

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Діагностичні підходи до оцінки зносостійкості матеріалів деталей  
циліндро-поршневої групи ДВЗ**

Рівень вищої освіти: другий магістерський  
Галузь знань: 13 Механічна інженерія  
Спеціальність: 132 Матеріалознавство  
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр: КРММТВА 25.24339.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу,  
група МТВАм -24-1

 Дмитро ДАНЮК


Керівник, к.т.н., доцент

 Максим ДИХА

Нормоконтролер, к.т.н., доцент

 Олег БАБАК

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри ТАМ

 Олександр ДИХА

7 12 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра: трибології, автомобілів та матеріалознавства  
Рівень вищої освіти: другий магістерський  
Галузь знань: 13 Механічна інженерія  
Спеціальність: 132 Матеріалознавство  
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТАМ  
Олександр ДИХА

" 15" жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Данюк Дмитро Сергійович

1. Тема роботи: Діагностичні підходи до оцінки зносостійкості матеріалів деталей циліндро-поршневої групи ДВЗ

Керівник роботи: Диха Максим Олександрович, к.т.н.

Затверджено наказом університету від 25.08.2025р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 15.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

2) *Технічні умови випробування деталей ЦПГ*

3) *Матеріали переддипломної практики.*

4) *Нормативно – технологічна документація стандартизованим методам випробувань ЦПГ ДВЗ*

5) *Результати літературного огляду і патентного пошуку.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. *Стан питання надійності ЦПГ та завдання досліджень*

2. *Обґрунтування існуючих методів і теоретичне дослідження процесів в ЦПГ ДВЗ*

3. *Методика експериментальних досліджень параметрів стиснення ЦПГ*

### 5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2025р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Стан питання надійності ЦПГ та завдання досліджень	1.11.2025	
2	Обґрунтування існуючих методів і теоретичне дослідження процесів в ЦПГ ДВЗ	15.11.2025	
3	Методика експериментальних досліджень параметрів стиснення ЦПГ	1.12.2025	
4	Оформлення презентаційних матеріалів та пояснювальної записки	10.12.2025	

Студент

Дні Дмитро ДАНИЮК

Керівник кваліфікаційної роботи

Дух Максим ДИХА

## РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 85 сторінок, кількість рисунків - 24, таблиць - 12, додатків - 1, кількість джерел згідно із переліком посилань - 19.  
Студент гр. МТВАм-24-1 Данюк Д.С.

Тема «Діагностичні підходи до оцінки зносостійкості матеріалів деталей циліндро-поршневої групи ДВЗ»

На сьогоднішній день введу ускладнення конструкції двигунів, все більш затребуваним стає використання та розробка нових методів діагностики ЦПГ, які мають низьку трудомісткість і не потребують доступу до камери згоряння.

Мета роботи:

Підвищення ефективності діагностування циліндропоршневої групи двигунів внутрішнього згоряння.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання дослідження:

1. Вибрати діагностичні параметри.
2. Вибрати режими діагностування ЦПГ
3. Оцінити достовірність діагностування ЦПГ за осцилограмою тиску на такті стискування.

**Перелік ключових слів:** двигун внутрішнього згоряння, циліндро-поршнева група, діагностика, зносостійкі матеріали

## Зміст

**Вступ**

**6**

1.	СТАН ПИТАННЯ НАДІЙНОСТІ ЦПГ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	8
1.1	Вплив технічного стану ЦПГ на надійність двигуна та його техніко-економічні показники роботи .....	8
1.2.	Аналіз способів контролю технічного стану та діагностування ЦПГ ДВЗ .....	17
1.2.1.	Аналіз способів контролю технічного стану та діагностування ЦПГ.....	17
1.2.2.	Принципова схема вбудованих засобів діагностування .....	21
2.	ОБГРУНТУВАННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В ЦПГ ДВЗ.....	44
2.1.	Теоретичне обґрунтування існуючих методів діагностування ЦПГ.....	44
2.1.1.	Вимірювання тиску компресометром.....	44
2.1.2.	Вимірювання витрат картерних газів.....	46
2.1.3.	Віброакустичний метод діагностування.....	50
2.1.4.	Трибодіагностика.....	54

КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Данюки		<i>Дн</i>	
Перевір.	Диха М		<i>DM</i>	
Н.контр.	Бабак		<i>[Signature]</i>	
Затвер	Диха		<i>[Signature]</i>	
Діагностичні підходи до оцінки зносостійкості матеріалів деталей циліндро-поршневої групи ДВЗ			Літ.	Аркуш
			4	80
ХНУ, гр. МТВАм-24-1				

2.2.Теоретичні дослідження впливу на процес стиснення робочої суміші.....	57
2.3. Вибір режимів діагностування.....	63
<b>3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ СТИСНЕННЯ ЦПГ.....</b>	<b>67</b>
3.1.Загальна методика експериментальних досліджень.....	67
3.2.Вибір обладнання.....	69
3.3.Методика проведення дослідження.....	74
3.4. Результати експерименту.....	79
Основні висновки	82
Список використаних джерел	83
Додатки	85

## ВСТУП

Циліндро-поршнева група (ЦПГ) належить до найбільш навантажених вузлів двигуна внутрішнього згоряння і є однією з головних причин зниження його технічного ресурсу. За статистичними даними, несправності ЦПГ становлять близько 25% від загальної кількості відмов двигуна, поступаючись лише системі живлення паливом (приблизно 40%). Герметичність камери згоряння безпосередньо визначає ефективність роботи двигуна і є ключовим показником його ресурсу та технічного стану.

Робота ЦПГ відбувається в особливо складних умовах — при високих температурах, інтенсивній дії газового середовища та значних змінних навантаженнях. У результаті з часом відбувається зношування поршневих кілець і робочої поверхні циліндра, що призводить до порушення процесу стиснення паливо-повітряної суміші. Це, у свою чергу, впливає на стабільність займання, потужність, витрату палива та мастила, а також збільшує токсичність відпрацьованих газів. Зниження компресії в циліндрах проявляється у труднощах запуску двигуна, підвищеній витраті пального, появі сизого диму у вихлопі та зменшенні динамічних характеристик автомобіля.

У зв'язку з ускладненням конструкцій сучасних двигунів та впровадженням нових систем керування все більшої актуальності набувають методи діагностування ЦПГ, які дозволяють здійснювати контроль без розбирання двигуна. Такі методи мають бути малотримними, швидкими у виконанні та придатними для використання в експлуатаційних умовах. На сьогоднішній день регламентами технічного обслуговування легкових автомобілів передбачено використання низки класичних засобів для перевірки стану ЦПГ: від механічних стетоскопів для виявлення сторонніх шумів до компресометрів, що встановлюються замість свічок запалювання, а також електронних

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

мотортестерів. Однак достовірність результатів, отриманих такими приладами, є відносно низькою через вплив багатьох побічних чинників — температури, швидкості обертання вала, якості герметизації тощо.

У спеціальній літературі, наукових працях та патентних джерелах описано більш точні методи визначення технічного стану циліндра. Проте їх використання у практичній діагностиці обмежене складністю реалізації або потребою у спеціалізованому обладнанні. Одним із перспективних напрямів є метод діагностування двигуна шляхом аналізу індикаторних діаграм тиску, що будуються за непрямыми вимірюваннями. Для цього в шпильки або болти кріплення головки блоку циліндрів встановлюють тензодатчики, які реєструють напруги, викликані зміною тиску в циліндрах під час роботи двигуна. На основі цих сигналів формують графічні індикаторні діаграми, які порівнюють з еталонними. Така методика дозволяє підвищити точність оцінки технічного стану двигуна без прямого доступу до камери згоряння, але має і певні обмеження. Зокрема, вона вимагає підбору конкретного типу двигуна, точного встановлення датчиків і наявності спеціального вимірювального обладнання, що ускладнює її застосування в умовах експлуатації. Саме усунення цих недоліків і підвищення ефективності діагностування становить основну мету даної роботи.

