онлайн мережами передачі даних стільникових операторів відправляє інформацію про паливну систему та розрахункову димність

відпрацьованих газів на сервер автопарку, звідки його можуть отримати зацікавлені відділи, або автоматично формується заявка на діагностування та ремонт;

– у пристрої може бути встановлена енергонезалежна пам'ять у достатній кількості. Таким чином стає можливим реалізувати накопичення інформації в часі про стан паливної системи та розрахункової димності відпрацьованих газів і наочно подати цю інформацію для аналізу, наприклад, відобразивши її у вигляді графіка.

При цьому, незалежно від додаткових функцій, основна частина програмного забезпечення буде ідентичною для всіх реалізацій пристрою.

Обґрунтовані вище залежності значень димності відпрацьованих газів від параметра, що використовується блоком керування двигуном (тривалості упорскування палива) можуть бути покладені в основу методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами. Дана методика передбачає безперервний контроль параметрів, що використовуються блоком управління двигуном та виконання оцінки на її основі значення димності відпрацьованих газів. Для цього потрібна розробка відповідного ПЗ.

При розробці програмного забезпечення, необхідно врахувати зазначені вище обмеження вхідних параметрів, які отримують з бортової системи самодіагностики автотранспортного засобу. Пристрій, на якому буде реалізовано програмне забезпечення, що розробляється, буде зберігати в енергонезалежній пам'яті базу даних з еталонними значеннями параметрів, що характеризують справний стан системи живлення, циліндропоршневої групи, впускного тракту, турбонаддува тощо. Програма дозволяє записувати еталонні значення параметрів автомобіля в режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна, які використовуються для порівняння з поточними даними. Користувач може налаштувати ключові параметри розрахунку димності, такі як константа (C – значення регресійного коефіцієнта k_0), показник ступеня (α) (див. формулу (2.18) та її максимально допустиме значення). Інтерфейс програми включає таблицю для відображення поточних значень PID-команд автомобіля, що підтримуються, текстове поле для логування подій і графік для візуалізації змін димності в реальному часі. Програма підтримує завантаження та збереження еталонних даних

у форматі JSON, що забезпечує зручність повторного використання. Для підвищення зручності роботи додано можливість збереження налаштувань користувача, таких як коефіцієнти і порогове значення димності, в конфігураційний файл. Програма оснащена системою обробки помилок та логування, яка допомагає користувачеві швидко виявляти та усувати проблеми. Програма також надає візуальні індикатори статусу, такі як мітки кольорів для відображення перевищення допустимої димності. Завдяки своїй універсальності та зручності використання, програма може бути застосована як для професійного діагностування, так і для особистого використання особами, що експлуатують автотранспортні засоби.

Алгоритм роботи такого ПЗ представлений рисунку 4.1.

У міру зношування соплових отворів та голки збільшується обсяг палива, що подається в камеру згоряння за час відкриття форсунки. Це викликає нерівномірність обертання колінчастого валу двигуна, яка реєструється і аналізується електронним блоком управління.

Реагуючи на нерівномірність обертання, ЕБУ змінює тривалість упорскування, щоб вирівняти швидкість руху поршнів, проте діапазон такого регулювання обмежений. Таким чином, якщо виконується $\tau_{впр\ дійсн} > \tau_{впр\ спр}$, то форсунку можна вважати справною. Ознакою досягнення форсункою гранично допустимого стану є перевищення $\tau_{впр\ зн}$, що відповідає несправній форсунці.

На підставі вищевикладеного, можна запропонувати послідовність кроків для реалізації розробленої методики:

1. Перевірка початкових умов (двигун запущений, відсутні записані в пам'яті помилки, режим роботи відповідає режиму перевірки, значення діагностичних параметрів, що характеризують технічний стан інших систем/вузлів/агрегатів, знаходяться в допустимому діапазоні).

2. Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії.

4. Експлуатація транспортного засобу, безперервний контроль параметра $\tau_{впр\ дійсн}$, при перевірці дотримання умов пункту 1.

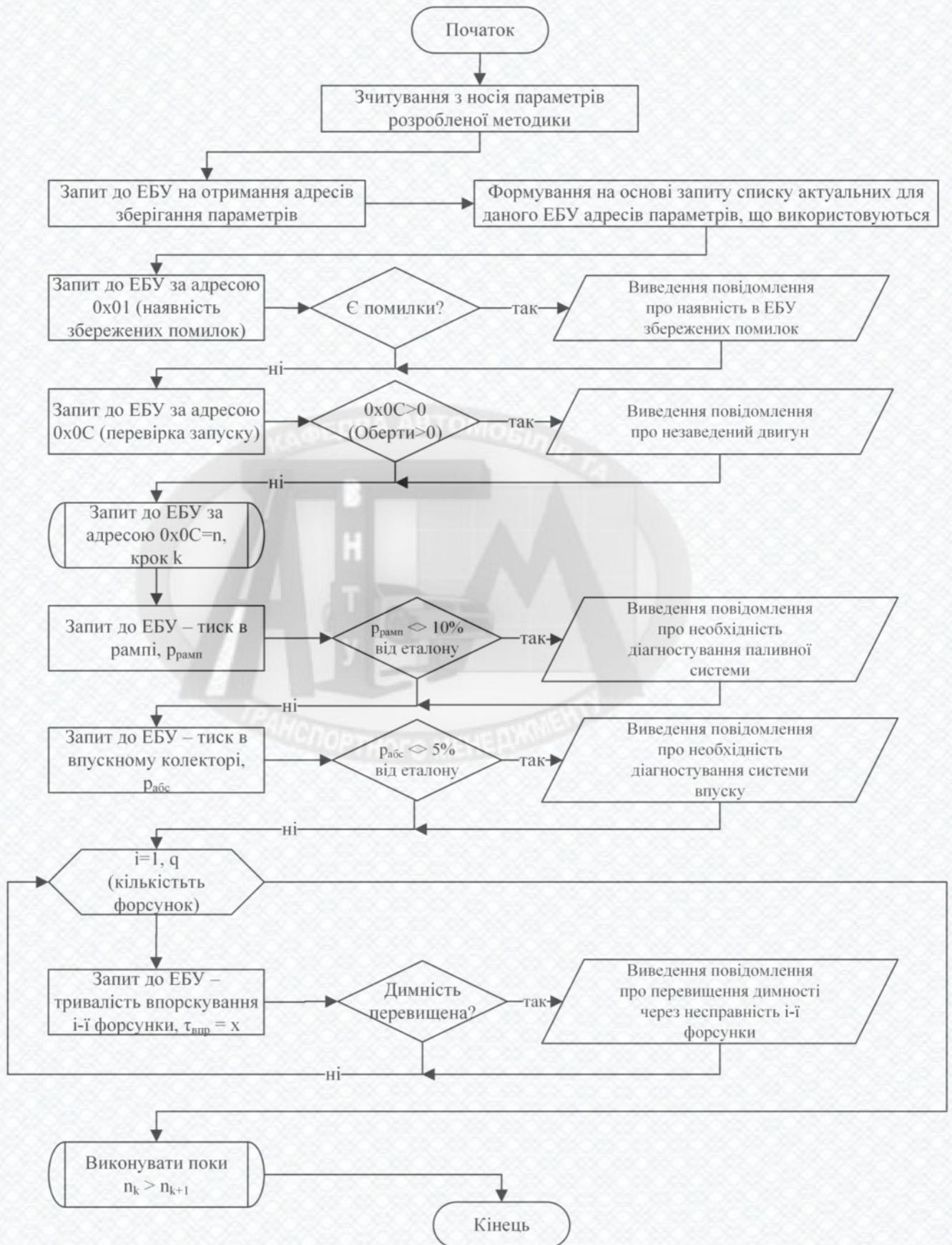


Рисунок 4.1 – Алгоритм роботи програмного апаратного комплексу методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами

5. При досягненні $\tau_{впр\ зн}$ задіюється механізм інформування. Транспортний засіб виводиться з експлуатації до відновлення допустимих значень димності.

4.3 Розрахунок попередженого екологічного збитку від забруднення атмосферного повітря

Екологічний збиток від забруднення атмосферного повітря, якому вдалося запобігти за допомогою застосування розробленої методики, може бути оцінена за такою формулою:

$$Z = \gamma \cdot \sigma \cdot k \cdot f \cdot M, \quad (4.1)$$

де Z - економічний збиток від забруднення навколишнього середовища, грн;

γ - питомий збиток від забруднення навколишнього середовища, грн/т (на 2025 рік – 101,31 грн/т);

σ - поправка, яка враховує територію, яку здійснюється вплив (для Вінниці $\sigma = 1$);

f - поправка, яка враховує розсіювання домішки в атмосфері;

M - маса забруднюючих речовин, ум. т (маса речовини, що викидається, і показник її небезпеки);

k - коефіцієнт економічної та екологічної небезпеки i -ї забруднюючої речовини або групи речовин.

Наведена маса річного викиду джерела, M , ум. т/рік, розраховується за такою формулою:

$$M = \sum A_i m_i, \quad (4.2)$$

де A_i - показник відносної агресивності домішки ($A_i = 41,5$ для сажі);

m_i - значення фактичної маси i -го виду забруднюючої речовини, т.

Фактична маса сажі m_i може бути розрахована за допомогою оцінки кількості автомобілів з дизельними двигунами в Вінниці або Україні в цілому, пробігових викидів, які для автомобілів екологічного класу євро 5 становлять 0,005 г/км, для євро 4 становлять 0,025 г/км, для автомобілів євро 3 і нижче 0,06 г/км. Середньорічний пробіг, за даними Держслужби статистики, для комерційного транспорту 60 тис. км на рік. Таким чином, екологічні збитки від викидів сажі для парку транспортних засобів з дизельними двигунами в м. Вінниця за умови їх відповідності вимогам до викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами можна оцінити, як:

$$Z = 101,31 \cdot 1 \cdot 2,7 \cdot 1 \cdot 41,5 \cdot 37,5 = 425692 \text{ грн.}$$

При реальній оцінці технічного стану всього комерційного транспорту екологічного класу євро 4 і нижче з урахуванням можливості тривалої експлуатації з перевищенням нормативів димності та з статистичних даних про несправності паливної апаратури, значення витрат орієнтовно складає $Z = 553400$ грн.. Таким чином, потенційне значення шкоди, які можна запобігти, становить досягає 127,7 тис.грн. Слід зазначити, що такі розрахунки доцільно було б провести для усього автопарку країни та по регіонам, проте для цього необхідні статистичні дані про наявність та справність систем та кількість автомобілів.

4.4 Економічна оцінка впровадження методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів із дизельними двигунами

Для економічної оцінки впровадження методу підвищення екологічної безпеки автомобілів з дизельними двигунами, заснованого на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком керування двигуном для особи, яка здійснює експлуатацію транспортних засобів, необхідно врахувати витрати, необхідні на реалізацію проекту впровадження. Використання

розробленого методу було здійснено на базі ТОВ «АТП Слободянюк», яке експлуатує 36 автобусів «Атаман». Витрати використання розробленого методу умовах ТОВ «АТП Слободянюк» наведено у табл 4.1.

Таблиця 4.1 - Витрати на впровадження методики

№	Найменування витрат	Вартість, тис.грн
1	Витрати на закупівлю компонентів, необхідних для обробки даних, що збираються (Контролер Arduino mega, модуль дисплея, модулі зв'язку Bluetooth/Wi-Fi, корпус)	50
2	Витрати на закупівлю компонентів, необхідних для збору даних (діагностичний інтерфейс для підключення до системи бортової самодіагностики автомобіля OBDII)	50
3	Витрати на розробку комплексу ПЗ	150
4	Витрати на монтаж системи	36
5	Інші витрати	30
6	Разом	316

Експериментальні дослідження показали, що впровадження методу підвищення екологічної безпеки автомобілів з дизельними двигунами, заснованого на безперервному контролі, які використовуються електронним блоком управління, в умовах ТОВ «АТП Слободянюк» дозволяє запобігти не тільки експлуатації автобусів з порушенням вимог до димності, а й підвищення витрат палива у зв'язку з зносом. Збагачення суміші може відбуватися до досягнення гранично можливих для займання суміші значень коефіцієнта надлишку повітря, проте помітно відібується на потужності та витраті зміни значень коефіцієнта надлишку повітря в межах 40-50%.

За даними підприємства коефіцієнт випуску автобусів 0,8, середньодобовий пробіг автобусів становить 250 км, витрата палива в середньому 18л/100км, актуальна на кінець 2025 року оптова вартість дизельного палива 56 грн. Тоді середньодобові витрати підприємства на пальне для автобусів становитимуть:

$$B = 36 \cdot 0,8 \cdot 18 \cdot \frac{250}{100} \cdot 56 = 72576 \text{ грн.}$$

Тоді на рік витрати на паливо становитимуть приблизно 26,49 млн грн під час експлуатації повністю справних автобусів. Згідно з даними ТОВ «АТП Слободянюк» перевитрата палива, пов'язана з несправностями паливних форсунок, за рік становила 6%, таким чином реальні витрати на паливо становили 28,08 млн грн. Використання розробленої методики, яка дозволяє визначити несправності паливної апаратури, дозволяє скоротити витрати ТОВ «АТП Слободянюк» на паливо на 1,59 млн грн.

Відповідно термін окупності впровадження методики за рахунок зниження витрати палива складе

$$T_{ок} = \frac{316}{1590} = 0,2 \text{ роки.}$$

Таким чином термін окупності складе менше одного року.

4.5 Висновки

1. Запропоновано спосіб програмно-апаратної реалізації методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів із дизельними двигунами. Для отримання повністю автономного пристрою для роботи програмно-апаратного комплексу потрібно автономний пристрій здатний взаємодіяти з адаптером ELM327. При автономному розміщенні на автомобілі всього пристрою можна вибрати будь-який протокол взаємодії між адаптером і контролером, як дротовим, так і бездротовим.

2. Розроблено методику підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами, заснований на безперервному контролі

параметрів, що використовуються електронним блоком управління, та запропоновано рекомендації щодо впровадження методу на підприємствах автомобільного транспорту. На відміну від існуючих методів, що передбачають періодичний контроль димності, розроблена методика дозволяє здійснювати контроль димності в режимі реального часу за непрямыми ознаками. Внаслідок його впровадження можливе значне зниження трудомісткості та підвищення оперативності контролю димності відпрацьованих газів, а також попередження тривалої експлуатації транспортних засобів з перевищенням допустимих значень димності.