**Мета роботи:** Підвищення ефективності діагностування циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згоряння шляхом удосконалення методів контролю технічного стану без розбирання двигуна.

**Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:**

1. Обґрунтувати вибір основних діагностичних параметрів, що характеризують технічний стан ЦПГ.
2. Визначити оптимальні режими проведення діагностування з урахуванням умов роботи двигуна.
3. Провести аналіз достовірності результатів оцінювання технічного стану ЦПГ за осцилограмами тиску в такті стиснення.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

# 1. СТАН ПИТАННЯ НАДІЙНОСТІ ЦПГ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Вплив технічного стану циліндрової групи двигуна на його техніко-економічні показники роботи

Поршневий вузол є серцем двигуна внутрішнього згоряння. Поршневий пакет головним чином призначений для відділення камери згоряння від картера за допомогою ефективного лабіринтного ущільнення з використанням серії металевих кілець. Поршневий пакет також призначений для запобігання розбризкуванню оливи в камеру згоряння, обмеження кількості оливи на контактній поверхні циліндра та передачі тепла від поршня до циліндра. Поршневі кільця принципово поділяються на два типи: стискаючі кільця та маслороздатні кільця (або скребкові кільця). Геометричні характеристики поршня та кільця наведені на рис. 1.1. Зазвичай є два комплекти компресійних кілець для забезпечення ефективності ущільнення та одне кільце для контролю подачі оливи для обмеження та рівномірного розподілу оливи над гільзами циліндрів. Однак верхнє компресійне кільце працює в набагато екстремальніших умовах: високій температурі та тиску. Тому в цьому дослідженні буде зосереджено більше уваги на цьому.



Рисунок 1.1. Геометричні характеристики поршня та кільця

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

У двигунах внутрішнього згоряння поршневий вузол рухається вгору та вниз, перетворюючи енергію згоряння в енергію обертання колінчастого вала. Схема механізму колінчастого вала показана на рис.1.2., що дозволяє краще зрозуміти рухи між поршневим вузлом та гільзою циліндра відносно обертальних рухів колінчастого вала.

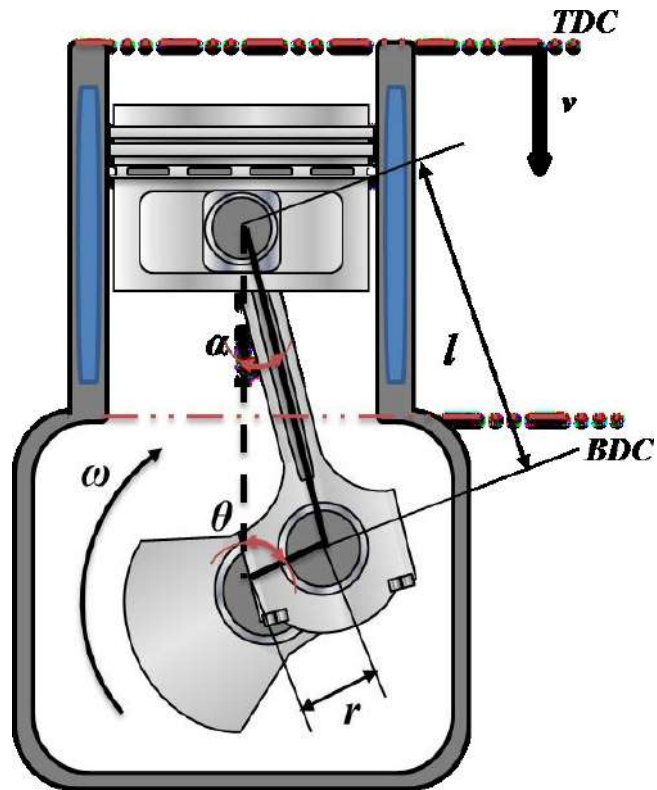
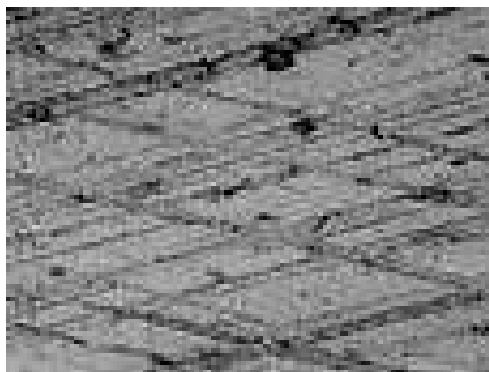


Рисунок 1.2. Принципова діаграма руху кривошипно-поршневого механізму



(б)

Рисунок 1.3. типова поверхня лайнера, (а) типовий хонінгований циліндр з плато та (б) зображення лайнера, отримані за допомогою лазерної мікроскопії

Шорсткість поверхні є важливим фактором, який використовується для визначення стану обробленої поверхні компонентів. Поверхні кілець та гільз обробляються для запобігання тертю та зносу. Поверхня гільзи циліндра зазвичай обробляється шляхом хонінгування. Хонінгування - це абразивний процес обробки для отримання прецизійної поверхні. Показано типові поверхні гільзи. Поверхня гільзи циліндра зазвичай має платоподібну шорсткість та перехресну штриховку для збереження оливи та високої несучої здатності.

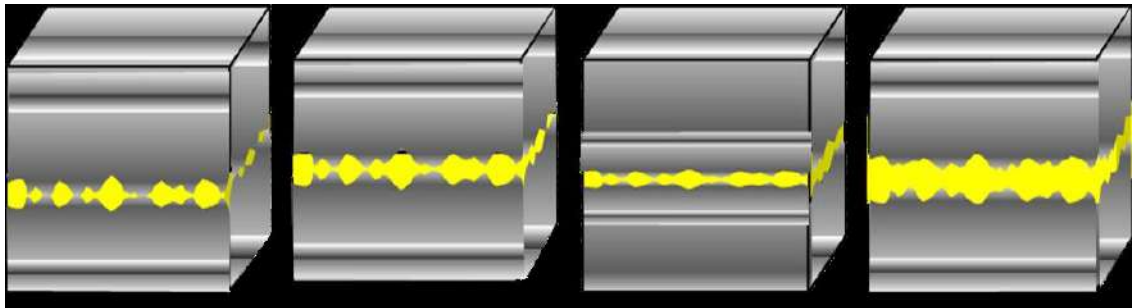
Бічні сторони поршневих кілець повинні підтримувати певний рівень шорсткості, коли вони ковзають по гільзі циліндра, а шорсткість поршневих кілець використовується для забезпечення плавного руху поршнів у циліндрі, мінімізуючи при цьому стирання, спричинене тертям.

Перш ніж обговорювати характеристики тертя та змащування поршневого вузла, для глибшого розуміння трибологічної поведінки, пов'язаної з АС, буде розглянуто деякі основи теорії змащування. Коли питомі

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

навантаження або швидкості на двох контактуючих поверхнях змінюються, можна формалізувати чотири різні ситуації або режими змащування на двох поверхнях, що змащуються рідиною, а саме: граничне змащування, змішане змащування, еластогідродинамічне змащування та гідродинамічне змащування, як показано на рисунку. Рисунок 2-4з чотирма схематичними діаграмами відповідно.

Граничне змащування, вперше запропоноване Харді та Даблдеєм у 1922 році, являє собою стан, коли відбувається постійний контакт у найвищих



точках взаємодіючих поверхонь, оскільки висота нерівностей на шорсткій поверхні більша за товщину плівки в тій самій точці. Комвопулос та його колеги стверджували, що основним стаціонарним станом граничного змащування є орання, при якому зсув мастильної плівки між поверхнями ковзання та адгезія між нерівностями, хоча й можуть виникати, вносять менший внесок у загальну силу тертя, ніж орання. Отже, два інтерфейси генеруватимуть більше зносу при граничному змащуванні, ніж три інші згадані вище режими.