2. Виконана економічна оцінка ефекту від впровадження методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами, заснованого на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком управління, у діяльність підприємства ТОВ «АТП Слободянюк» свідчить про можливість скорочення витрат на паливе при експлуатації 1,59 млн грн. Оціночний термін окупності складе менше одного року.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було вирішено питання підвищення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів в умовах експлуатації.

1. Проведений аналіз існуючих методів діагностування елементів паливної апаратури дизелів (паливні форсунки), стан яких впливає на склад відпрацьованих газів, дозволив стверджувати, що існуючі методи діагностування паливної апаратури і засоби їх реалізації не повною мірою забезпечують дотримання вимог, що висуваються до екологічності дизельних двигунів транспортних засобів в експлуатації. Перспективним напрямком у даній сфері є удосконалення методів підвищення екологічної безпеки, що запобігає порушенню вимог до димності відпрацьованих газів під час експлуатації автомобільного транспорту з дизельними двигунами, заснованого на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком управління двигуном.

2. Аналіз структури і стану ВТБ ТОВ «АТП Слободянюк», дозволив встановити, що наявна ВТБ потребує удосконалення, як з метою підвищення експлуатаційної надійності власних автобусів і забезпечення можливостей надання автосервісних послуг, так і для отримання можливостей обслуговування перспективних автомобільних конструкцій.

3. Обґрунтовано можливість контролю димності відпрацьованих газів за параметрами, що використовуються електронним блоком управління. Обґрунтовано введення діагностичного параметра, який залежить від зносу соплових отворів розпилювача форсунки і є параметром робочого процесу, що використовується блоком керування. Таким параметром є тривалість упорскування палива.

4. Проведено CFD моделювання впорскування форсунки за допомогою програмного комплексу Simcenter Star-CCM+. Моделювання, проведені в 4 режимах підтвердило суттєвий вплив зносу соплових отворів форсунки на якість розпилу палива та його рівномірність розподілу камерою згоряння.

5. Отримана залежність димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості впорскування палива в частині її характеру універсальна для дизельних двигунів з електронним управлінням впорскування палива системи Common Rail і відрізнятиметься від інших двигунів лише значеннями коефіцієнтів регресії.

6. Розроблена методика підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами на основі безперервного контролю значень діагностичного параметра – тривалості впорскування – використовуваного електронним блоком керування двигуном. Запропоновано програмно-апаратний комплекс для реалізації методики, що реалізує отримання та обробку даних від електронного блоку керування двигуном для розрахунку димності в режимі реального часу.

7. Виконана економічна оцінка ефекту від впровадження методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами, заснованого на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком управління, у діяльність підприємства ТОВ «АТП Слободянюк» свідчить про можливість скорочення витрат на пальне при експлуатації 1,59 млн грн. Оціночний термін окупності складе менше одного року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автомобілі. Теорія експлуатаційних властивостей : навчальний посібник / В. В. Біліченко, О. Л. Добровольський, В. О. Огневий, Є. В. Смирнов – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 163 с.
2. Біліченко В. В., Крещенецький В. Л., Варчук В. В.. Автомобілі та автомобільне господарство. Дипломне проектування : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 171 с.
3. Біліченко В. В. Основи технічної діагностики колісних транспортних засобів : навч. посіб. / В. В. Біліченко, В. Л. Крещенський, Ю. Ю. Кукурудзяк, С. В. Цимбал. - Вінниця : ВНТУ, 2012. - 118 с.
4. Виробничо-технічна база підприємств автомобільного транспорту. Навчальний посібник / [В.В. Біліченко, В.Л. Крещенецький, С.О. Романюк, Є.В. Смирнов]. Вінниця, ВНТУ, 2013. Режим доступу : <http://posibnyky.vntu.edu.ua/newauto/5/index.html>.
5. Діагностика і технологія ремонту автомобілів : підруч. / В. М. Коваленко, В. К. Щуріхін. — Київ : Літера ЛТД, 2017. — 224 с..
6. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення [Текст]. - К.: Держстандарт України, 1994. - 23 с.
7. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 30 с.
8. Жерновий А. С. Вибір діагностичних параметрів для експрес-діагностування дизелів [Текст] / А. С. Жерновий, О. Д. Климпуш, К. С. Колобов // Вісник нац. транспортного ун-ту. К. : НТУ, 2012. Вип. 25. С. 175-178.
9. Канарчук В.Є., Лудченко О. А., Чигринець А. Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Кн. 1 : Теоретичні основи. Технологія: Підручник. К. : Вища школа, 1994. 384 с.

10. Кисляков В.Ф. Будова й експлуатація автомобілів / Кисляков В.Ф., Луцик В.В. – Київ: Либідь, 1999 (2000,04,05,06). – 400 с.

11. Левкович М.Г. Комп'ютерна діагностика : Конспект лекцій з дисципліни / Уклад. Левкович М.Г. Босюк П.В. Тесля В.О. – Тернопіль, 2016. – 130 с.

12. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів: Технологія: [підручник для студентів вузів] / О.А. Лудченко. – К.: Вища школа, 2007. – 527с.

13. Мигаль В. Д. Основи технічної діагностики автомобілів. Апаратні засоби вібраційного діагностування: навч.-метод. посібник / В. Д. Мигаль, І. А. Мармут. - Х.: Вид-во ХНАДУ, 2009. - 190 с.

14. Мигаль В.Д., Мигаль В.П. Методи технічної діагностики автомобілів. Харків: Вид. Форум, 2014. 416 с.

15. Олійник В. В., Смирнов Є.В. методи діагностування системи живлення Common Rail // Регіональна науково-практична Інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих науковців Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи – 2020. Вінниця, ВНТУ, 2020. Режим доступу : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2020/paper/viewFile/8539/7132>

16. Оперативний контроль технічного стану транспортних засобів : монографія / І.В. Грицук, В.П. Волков, І. В. Худяков, Т.В. Волкова, В.П. Кужель– Харків – Херсон – Вінниця: Едельвейс і К, 2022. – 197 с. ISBN 978-617-7417-00-1.

17. Оробей, В. Ф. Загальні принципи діагностування електронних систем керування автомобілем [Текст] / В. Ф. Оробей, В. Г. Максимов, О. Д. Ніцевич та ін.: під ред. М. Б. Копитчука. - О.: Наука і техніка, 2012. - 392 с.

18. Фалюкович О.І., Смирнов Є.В. аналіз впливу несправностей паливної апаратури Common Rail на екологічні показники дизеля та методів їх діагностування// Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», [Електронний ресурс], Вінниця: ВНТУ, 2026, Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/schedConf/presentations>

19. Чернета О.Г. Основи технічної діагностики : конспект лекцій для здобувачів зі спеціальності 274 Автомобільний транспорт за освітньо – професійною програмою «Автомобільний транспорт». – Кам’янське: ДДТУ, 2018. 49 с.
20. BOSCH: Diesel-Engine Management. Automotive technology. Wiley, 2004. 489 pp.
21. Delphi. COMMON RAIL MANUAL. PRINCIPLES OF OPERATION. Delphi France SAS, 2007. 83 pp.
22. Paul Dempsey Troubleshooting and Repairing Diesel Engines. McGraw Hill, 2008. 408 pp.
23. Greeves G., Tullis S., Burker B. Advanced Two-Actuator EUI and Emission Reduction for Heavy-Duty Diesel Engines. SAE Technical Paper 2003-01- 0698, 20 p
24. Hubertus Günther. Diesel Diagnose. Vogel und Druck Gmbh & Co, KG, Würzburg. 2003. 176 pp.
25. Large Engine Injection Systems for Future. Christoph Kendlbacher, Peter Mueller, Martin Bernhaupt, Gerhard Rehbichler. Bergen : CIMAC, 2010. Full paper #50.
26. Kronberger M. Unit Injectors with Piezo Actuator for Euro 4 Diesel Engines. MTZ Worldwide, 2005, no. 5, pp. 8–11.
27. Sean B. Modern Diesel Technology: Diesel Engines. / Delmar: Cengage Learning, 2010. 339 pp.
28. Siemens VDO. Piezo Common Rail PCR 2.3 NGD 3.0E. 2005. – 154 pp.
29. Simcenter STAR-CCM+ URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/star-ccm/>
30. SAE Technical Paper Series. Tire Wear Particles in Urban Environments. Warrendale: SAE International, 2018.
31. Worldwide Emission Standards Passenger Cars and Light Duty Vehicles 2012/2013. Delphi, 2012, 100 p.

Додаток А
(обов'язковий)



ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ
АВТОБУСІВ ТОВАРИСТВА З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «АТП
СЛОБОДЯНЮК» МІСТО ВІННИЦЯ

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Ілюстративний матеріал до
магістерської кваліфікаційної роботи
на тему:

**Підвищення екологічної безпеки дизельних двигунів автобусів
товариства з обмеженою відповідальністю «АТП Слободянюк»
місто Вінниця**

Розробив: ст. гр. 1АТ-24м
Фалюкович О.І.
Керівник: к.т.н., доцент
Смирнов Є. В.

Мета роботи – розробка методики та засобів підвищення екологічної безпеки, що запобігає порушенню вимог до димності відпрацьованих газів автомобілів з дизельними двигунами в умовах експлуатації, заснованих на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком керування двигуном.

Завдання дослідження

- провести аналіз існуючих методів контролю димності відпрацьованих газів дизельних двигунів;
- проаналізувати сучасний стан виробничо-технічної бази ТОВ «АТП Слободянюк»;
- обґрунтувати можливість введення діагностичного параметра, що залежить від зношування соплових отворів розпилювача форсунки і є параметром робочого процесу, який використовується електронним блоком управління, та розробити математичну модель, що дозволяє контролювати димність відпрацьованих газів на основі зазначеного діагностичного параметра;
- виконати моделювання та експериментальні дослідження з метою підтвердження доцільності запропонованого діагностичного параметра та отримання залежності димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від значень введеного діагностичного параметра;
- розробити методику підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів із дизельним двигуном та запропонувати програмно-апаратний комплекс її реалізації;
- оцінити економічний ефект від впровадження розробок в ТОВ «АТП Слободянюк».

Об'єкт дослідження – зниження токсичності дизельного двигуна на основі безперервного контролю параметрів, що використовуються електронним блоком керування.

Предмет дослідження – алгоритми оцінки технічного стану паливної апаратури на основі параметрів системи бортової самодіагностики та моделі роботи електронного блоку керування двигуном.

Новизна отриманих результатів

- удосконалено метод контролю димності відпрацьованих газів автомобілів з дизельними двигунами в умовах експлуатації, заснований на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком керування двигуном;
- отримано залежність димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості впорскування палива.

Практичне значення отриманих результатів

полягає у розробці методики та програмно-апаратного комплексу контролю димності відпрацьованих газів по зміні тривалості керуючих сигналів форсунки в процесі експлуатації автотранспортних засобів.

Вплив несправностей паливної апаратури Common Rail на екологічні показники дизельних двигунів

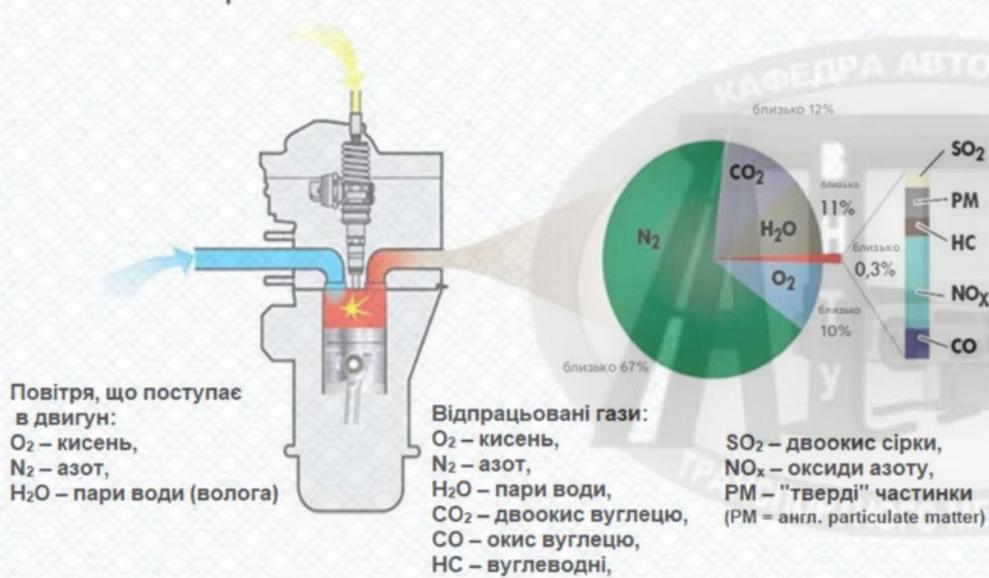


Рисунок 1 –Склад відпрацьованих газів дизельного двигуна

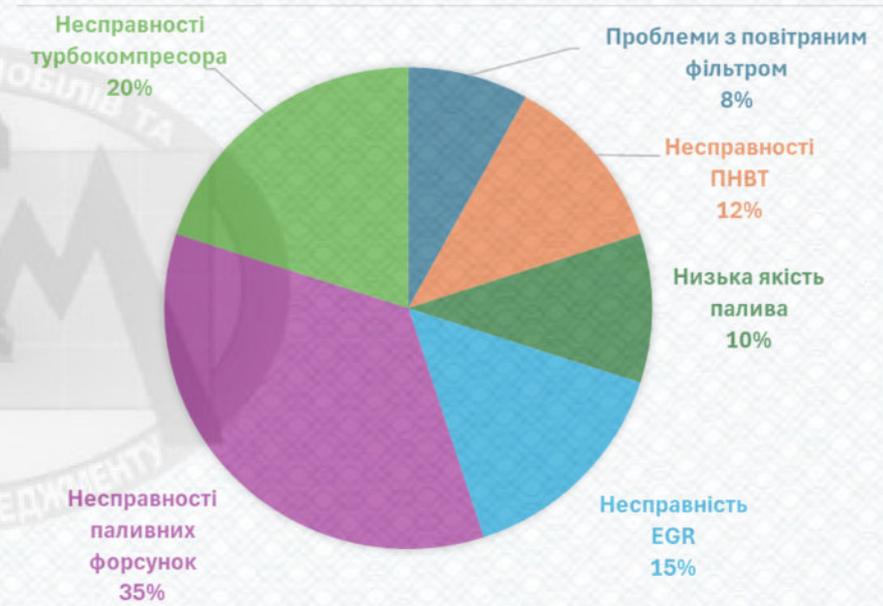


Рисунок 2 – Статистика причин підвищення димності у дизельних автомобілів із системою Common Rail

Висновки. Для автомобілів потрібен новий підхід до визначення технічного стану паливних форсунок, що забезпечує дотримання вимог до димності відпрацьованих газів і не передбачає виведення транспортного засобу з експлуатації. Цей підхід може бути реалізований за допомогою методу, в основу якого покладено безперервний контроль параметрів, що використовуються електронним блоком управління двигуном.