Рисунок 1.4. Формування плівки в режимах змащення

Гідродинамічне змащування вказує на те, що товста трибоплівка, що утворюється з достатньо високою швидкістю, може запобігти будь-якому контакту поверхонь одна з одною. Теорію гідродинамічного змащування вперше опублікував Рейнольдс у 1886 році. Це відбувається між двома

поверхнями, що рухаються відносно з достатньою швидкістю для утворення змащувальної плівки. Гідродинамічний тиск виникає, коли дві контактні поверхні рухаються назустріч одна одній, наприклад, ущільнювальна поверхня поршневого кільця рухається відносно поверхні гільзи циліндра.

Еластогідродинамічне змащування спричинене високим навантаженням і високим контактним тиском, що змінює тонкість плівки між контактуючими поверхнями. В'язкість трибоплівки швидко зростає з високим контактним тиском, що також корелює з пружними властивостями матеріалів та відносною швидкістю. Інтерфейси еластогідродинамічного змащування мають дуже низькі коефіцієнти тертя завдяки тоншим плівкам, що зменшують контакти між нерівностями.

Нарешті, змішаний режим змащування - це режим, коли на поверхнях розділу фаз виникають як граничний, так і еластогідродинамічний режими.

Крім того, хімічні та фізичні дії в тонких трибоплівках впливають на режими змащування. Хімічні дії корелюють з ефектами добавок, таких як діалкілдифосфат цинку як одна з найпоширеніших протизношувальних добавок. Фізичні дії головним чином корелюють зі зміною в'язкості всесезонних мастил, що містять полімер, яка зменшується при високій швидкості зсуву та збільшується при підвищеному тиску. Були розроблені більш складні математичні моделі для зображення поведінки змащування, пов'язаної з фізичними діями в галузі двигунів. Складність полягає в експериментальному підтвердженні цих передбачуваних поведінок, оскільки вони відбуваються в екстремальних умовах, коли існуючі системи випробувань не можуть виміряти їх у режимі реального часу. Тим не менш, у цій галузі спостерігаються стійкі ознаки прогресу з новими методами випробувань та аналізу.

Ця робота в основному стосується змащування системи поршень-циліндр. Доцільно мати загальне розуміння різних режимів змащування, з

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

якими стикається поршневий вузол. Традиційна крива Штрібека виявилася корисною для визначення граничних, змішаних та гідродинамічних режимів змащування контактуючих поверхонь. Ідеальна модель контакту поршневого кільця та гільзи циліндра передбачає достатню трибоплівку для змащування під час зворотно-поступальних рухів поршня. Однак, серія досліджень показала, що моделі контакту граничного змащування та нерівностей поверхні повинні включатися в моделювання тертя поршневого кільця та моделювання зносу.

Вид епюри зношування зображено рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Характер зношування дзеркала циліндра ДВЗ.

Для покращення експлуатаційних характеристик та надійності двигуна, це дослідження зосереджено на дослідженні поведінки трибологічного з'єднання між кільцем та вкладишем на основі комплексного аналізу вимірювань неінтрузивної акустичної емісії (АС). Зокрема, дослідження надасть більше знань про використання АС для онлайн-моніторингу та діагностики роботи з'єднання.

Для виконання цього дослідження, воно інтегрує аналітичні прогнози теоретичного моделювання механізму генерації АС з обширними експериментальними оцінками. Більше того, ефективні методи обробки сигналів реалізовані з комбінацією прогнозів АС на основі моделі для вилучення слабких та нестаціонарних складових АС, які більше корелюють з

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

трибологічною поведінкою.

На основі традиційних трибологічних моделей трибологічна АС моделюється як зумовлена двома основними динамічними ефектами: зіткненням нерівностей та взаємодією рідини з нерівностями, що дозволяє пояснити виміряні сигнали АС від трибологічного поєднання за різних сценаріїв, особливо за аномальної поведінки. АС, викликана FAI, більше корелює з мастильними матеріалами та швидкістю. Вона проявляється переважно в середині робочих циклів двигуна, але набагато слабша та сильно впливає на АС не лише через посадки клапанів, удари згоряння та впорскування палива, але й через вплив значних ААС через прямі контакти та тверді частинки в оливах.

Для вилучення слабких АС для точної діагностики трибологічної поведінки, до сигналів АС застосовується вейвлет-аналіз за трьома новими схемами: 1) вибір вейвлет-коефіцієнтів на основі жорсткого порогу, в якому порогове значення та параметри вейвлет-аналізу визначаються з використанням модифікованої швидкості руху поршня, яка має високу залежність від характеристик АС, передбачених двома моделями; 2) адаптивний вибір вейвлет-коефіцієнтів порогу, в якому поріг поступово оновлюється, щоб мінімізувати відстань між обвідними АС та передбаченою залежністю; та 3) аналіз вейвлет-пакетного перетворення виконується за допомогою оптимізованого вейвлета Добеші за допомогою нового підходу, заснованого на мінімізації перекриття часу та частоти в спектрі БПВ. На основі цих оптимальних аналізів, локальна амплітуда обвідної та середній залишковий вейвлет-коефіцієнт розробляються з сигналів АС як нові індикатори для відображення трибологічної поведінки.

Як значення на основі жорсткого порогу, так і значення LEA на основі вейвлет-пакетного перетворення дозволяють діагностувати два різні нові мастила відповідно до прогнозів моделі, тоді як вони дають менш узгоджені

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

результати в диференціації відпрацьованої оливи за різних умов експлуатації. Тим не менш, може успішно розділити відпрацьовану оливу, оскільки він може висвітлити ефекти внаслідок зіткнень частинок у відпрацьованих оливах.

Аналогічно, демонструє незначний вплив двох альтернативних видів палива на трибологічну поведінку. Однак, це демонструє значно вищі амплітуди в кількох робочих умовах, коли може утворюватися більше частинок через нестабільне та неповне згоряння як біодизеля, так і дизельного палива FT порівняно з чистим дизельним паливом, що вказує на те, що вони можуть спричинити легкий знос.

Трибологія була визначена як «наука та практика взаємодіючих поверхонь у відносному русі». У системі двигуна внутрішнього згоряння трибологічна поведінка головним чином пов'язана з тертям, зносом, корозією, деградацією поверхні та втратами енергії, як це було запропоновано. Як основні джерела енергії, двигуни внутрішнього згоряння широко використовуються в різних галузях промисловості, таких як різні транспортні засоби та електростанції. Паливна ефективність, надійність, стабільність, термін служби та екологічна стійкість є кінцевими цілями двигунобудування. Примітно, що покращення трибологічної поведінки може бути одним із найважливіших та найкорисніших підходів до досягнення вищезазначених цілей. Крім того, нещодавні кризи виснаження паливних ресурсів та погіршення стану навколишнього середовища сприяли проведенню більшої кількості досліджень можливості використання альтернативних видів палива замість ископного, що означає, що очікується, що замінні джерела енергії не тільки продемонструють кращу продуктивність згоряння з меншими викидами, але й збережуть прийнятні трибологічні характеристики використання чистого дизельного палива.