Характеристика ВТБ ТОВ «АТП Слободянюк»

Основні види діяльності:

- Пасажирські перевезення;
- Надання послуг з ТО та ремонту;
- Офіційний дилер "ІСУЗУ-АТАМАН УКРАЇНА".

Рухомий склад 36 автобусів марки «Атаман»

Виробничо-технічна база підприємства має такі складові:

- ремонтна майстерня, в якій знаходяться зони та дільниці, які виконують операції з ТО і ПР автобусів:
 - зона ТО і ПР (оснащена постами з тупиковими оглядовими канавами);
 - агрегатний цех;
 - слюсарний цех;
- відкрита стоянка автобусів;
- адміністративні та побутові приміщення;
- допоміжні приміщення;
- склад.

Концепція методу забезпечення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів

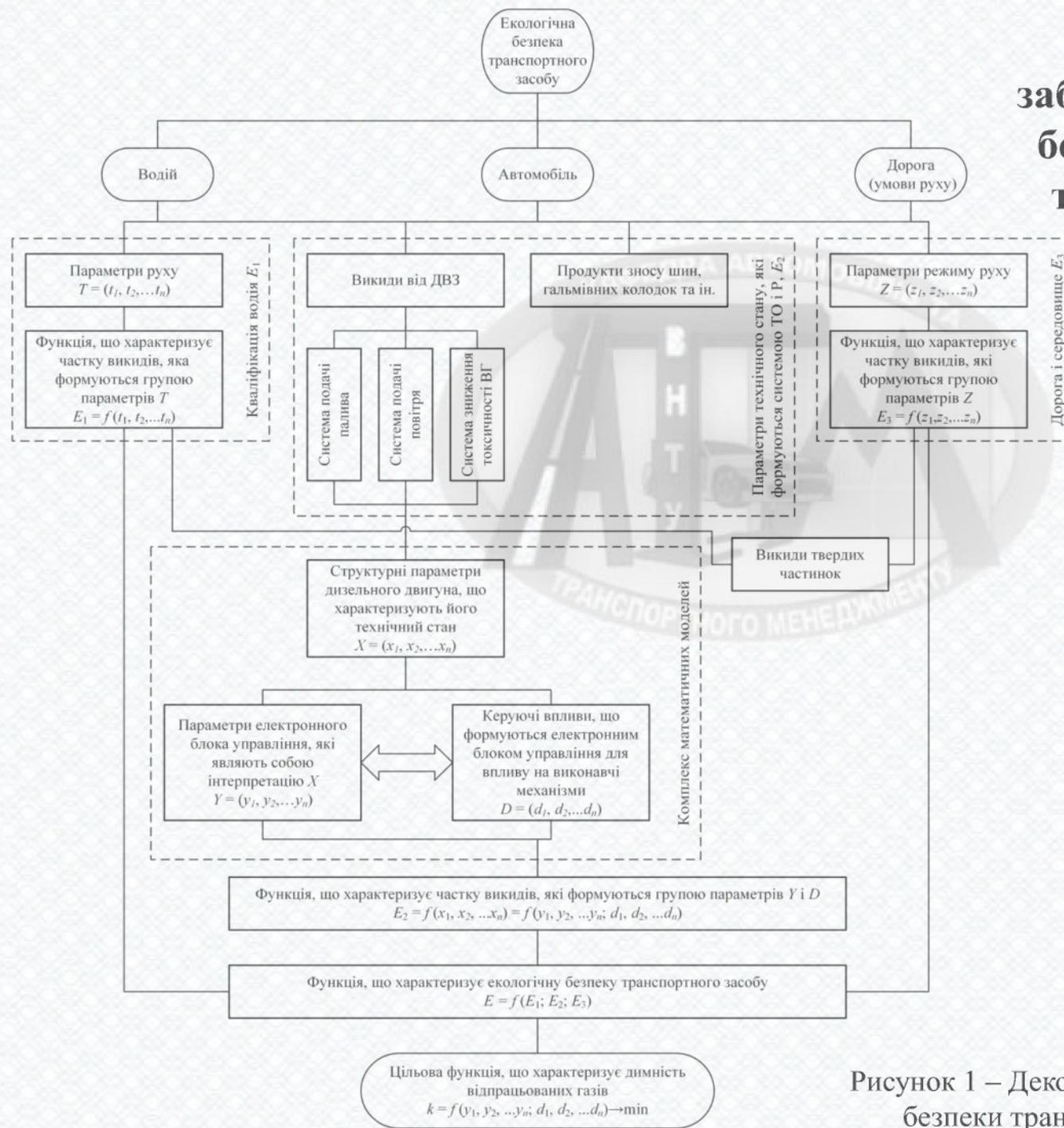
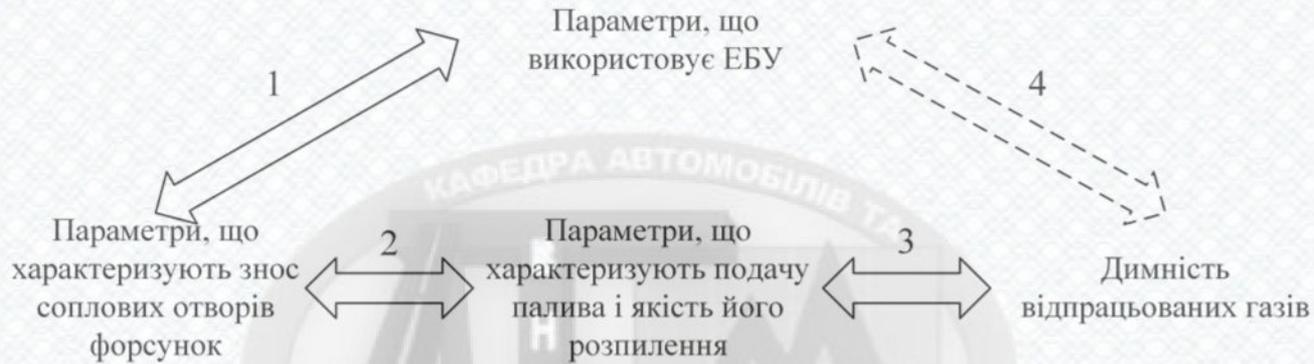


Рисунок 1 – Декомпозиція екологічної безпеки транспортних засобів

Комплекс математичних моделей підвищення екологічної безпеки автомобілів з дизельними двигунами



- 1 – моделі, що обумовлюють взаємозв'язок між конструктивними параметрами, що характеризують знос форсунок, і параметрами, що використовуються електронним блоком управління,
- 2 – моделі, що обумовлюють взаємозв'язок між параметрами, що характеризують знос форсунок, і параметрами, що характеризують подачу палива і якість його розпилення,
- 3 – моделі, що обумовлюють взаємозв'язок конструктивних параметрів з димністю відпрацьованих газів,
- 4 – моделі, що обумовлюють взаємозв'язок параметрів, що використовуються електронним блоком управління, і димністю відпрацьованих газів.

Функція концентрації сажі в відпрацьованих газах

$$k = f\left(\tau_{впр}; p_{абс}; p_{рамн}; N_{обр}; EGR_{rate}; \frac{dN}{dt}; T_{ен}\right)$$

де $p_{абс}$ – значення абсолютного тиску у впускному колекторі (Н/м²);

$N_{обр}$ – частота обертання колінчастого валу (об/хв);

EGR_{rate} – пропорційність відкриття клапана рециркуляції відпрацьованих газів;

$\frac{dN}{dt}$ – швидкість зміни обертів;

$T_{ен}$ – температура впускного повітря.

Регресіна модель

$$PM = k_0 \cdot \tau_{впр}^{a_1} \cdot N_{обр}^{a_2} \cdot p_{абс}^{a_3} \cdot p_{рамн}^{a_4} \cdot EGR_{rate}^{a_5} \cdot e^{a_6 T_{ен}} \cdot \left(1 - \frac{dN}{dt}\right)^{a_7} + b_0$$

де $k_0, b_0, a_1 \dots a_7$ – регресійні коефіцієнти.

Перерахунок концентрації сажі на димність

$$k = k_{II} \left(k_0 \cdot \tau_{впр}^{a_1} + b_0 \right)$$

де k – димність відпрацьованих газів, (м¹);

k_{II} – базовий коефіцієнт перерахунку димності, (м⁻¹/(мг/м³)).

Результати моделювання процесу впорскування та розпилювання дизельного палива в циліндр двигуна (1)

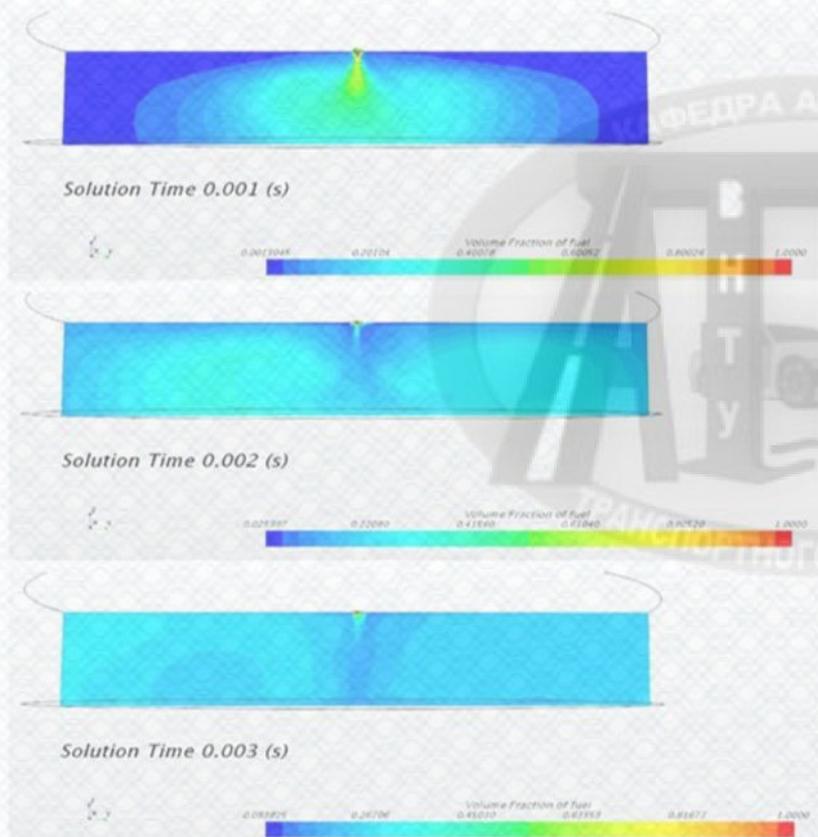


Рисунок 1 – Розподіл концентрації палива за об'ємом камери згоряння, розпилювач без гідроабразивного зносу, тиск впорскування мінімальний (у площині поздовжнього перерізу, що проходить через розпилювач)

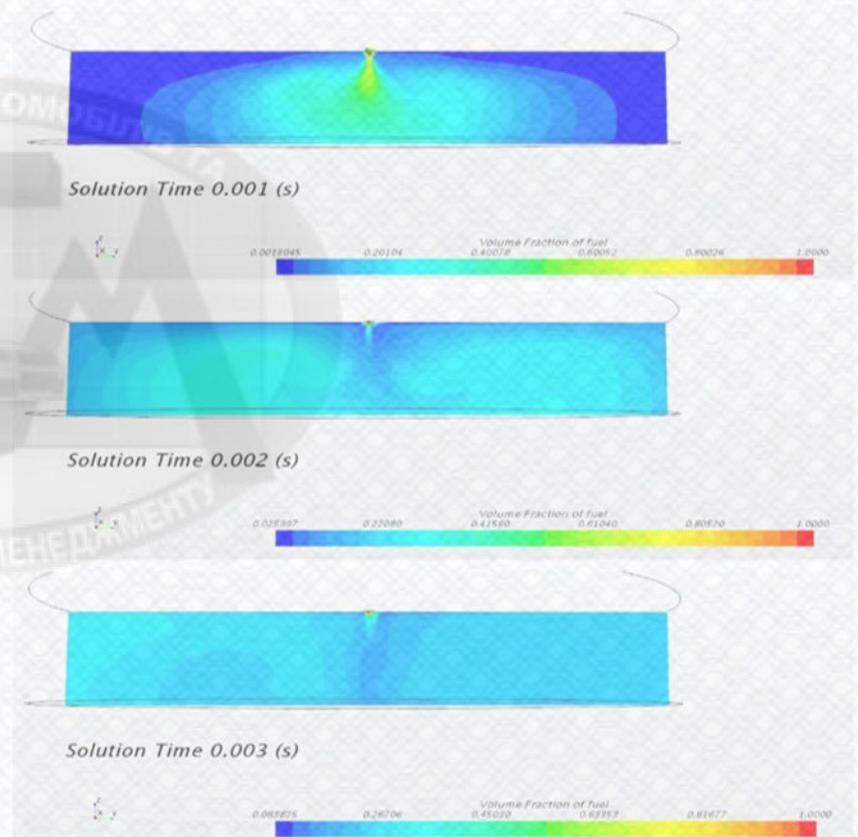


Рисунок 2 – Розподіл концентрації палива за об'ємом камери згоряння, розпилювач без гідроабразивного зносу, тиск впорскування максимальний (у площині поздовжнього перерізу, що проходить через розпилювач)

Результати моделювання процесу впорскування та розпилювання дизельного палива в циліндр двигуна (2)