Серед різних трибологічних з'єднань у двигуні внутрішнього згоряння система поршневих кілець-гільз циліндра є найважливішою та найскладнішою. Її характеристики мають вирішальне значення для підтримки високої

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продуктивності згоряння та низького рівня викидів. Важкі умови роботи з різкими змінами температури, тиску, швидкості та навантаження можуть суттєво впливати на термін служби двигуна. Крім того, вважається, що понад 30% пального використовується для подолання тертя в легкових автомобілях, зокрема, було показано, що поршневі кільця та гільзи циліндра відповідають за значну частину втрат на тертя в двигуні. Тому трибологічна поведінка системи поршневих кілець-гільз визнана найважливішим аспектом, що впливає на характеристики двигуна.

Для отримання достатнього розуміння трибологічної поведінки системи кілець-вкладиш було проведено велику кількість дослідницьких робіт з розробки більш комплексних моделей та детального моделювання. Значні досягнення в трибологічному моделюванні та чисельному моделюванні взаємодії кільця та вкладиша були досягнуті за допомогою усередненого рівняння Рейнольдса на основі загального розуміння поршневих кілець, що працюють у режимі змішаного змащення. Були проведені складні обчислювальні дослідження для вивчення широкого спектру практичних впливів під час контактів поршневих кілець з отвором, таких як профіль поршневого кільця, його деформація, продування, профіль циліндра та теплова деформація, кавітація мастила та конформність контакту кільця з отвором. Ці моделі та результати дали глибоке розуміння роботи поршневих кілець, що згодом може бути використано для покращення зменшення тертя в поршневому вузлі. Крім того, ряд інших дослідників додали процес зношування до моделювання системи кільця-гільзи, щоб дати повне розуміння трибологічного процесу кілець та гільз, що зазнають поступового зношування. Однак, через складність трибології двигуна, важко поєднати всі важливі трибологічні параметри та фактори в моделі. Тому експериментальні дослідження, що корелюють з трибологічною поведінкою поршневих кілець та гільз циліндрів, мають вирішальне значення для виявлення трибологічних

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

характеристик поршня.

З іншого боку, змащення поршневих кілець є важливим для стабільної роботи та терміну служби двигунів. Через високодинамічні умови експлуатації системи кільця-вкладиші, мастильні матеріали двигуна піддаються різній швидкості та, отже, ступеню погіршення протягом терміну служби. Традиційний моніторинг якості оливи базується на аналізі лабораторних зразків оливи через заданий інтервал часу, що здійснюється зі значними недоліками, такими як забруднення зразків, високі витрати та затримка результатів. Зокрема, традиційні дослідження зносу поршневого вузла зазвичай вимагають розбирання двигунів для внутрішнього огляду після тривалого використання.

Хоча деякі комерційні датчики призначені для безперервного моніторингу стану або якості оливи, більшість із них є вставними, тобто їх потрібно закріплювати в одному місці системи. Зокрема, такі датчики потрібно занурювати в масляний канал, який закріплений далеко від двох ковзних поверхонь кільцевої гільзи. Отже, ці датчики, розташовані в певному місці, не можуть надавати точну та своєчасну інформацію про систему кільцевої гільзи за нестационарних робочих умов у двигунах.

Складні механічні апарати часто випадково виходять з ладу незалежно від терміну їхнього терміну служби. Процеси зношування системи кільця-вкладиш є найбільш небажаними поломками двигунів. Стан змащення означає різні стани, за яких мастило відокремлює дві поверхні від прямого контакту, щоб зменшити тертя та, як наслідок, знос. Правильний стан змащення допомагає зменшити передчасні поломки та час простою машин. Для виявлення значних змін, що виникають через несправності в системі кільця-вкладиш, онлайн-моніторинг стану є цінною технологією для прогнозування та моніторингу стану на основі стану. Зокрема, неінвазивний метод моніторингу може надати вичерпну інформацію про контакт кільця та вкладиша без будь-яких змін.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Зокрема, акустична емісія (АС) індукується енергією деформації, яка спонтанно та швидко вивільняється під час деформації або руйнування матеріалів. Технологія АС була розроблена для діагностики стану двигунів та процесу тертя контактної поверхні. Спорадичні дослідження намагалися пов'язати вимірювання АС двигунів зі зносом або процесом тертя кільця-вкладиш.

Усі вищезазначені дослідження та досягнення показують можливість моніторингу трибологічного процесу в системі поршневе кільце-гільза. Однак, немає подальших знань про характеристики тертя та змащування поршневого кільця-гільзи циліндра, які б відрізняли процес зношування в двигунах. Тому необхідно моніторити трибологічну поведінку системи кільце-гільза в режимі реального часу. Це головним чином тому, що характеристики трибологічного процесу контакту кільця та гільзи в режимі реального часу можуть бути використані для визначення різниці між нормальними умовами тертя та змащування та раннім аномальним зносом. Крім того, це також можливий онлайн-підхід до оцінки трибологічного впливу нових альтернативних палив на двигуни.

Через складність трибології кільця-вкладиша, трибологічні фактори та динамічні фактори системи, такі як контактна сила, швидкість ковзання, високі температури та реологічні властивості мастила, такі як в'язкість, змінюються нелінійно в системі двигуна. Це означає, що трибологічну поведінку поршневого вузла дуже складно моделювати та вимірювати з достатньою точністю, що дозволяє адекватно зрозуміти справжню поведінку взаємодії між рідиною та нерівностями поверхні. Отже, все ще існують деякі прогалини в знаннях щодо моніторингу трибологічної поведінки поршневого вузла за допомогою АС, як показано нижче: Механізм генерації та моделювання трибологічної АС між двома змащеними поверхнями ковзання в системі поршневого вузла все ще неоднозначні.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Поршневі кільця працюють у жорстких умовах зі значними змінами температури, тиску та швидкості. Трибологічна поведінка системи кільце-вкладиш є складною нелінійною механічною проблемою з точки зору міждисциплінарних галузей. Хоча технологія АС широко використовується для моніторингу тертя та зносу, більшість цих досліджень з використанням АС базувалися на експериментальних дослідженнях на лабораторному стенді для виявлення режимів генерації АС, а не на реальній та складній механічній системі, такій як двигун. Отже, для розшифровки механізму генерації АС під час процесу тертя та змащування системи кільце-вкладиш, необхідно ретельно вивчити теоретичні моделюючі дослідження для трибологічної АС в системі кільце-вкладиш.

Досліджено процес зношування та ситуації зношування з добавкою ZDDP та без неї. Результати показують різницю між маслом з добавкою та базовим маслом. Це вказує на те, що АС може виявляти наявність захисної трибоплівки ]. Зокрема вивчали моніторинг стану гібридних ковзних контактів, змащених маслом, за допомогою методів АС. Експериментальні результати показали сильний зв'язок між середньоквадратичним відхиленням АС та рівнем коефіцієнта тертя.

Однак, існують спорадичні дослідження, зосереджені на теоретичній моделі АС в трибологічних процесах. Шен та Лю розробили теоретичну модель процесу сприйняття АС в системі повзунів та магнітних жорстких дисків, щоб продемонструвати зміни амплітуд середньоквадратичного значення АС, що корелюють з трибологічними факторами та факторами динаміки системи, такими як контактна сила, швидкість ковзання та топографічні параметри, зокрема, протестовані значення середньоквадратичного значення АС, що корелюють з товщиною мастила. Тим не менш, аналіз теоретичного моделювання АС режимів генерації АС в умовах гідродинамічного змащування не був опублікований. Щоб заповнити цю прогалину, необхідно

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

розробити комплексне теоретичне моделювання АС для гібридного процесу тертя для аналітичних прогнозів, що корелюють з експериментальними дослідженнями.

У попередніх експериментальних дослідженнях було запропоновано та продемонстровано можливість виявлення сигналів АС на поверхні циліндра. Однак ефективний метод моніторингу різних станів змащення та тертя системи двигуна не проводився поглиблено, крім того, бракувало специфічних підходів до моніторингу стану для виявлення трибологічного впливу альтернативних палив на двигуни.

Було досліджено кілька підходів до обробки сигналів, заснованих на імпульсних сигналах АС з великими амплітудами відповідно до енергії сигналу або ентропії, для діагностики несправностей у клапанах та форсунках. Однак сигнали АС, індуковані трибологічними процесами, значно слабші, ніж реакції на збудження руху клапанів, процесу згоряння та інших ключових подій у двигунах. Вейвлет-методи ефективні для обробки нестационарних сигналів АС. Автор досліджував сигнали АС у випробуванні працюючого двигуна з використанням різних нових олив для оцінки характеристик тертя та змащування поршневого вузла на основі вейвлет-аналізу з вибраними вейвлет-параметрами.

Проблема полягає в тому, що відповідні параметри вейвлет-аналізу критично залежать від надійного та ефективного визначення характеристик сигналу. Отже, для точного вилучення трибологічних АС необхідний адаптивний метод вейвлет-обробки. Однак, не повідомляється про ефективні підходи до обробки сигналів для вилучення слабких сигналів АС з сильного фонового шуму. Тому відповідний критерій та ефективні схеми реалізації для вибору відповідних параметрів вейвлет-аналізу є дуже вирішальними в цьому дослідженні для отримання точних та ефективних слабких сигналів АС, пов'язаних з трибологічною поведінкою двигуна.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мастильна олива може відображати справний стан усієї системи та її ключових компонентів. Мастильна олива деградує, коли її захисні властивості змінюються фізично або хімічно. Однак більшість датчиків моніторингу оливи розроблені інтрузивно, що є дорогим та складним у процесі вимірювання.

АС-тестування, спеціальний тип ультразвукового методу, призначений для моніторингу внутрішніх хвиль, що генеруються внаслідок змін матеріалу. В'язкість зазвичай вважається одним з репрезентативних показників для оцінки якості мастильних матеріалів. Еламін та його колеги повідомили про можливість прогнозування якості моторної оливи за допомогою значень АС RMS завдяки значенням АС RMS, на які впливає в'язкість оливи. Ці дослідження продемонстрували можливість моніторингу стану змащення за допомогою АС.

Однак, слід зазначити, що необроблені значення середньоквадратичного значення АЕ (АЕ RMS) у працюючому двигуні містять забагато інформації, такої як удари клапанів та згоряння, що не може точно вказати на стан змащення. Крім того, стан змащення двигунів ускладнюється через зміну швидкості, навантаження, тиску та температури. Отже, все ще потрібне всебічне розуміння, щоб пов'язати сигнали вимірювання АЕ з різними режимами змащення та впливом деградації оливи на стан системи двигуна.

Через екологічну вразливість викопного палива, таку як глобальне потепління, смог та виснаження озонового шару, було проведено численні дослідження, зосереджені на викидах та робочих характеристиках двигунів, що працюють на альтернативному паливі. Однак трибологічний вплив альтернативного палива все ще нечіткий, частково через те, що існує занадто багато потенційних типів альтернативного палива, серед яких важко зробити найкращий вибір. Особливо трибологічні дослідження зазвичай приділяють увагу офлайн-дослідженням. Багато дослідників зосередилися на дослідженні хімічних та фізичних властивостей альтернативного палива та негативному

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

впливі, головним чином, на випробування на розбирання після тривалого використання. Однак досі бракує онлайн-методів для оцінки трибологічний вплив від використання широкого спектру альтернативних видів палива в процесі розробки, щоб можна було провести кількісну оцінку впливу разом із процесом оцінки горіння.

Для характеристики трибологічних процесів за допомогою вимірювань АС в умовах сильного фонового шуму в двигунах слід дослідити ефективні методи обробки сигналів, щоб розшифрувати характеристики складного вмісту АС у зв'язку з різними режимами змащування. З точки зору обробки сигналів, сигнали АС від двигунів внутрішнього згоряння є типовими нестационарними, статистичні властивості яких, включаючи амплітуди та значення частоти, змінюються з часом через різні джерела, такі як удари клапанів та поштовхи згоряння. Навпаки, існує також широкий спектр стаціонарних сигналів, спектральний склад яких не змінюється з часом. Виходячи з цього суворого визначення, майже всі сигнали моніторингу стану від обертових машин є нестационарними. У широкому сенсі сигнали для обертової системи можна класифікувати як циклостационарні сигнали та нестационарні сигнали, пов'язані з різними несправностями.

Часово-частотний аналіз є ефективним інструментом для характеристики особливостей нестационарних сигналів у спільній часо-частотній площині, що дозволяє виявити детальні закономірності та діагностичні ознаки для досягнення більш точної діагностики. Класичними методами часо-частотного аналізу є короткочасне перетворення Фур'є та розподіл Вігнера-Вілля.

На відміну від класичних часово-частотних представлень, вейвлет-перетворення (ВТ) використовує серію компактно підтримуваних хвиль, а не синусоїдальну хвилю, для розкладання сигналу на різні рівні, які відповідають різним частотним діапазнам. Було успішно продемонстровано, що вейвлет-аналіз особливо корисний для моніторингу стану двигуна ], оскільки він

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективніший та результативніший для аналізу нестационарних сигналів, що є типовою рисою сигналів АС від двигунів внутрішнього згоряння.

## 1.2. Аналіз способів контролю технічного стану та діагностування ЦПГ ДВЗ

Для вибору передового способу діагностування потрібно проаналізувати всі існуючі в даний час способи контролю технічного стану та діагностування ЦПГ ДВЗ.

### 1.2.1. Аналіз способів контролю технічного стану та діагностування ЦПГ

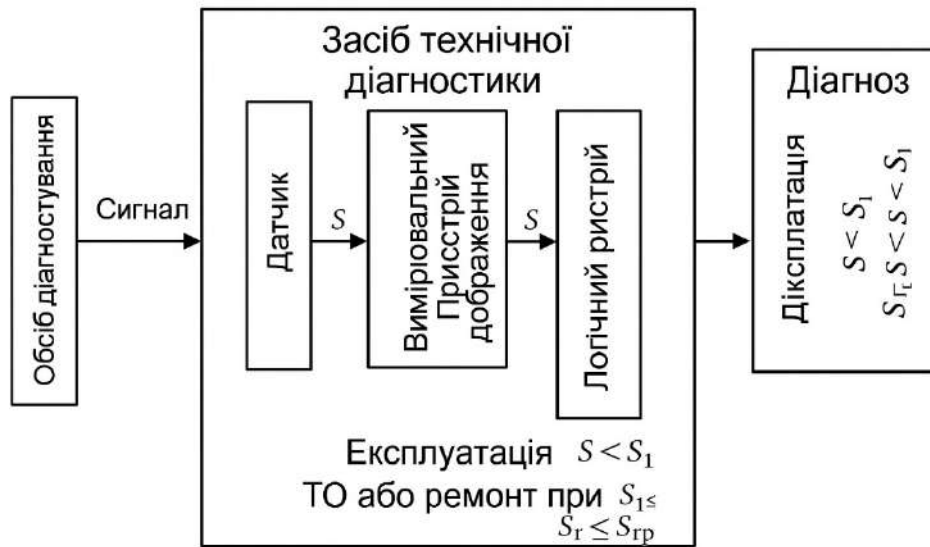
Інструментальні методи можуть бути поділені на підгрупи з використанням вбудованих приладів та з використанням зовнішніх приладів (рис.1.5).



Рисунок 1.5 - Методи діагностування двигунів

На рисунку 1.6 показано схему визначення діагностичного сигналу за допомогою датчиків вимірювання параметрів роботи ЦПГ.

Сигнал подається у прилад вимірювання, далі значення цього діагностичного параметра відображається на екрані монітору.