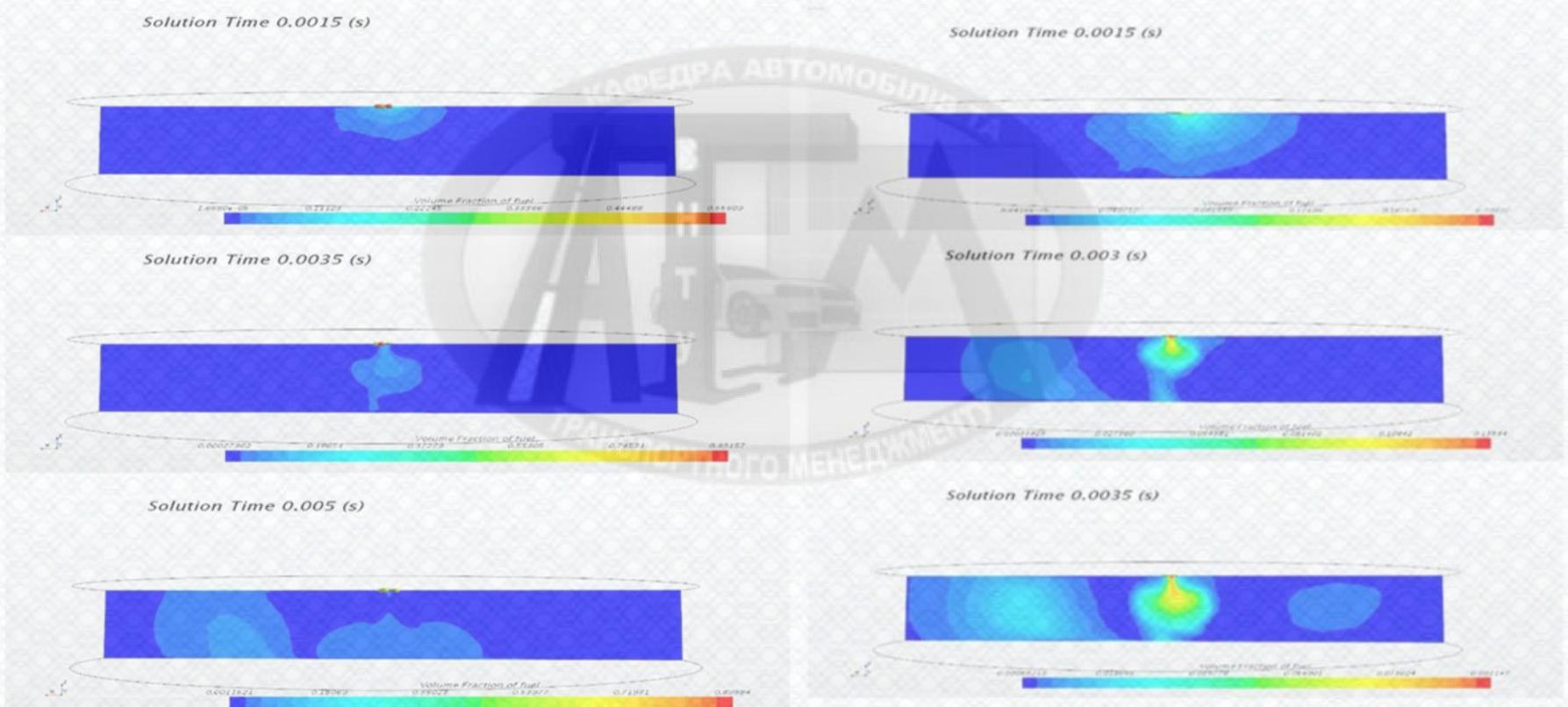


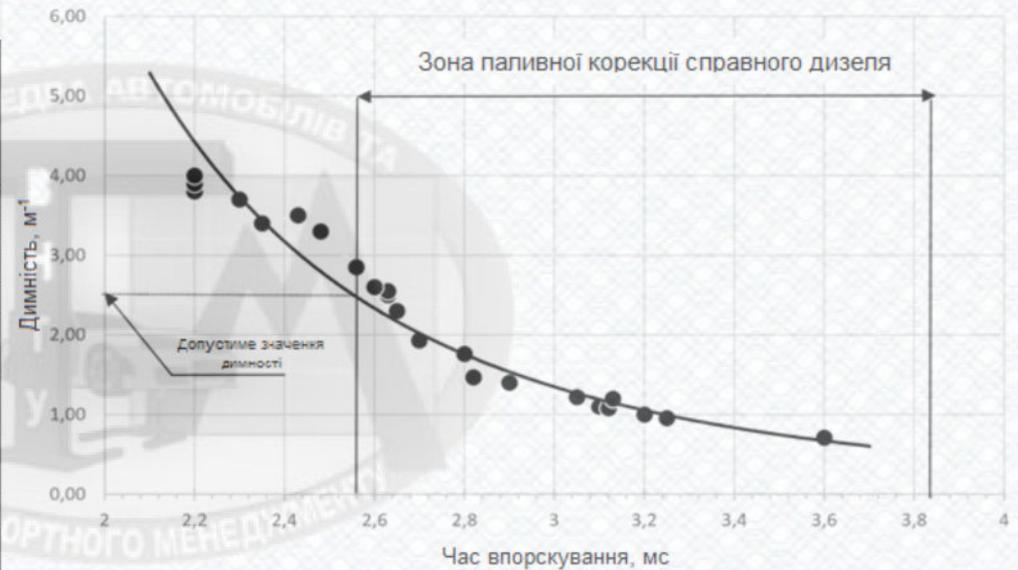
Рисунок 3 – Розподіл концентрації палива за об'ємом камери згоряння, розпилювач зі слідами гідроабразивного зносу, тиск впорскування мінімальний (у площині поздовжнього перерізу, що проходить через розпилювач)

Рисунок 4 – Розподіл концентрації палива за об'ємом камери згоряння, розпилювач зі слідами гідроабразивного зносу, тиск впорскування максимальний (у площині поздовжнього перерізу, що проходить через розпилювач)

Результати дослідження залежності димності відпрацьованих газів від тривалості впорскування

Таблиця 1 – Фрагмент масиву значень, одержаних з бортової мережі самодіагностики автомобіля

Димність - k	Тривалість впорскування - $\tau_{впр}$	Тиск палива в рампі - $P_{рамп}$	Тиск повітря у впускному колекторі - $P_{абс}$	Частота обертання колінчастого вала - $N_{обр}$	Температура повітря на впуску - $T_{вп}$	Відкриття клапана EGR - EGR_{gate}
1,10	3,10	570	16	3633	30	1
1,03	3,15	530	16	3518	31	2
1,24	3,00	490	15	3378	29	1
1,33	2,95	570	17	3646	30	0
1,33	2,95	580	16	3470	30	2
0,98	3,20	560	16	3611	29	1
0,82	3,40	560	15	3411	28	1
0,84	3,85	570	17	3522	30	0
1,41	2,90	540	16	3560	29	1
1,61	2,80	560	16	3496	30	1
1,72	2,75	570	15	3547	25	2
1,41	2,90	560	17	3386	30	1
1,51	2,85	530	17	3517	28	0
1,83	2,70	570	17	3447	30	1
1,96	2,65	570	16	3491	30	1
1,96	2,65	570	16	3446	30	2
2,99	2,30	560	15	3628	30	1
2,36	2,50	540	17	3456	30	0
2,51	2,45	520	16	3517	27	1
3,34	2,20	570	16	3422	34	1
2,82	2,35	560	16	3584	29	2
2,36	2,50	570	17	3587	30	1
1,96	2,65	540	16	3452	30	0
2,82	2,35	560	16	3364	30	1
2,99	2,30	550	17	3507	30	2