#### 1.6. Принципова схема вбудованих засобів діагностування

##### Огляд пошкоджень циліндропоршневої групи двигуна

Двигун внутрішнього згорання є найскладнішим і найдорожчим агрегатом транспортного засобу, на який припадає до 20% усіх його відмов, що виникають внаслідок різних механічних пошкоджень (знос, пластична деформація, старіння, втомні та корозійні пошкодження тощо) [1, 5]. Несвоєчасне виявлення та усунення цих пошкоджень призводить до збоїв у роботі двигуна, повної або часткової втрати його працездатного стану (виходу з ладу).

Визначення фактичних причин відмов двигунів вимагає не лише високої професійної кваліфікації дослідників-експертів, але й знання фізичної сутності та закономірностей їх виникнення. В силу характеру та причин виникнення всі відмови двигунів внутрішнього згорання під час експлуатації є наслідком порушень технологічних процесів виготовлення їх конструктивних елементів, або порушення встановлених правил та (або) умов

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

експлуатації (недотримання інтервалів технічного обслуговування, використання неякісних експлуатаційних матеріалів, низька кваліфікація виробничо-технічного персоналу тощо) .

Під час обстеження для визначення причини відмови, перш за все, необхідно вивчити ознаки початкового пошкодження деталей, внаслідок яких двигун втратив працездатність. Ретельний аналіз таких ознак дозволяє визначити, пошкодження якого конструктивного елемента було найімовірнішою причиною та першоджерелом відмови двигуна .

У цій статті представлені результати дослідження причин серйозних несправностей у роботі бензинового двигуна КІА. Двигун надійшов на експертизу через значне зниження потужності, збільшення витрати моторного масла та палива, шумну роботу, порушення динаміки автомобіля.

Після розбирання встановлено, що деталі кривошипно-шатунного механізму (вкладиші шатунно-шатунних валів, шийки колінчастого вала та інші деталі кривошипно-шатунного механізму) не мають ознак зносу чи інших пошкоджень. Експлуатаційних пошкоджень у головці блоку циліндрів двигуна не виявлено.

Під час проведених випробувань пошкодження були виявлені лише для деталей циліндропоршневої групи двигуна, найсерйознішими з яких є:

1. Абразивне зношування робочих поверхонь циліндрів протягом усього робочого ходу поршня з повною втратою хонінгової структури (рис. 1). Глибоких задирок не виявлено, що свідчить про відсутність молекулярно-механічного зносу контактуючих поверхонь (дзеркало циліндра – поршневі кільця).

2. Підвищений знос спідниць поршнів (від 0,07 до 0,09 мм) та компресійних кілець у всіх без винятку циліндрах двигуна, що добре корелює зі зносом їх робочих поверхонь.

3. Закоксування поршневих кілець, що видаляють масло, через лакові

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

відкладення на їх поверхнях.

4. Значні відкладення коксу та продуктів окислення моторного масла на поверхнях усіх чотирьох поршнів двигуна знаходяться переважно в зоні поршневих кілець (рис. 2).



Рисунок 1.7.Знос робочих поверхонь циліндрів двигуна



Рисунок 1.8.Стан поверхонь поршнів та кілець двигуна

Лакові відкладення – це продукти окислення тонких шарів мастила на поверхнях поршнів та поршневих кілець, нагрітих до високих температур. Лакові відкладення містять вуглець (до 80%), водень, кисень та тверді

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

негорючі сполуки. Найбільшої шкоди лакові відкладення завдають поршневим кільцям, спричиняючи їх закоксування, та поршням, спричиняючи їх перегрів через зниження теплопровідності.

Утворення відкладень зазвичай починається з появи на поверхнях поршнів лакових плівок, на яких осідають і затримуються продукти окислення вуглеводнів, що входять до складу масляної основи моторних олів (асфальтени, смоли, карбени, карбоїди), та різні механічні домішки. Під впливом високих температур утворені плівки обвуглюються, перетворюючись на кокс.

Відкладення суттєво впливають на довговічність двигуна через порушення робочого процесу та погіршення теплопровідності деталей, внаслідок чого підвищується загальна температура двигуна. Зокрема, утворення відкладень у камері згоряння призводить до неправильного займання робочої суміші (закоксування, детонація).

Процеси окислення та утворення відкладень посилюються при виникненні абразивного зношування циліндропоршневої групи двигуна, що призводить до падіння потужності, збільшення витрати палива та моторного масла. Таким чином, абразивне зношування вважається основною ознакою серйозних несправностей двигуна, що випробовується.

Абразивне зношування деталей циліндропоршневої групи є переважно наслідком потрапляння абразивних частинок разом з повітрям, моторним маслом, паливом (через недостатню фільтрацію) у циліндри двигуна. Тому на першому етапі було досліджено технічний стан впускного каналу, повітряних та масляних фільтрів двигуна. Під час перевірки видимих пошкоджень та розгерметизації повітряних патрубків, впускного колектора, повітряних та масляних фільтрів не виявлено. Це свідчить про малу ймовірність потрапляння зовнішніх забруднень повітря та оливи у двигун через недостатню фільтрацію.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Як показано в літературі, джерелом підвищеного зносу деталей циліндропоршневої групи може бути порушення умов змащування цих деталей. Кількість палива, що подається в циліндри, та повнота його згоряння мають значний вплив, наприклад, на змащування деталей циліндропоршневої групи. Надмірне надходження палива викликає, з одного боку, конденсацію цього палива на стінках циліндрів, а з іншого боку, порушення згоряння, що призводить до потрапляння незгорілої частини палива у вихлопну систему. В результаті паливо змиває масло зі стінок циліндрів, що спричиняє підвищений знос сполучних деталей, а також згоряння незгорілого палива в каталізаторі, що призводить до перегріву та руйнування каталізатора.

Оскільки випробуваний двигун оснащений керамічним каталітичним нейтралізатором відпрацьованих газів, існує ймовірність потрапляння частинок його можливого руйнування в циліндри двигуна. На це вказують симптоми, з якими двигун надійшов на експертизу (порушення динаміки автомобіля, зниження потужності, збільшення витрати палива тощо). Для перевірки цієї гіпотези було вирішено, що необхідно вирізати фрагмент каталітичного нейтралізатора (катролектора) у передній (вхідній) частині його корпусу (рис. 1.9).

У відкритій порожнині було виявлено продукти руйнування керамічних елементів каталітичного нейтралізатора у вигляді сірого порошку (рис. 4). Керамічні комірочки є досить крихким матеріалом, і при механічному впливі комірочки відходять від стінок каталізатора, починають рухатися всередині корпусу та руйнуються, поширюючись по всій вихлопній системі. На тестовому двигуні було зруйновано приблизно 50% керамічної вставки, в результаті чого частина комірок каталізатора була засмічена продуктами руйнування.

Каталітичний нейтралізатор міг вийти з ладу не тільки в результаті механічної дії (удару), але й з інших причин: через перегрів, потрапляння в

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нього моторного масла разом з вихлопними газами, перепад температур під час занурення працюючого каталізатора у водне середовище, вихід з ладу кисневого датчика тощо.

За нормальних умов роботи двигуна температура нейтралізатора не повинна перевищувати 900-950 °С. При підвищенні температури до 900-1000 °С відбувається механічне руйнування його активного каталітичного шару та стільникових каналів для проходження відпрацьованих газів. Можливість термічного пошкодження нейтралізатора особливо зростає, коли запалювання в одному з циліндрів припиняється, наприклад, при виході з ладу свічки запалювання. У цьому випадку незгоріла в двигуні паливно-повітряна суміш починає згоряти в нейтралізаторі, інтенсивно його нагріваючи. Це призводить до руйнування та плавлення керамічних комірок, що, у свою чергу, погіршує прохідність відпрацьованих газів.



Рисунок 1.9.Каталітичний нейтралізатор з вирізаним фрагментом корпусу

Рисунок 1.10.Вигляд внутрішньої частини "кіт-колектор"

З метою встановлення ідентичності матеріалу відкладень на поршнях двигуна та продуктів руйнування елементів каталізатора було досліджено їх дифракційний склад на порошковому дифрактометрі AXS (Німеччина).

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Результати дослідження представлені на рис. 5 у вигляді об'єднаної дифрактограми.

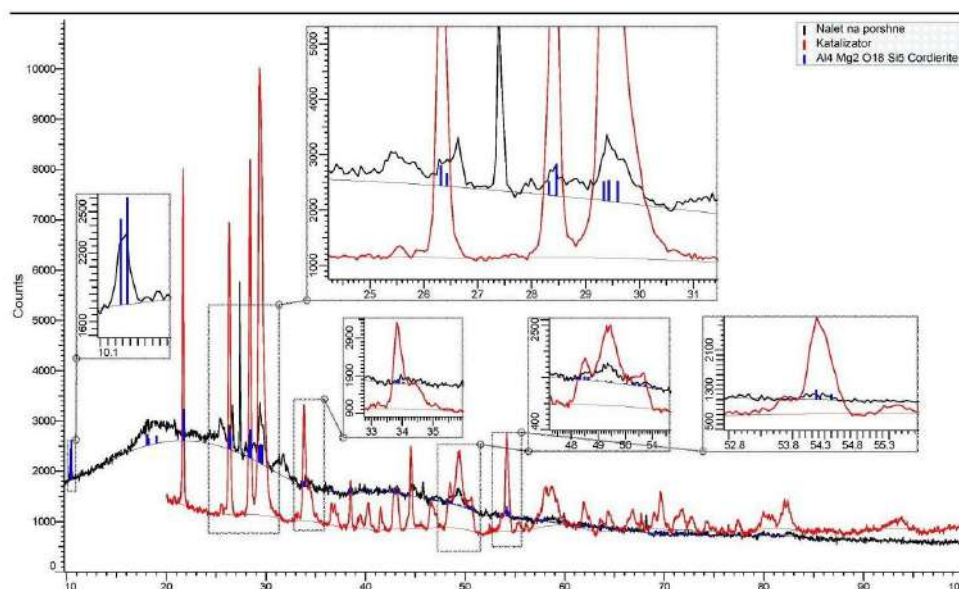


Рисунок 1.11. Дифрактограма матеріалу відкладення з поверхні поршня (чорний графік) та продуктів руйнування каталізатора (червоний графік)

З дифрактограми видно, що продукти руйнування каталізатора являють собою суміш кордієриту ( $\text{Al}_6\text{Mg}_3\text{Si}_2$ ) з додаванням цирконію (Zr) (активної речовини каталізатора).

Матеріал відкладень на поршні складається з некристалічної (аморфної) речовини (спеченої моторної оливи) та включення дрібних частинок кордієриту. Сині вертикальні лінії на дифрактограмі відповідають пікам графіків, як каталітичного матеріалу, так і відкладень на поверхні поршня.

Таким чином, можна стверджувати, що разом з відпрацьованими газами в циліндри двигуна потрапляє порошкоподібна речовина (керамічний пил) зруйнованого каталізатора. Потраплення керамічного пилу зруйнованого каталізатора в камери згоряння пояснюється особливостями газорозподілу сучасних двигунів. Каталізатор, що являє собою систему комірок, що

пропускають відпрацьовані гази, створює додатковий опір їх виходу. В процесі роботи періодично виникають моменти одночасного відкриття випускних клапанів двох циліндрів з різним тиском газу, відповідно, частина відпрацьованих газів може бути викидана через колектор у циліндр з нижчим тиском. Невелика кількість відпрацьованих газів, що потрапили в циліндри двигуна, суттєво не впливає на його роботу. Однак, якщо разом з відпрацьованими газами в циліндри потрапляють продукти поломки картриджа нейтралізатора, що представляють собою абразивну речовину, вони викликають інтенсивний знос пар тертя циліндропоршневої групи, що мало місце в двигуні, представленому на дослідження.

У цьому випадку каталізатор вбудований у вихідний колектор якомога ближче до двигуна (каталізатор-колектор). Таке конструктивне рішення сприяє швидшому нагріванню каталітичних елементів після запуску двигуна та максимально ефективному очищенню відпрацьованих газів від шкідливих речовин (чадного газу – CO, оксидів азоту – NO<sub>x</sub> тощо). На виході справного каталізатора відпрацьовані гази мають відносно екологічно чисту концентрацію вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), води та азоту (N<sub>2</sub>) з домішками. Однак, при такому розташуванні каталізатора, він більш схильний до виходу з ладу через систематичний перегрів.

Таким чином отримали.

1. Результати дослідження показали, що двигун втратив свою продуктивність через руйнування керамічної вставки каталізатора, продукти якого у вигляді подрібненої порошкоподібної речовини потрапляють у циліндри разом з вихлопними газами. Це спричинило абразивне зношування дзеркала циліндрів, поршнів та компресійних кілець двигуна.

2. Через інтенсивне зношування деталей циліндропоршневої групи та збільшення зазору «дзеркало циліндра - поршневі кільця» в камеру згоряння двигуна потрапляє моторне масло та «керамічний пил». За високих

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

температур така суміш викликає утворення нагару на поршнях та закоксування маслосніжних кілець.

3. Руйнування керамічної вставки каталізатора не вплинуло на пошкодження деталей кривошипно-шатунного механізму, навіть при 50% відмові каталізатора не було жодних ознак зносу чи іншого погіршення стану кривошипно-шатунного механізму.

Розглянемо прилади діагностування для інструментального методу:

Першим дослідженим пристроєм був газовий витратомір (рис. 1.12). Перед початком вимірювань необхідно герметизувати картер: для цього закривають отвори вентиляції та місце встановлення маслосніжкового щупа, який попередньо виймають. Далі двигун запускають і прогрівають до робочої температури, після чого у горловину для заливання мастила акуратно вводять наконечник гнучкого шланга. Обертаючи кришку приладу, спостерігають за зміною рівня рідини в манометрі й регулюють дроселюючу щілину доти, поки перепад тиску не становитиме 12 мм. У цей момент фіксують положення поділки на шкалі кришки відносно мітки на нерухомому корпусі. За каліброваним графіком, нанесеним на рукоятку витратоміра, визначають об'єм газів, що проникають у картер за певний проміжок часу. Практика показала, що застосування цього приладу є досить складним і потребує суворого дотримання послідовності операцій. Навіть незначне відхилення від методики призводить до похибок у показаннях. Для підвищення точності вимірювань рекомендовано проводити діагностування двигуна, встановленого на стенді з біговими барабанами.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32



Рисунок 1.12 витратомір

Газовий лічильник та рідинний реометр за своїм принципом дії мають подібні недоліки до газового витратоміра, за винятком дещо вищої точності показань. Водночас їх конструктивне виконання є складнішим, що ускладнює процес обслуговування, потребує додаткового калібрування і підвищує вимоги до умов експлуатації. Незважаючи на вдосконалення вимірювального вузла, ці прилади залишаються чутливими до герметичності системи, температури навколишнього середовища та стабільності тиску в картері, що знижує достовірність результатів у польових умовах.

До числа поширених засобів діагностування двигуна належать також компресометри (рис. 1.13). За своєю будовою цей прилад є манометром зі зворотним клапаном, який запобігає втраті тиску під час обертання колінчастого вала. Під час прокручування двигуна стрілка манометра фіксує тиск, що створюється поршнем у циліндрі. Оскільки вхідний отвір компресометра має малий діаметр, за один такт стиснення повітря не встигає повністю заповнити вимірювальну камеру, тому колінчастий вал обертають кілька разів до стабілізації показань приладу.