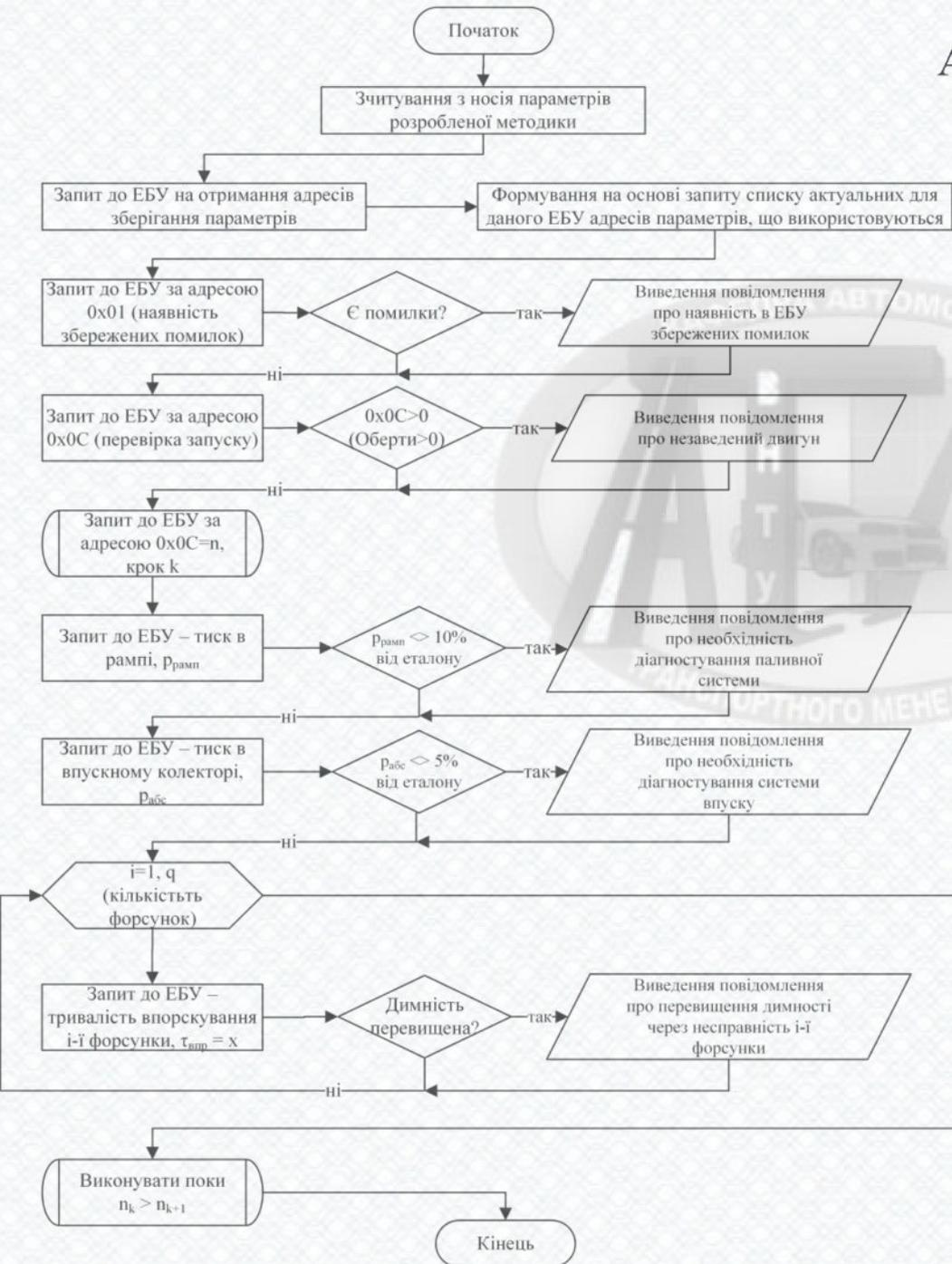


Рисунк 1 – Залежність димності відпрацьованих газів дизельного двигуна від часу відкриття форсунки

$$y=90,76x^{-3,831}$$

$x = \tau_{впр}$ – тривалість впорскування,
 $y = k$ – димність.

Алгоритм реалізації розробленої методики



Висновки

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було вирішено питання підвищення екологічної безпеки автомобільних транспортних засобів в умовах експлуатації.

1. Проведений аналіз існуючих методів діагностування елементів паливної апаратури дизелів (паливні форсунки), стан яких впливає на склад відпрацьованих газів, дозволив стверджувати, що існуючі методи діагностування паливної апаратури і засоби їх реалізації не повною мірою забезпечують дотримання вимог, що висувуються до екологічності дизельних двигунів транспортних засобів в експлуатації. Перспективним напрямком у даній сфері є удосконалення методів підвищення екологічної безпеки, що запобігає порушенню вимог до димності відпрацьованих газів під час експлуатації автомобільного транспорту з дизельними двигунами, заснованого на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком управління двигуном.

2. Аналіз структури і стану ВТБ ТОВ «АТП Слободянюк», дозволив встановити, що наявна ВТБ потребує удосконалення, як з метою підвищення експлуатаційної надійності власних автобусів і забезпечення можливостей надання автосервісних послуг, так і для отримання можливостей обслуговування перспективних автомобільних конструкцій.

3. Обґрунтовано можливість контролю димності відпрацьованих газів за параметрами, що використовуються електронним блоком управління. Обґрунтовано введення діагностичного параметра, який залежить від зносу соплових отворів розпилювача форсунки і є параметром робочого процесу, що використовується блоком керування. Таким параметром є тривалість упорскування палива.

4. Проведено CFD моделювання впорскування форсунки за допомогою програмного комплексу Simcenter Star-CCM+. Моделювання, проведені в 4 режимах підтвердило суттєвий вплив зносу соплових отворів форсунки на якість розпилу палива та його рівномірність розподілу камерою згоряння.

5. Отримана залежність димності відпрацьованих газів на режимі вільного прискорення колінчастого валу двигуна від тривалості впорскування палива в частині її характеру універсальна для дизельних двигунів з електронним управлінням упорскуванням палива системи Common Rail і відрізнятиметься від інших двигунів лише значеннями коефіцієнтів регресії.

6. Розроблена методика підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами на основі безперервного контролю значень діагностичного параметра – тривалості упорскування – використовуваного електронним блоком керування двигуном. Запропоновано програмно-апаратний комплекс для реалізації методики, що реалізує отримання та обробку даних від електронного блоку керування двигуном для розрахунку димності в режимі реального часу.

7. Виконана економічна оцінка ефекту від впровадження методики підвищення екологічної безпеки автотранспортних засобів з дизельними двигунами, заснованого на безперервному контролі параметрів, що використовуються електронним блоком управління, у діяльність підприємства ТОВ «АТП Слободянюк» свідчить про можливість скорочення витрат на пальне при експлуатації 1,59 млн грн. Оціночний термін окупності складе менше одного року.

Додаток Б
(обов'язковий)

**Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових
запозичень**



ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Підвищення екологічної безпеки дизельних двигунів автобусів товариства з обмеженою відповідальністю «АТП Слободянюк» місто Вінниця

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

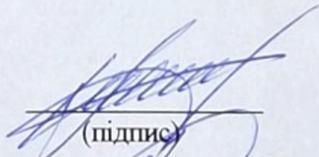
Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КПІ) 3 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

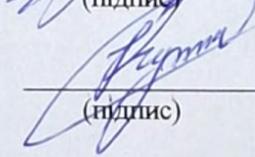
- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

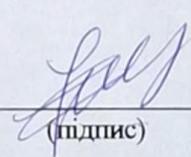
Експертна комісія:

Цимбал С.В., завідувач кафедри АТМ
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

Кужель В.П., доцент кафедри АТМ
(прізвище, ініціали, посада)

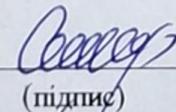

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 

(підпис)

Цимбал О.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 

(підпис)

Смирнов Є.В., доцент кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 

(підпис)

Фалюкович О.І.

(прізвище, ініціали)