Вимірювання тиску в кінці такту стиснення дозволяє оцінити технічний стан циліндро-поршневої групи двигуна. Однак при значному зносі деталей

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компресія може залишатися майже незмінною через інтенсивну подачу мастила, яке частково герметизує зазори між поршнем і циліндром. Тому отримані значення не завжди відображають реальний рівень зношування. На величину компресії більший вплив має негерметичність клапанів газорозподільного механізму, ніж стан циліндро-поршневої пари.

Крім того, показники компресометра залежать від швидкості обертання колінчастого вала: при запуску від стартера досягти стабільних обертів практично неможливо, що призводить до додаткових похибок. Метод компресійного діагностування потребує часткового розбирання двигуна, зокрема зняття свічок запалювання або форсунок, що збільшує трудомісткість процесу. Для багатоциліндрових (8- чи 12-циліндрових) двигунів використання компресометра стає особливо складним і малоефективним.

Додатковим фактором спотворення результатів можуть бути інші несправності двигуна — наприклад, знос кулачків розподільного вала, його неправильне встановлення або нагар у камері згоряння. У таких випадках прилад може показувати підвищені чи занижені значення тиску, що унеможливорює точне визначення технічного стану двигуна лише за показаннями компресометра.



					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

## Рисунок 1.13 Прилад для компресії

Розглянемо роботу приладу К-69Т (рис. 1.2.5)



Рисунок 1.14 - Прилад К-69Т

Дія приладу К-69 ґрунтується на подачі в циліндр двигуна стисненого повітря з балона або магістралі. Тиск у системі регулюється за допомогою газового редуктора та контролюється манометром, що забезпечує стабільність подачі. Після цього повітря через спеціальне сопло спрямовується у циліндр, де потік розподіляється на дві частини: одна проходить до каліброваного отвору, а інша — після нього. У зоні до каліброваного отвору тиск підтримується постійним, тоді як за отвором його величина змінюється залежно від ступеня герметичності надпоршневого простору.

Якщо ущільнення циліндро-поршневої групи є якісним, тиск після отвору буде високим; у разі підвищених витоків через зношені кільця або клапани — тиск знижується. Для оцінювання фактичного технічного стану ЦПГ та

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

клапанного механізму використовують шкалу з кольоровими зонами або таблиці, де зазначено допустимі рівні витоку повітря у відсотковому вираженні. Таким чином, прилад дозволяє швидко визначити наявність негерметичності в камері згоряння без повного розбирання двигуна.

Попри зручність у використанні, прилад К-69 має низку суттєвих обмежень. Найбільш значущим недоліком є потреба точно встановити поршень у певне положення — зазвичай на початок такту стиснення або у верхню мертву точку (ВМТ). У сучасних автомобілях це зробити складно, оскільки більшість двигунів не мають видимих міток для точного позиціонування колінчастого вала. Додаткову складність створюють транспортні засоби, оснащені автоматичними коробками передач, де неможливо легко зафіксувати поршень у необхідному положенні без спеціальних пристосувань.

Крім того, прилад не дозволяє оцінити зношування так званого «лабіринтного» ущільнення, яке утворюється системою поршневих кілець і зазорів у поршні. Це обмежує діагностичні можливості пристрою, особливо при визначенні незначних витоків або нерівномірного зносу елементів ЦПГ. Таким чином, хоча прилад К-69 і забезпечує швидку оцінку герметичності циліндрів, його застосування потребує високої кваліфікації персоналу та додаткових пристроїв для точної фіксації положення поршня.

Наступний прилад пневмотестер К-275 (рис. 1.15).

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36



Рисунок 1.15 - Пневмотестер К-275

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. ОБГРУНТУВАННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В ЦПГ ДВЗ

### 2.1. Теоретичне обґрунтування існуючих методів діагностування ЦПГ

Аналіз відмов двигунів внутрішнього згорання показує, що несправність системи запалювання та електрообладнання трапляється у 21–45% випадків. У системі живлення несправність виникає у 19–32% випадків. Далі йдуть несправності в механізмах двигуна 10–38%. Актуальність діагностики цих систем не викликає сумнівів. На частку відмов у циліндро-поршневій групі (ЦПГ) припадає 10–15% відмов двигунів. Відомо, що за допомогою пускових властивостей двигуна можна виявити граничний стан ЦПГ. Тому розглянемо спосіб підвищення ефективності діагностики ЦПГ шляхом керування параметрами динамічного стиснення шляхом прокручування колінчастого вала двигуна.

Для вибору перспективного методу діагностики двигуна ЦПГ необхідно проаналізувати та порівняти відомі на сьогодні методи діагностики та контролю технічного стану.

Відомий спосіб використання газового витратоміра Державного науково-дослідного технологічного інституту ремонту. Його використання виявилось надто трудомістким і вимагає суворого дотримання технологічного процесу, оскільки прилад зчитує найменші невідповідності та призводить до бракування показників. Газовий лічильник та реометр не позбавлені тих самих недоліків, що й газовий лічильник.

Використання блоку вимірювання компресії в циліндрах. Через малий

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

вхідний отвір в адаптері повітря не встигає пройти через прилад, що вимірює тиск, за один хід поршня, тому двигуну доводиться прокручувати колінчастий вал двигуна до стабілізації показань манометра. Показники компресії ненадійні, оскільки тиск в кінці стиснення залежить від частоти обертання колінчастого вала, а при використанні стартера неможливо досягти сталості цієї частоти. Також знос розподільного вала або його неправильне розташування, нагар у камері згоряння призведе до помилкових показань значення тиску.

Використання стетоскопа – достовірність оцінки залежить від кваліфікації діагноста. Використання стетоскопів, фонендоскопа та шумомірів розширює можливості контролю технічного стану, але не дозволяє зробити об'єктивну оцінку, оскільки ці прилади лише підсилюють шум та брязкіт, не виключаючи впливу суб'єктивного фактора.

Відомий спосіб продувки циліндрів стисненим повітрям за допомогою приладу К-69Т. Його основним недоліком є те, що потрібно встановити поршень на початку стиснення у верхню мертву точку тощо. Зробити це на сучасних автомобілях дуже складно. На сучасних двигунах зникли маркери для діагностики. Автомобілі іноді оснащені автоматичною коробкою передач, що ускладнює роботу. Прилад не показує знос лабіринтних ущільнень у з'єднанні поршневого кільця.

Також поширений метод відносної оцінки ЦПГ, заснований на послідовному відключенні циліндрів, одного за одним, також на основі контролю зниження швидкості. Цей метод дозволяє оцінити лише відносно, але не абсолютно. Цей метод марний, якщо всі циліндри зношені однаково.

Метод діагностики, заснований на вимірюванні потужності. До його недоліків можна віднести те, що цей метод не дуже чутливий до зносу

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

групи циліндрів, оскільки дуже зношений двигун втрачає лише 6% потужності. Цей метод враховує знос усіх циліндрів одночасно, і не дозволяє ідентифікувати окремі зношені циліндри. Стенд з штовхаючими барабанами має аналогічні недоліки.

Метод діагностики двигуна автомобіля за допомогою показань струму живлення стартера. Метод має низьку точність через вплив великої кількості факторів: технічного стану стартера та акумуляторної батареї.

Метод визначення стану окремих циліндрів за величиною вакууму. Дуже трудомісткий у застосуванні. Отримані показники неможливо розділити, неможливо визначити знос елементів ЦПГ.

Відомий ще один метод, який базується на вимірюванні кількості повітря, що проходить через нещільність камери згоряння на холостому ходу, за допомогою осцилографа USB-Autoscope. До його недоліків можна віднести використання невідповідного режиму діагностики (достовірності та точності). За стандартними методами необхідно знімати показники на холостому ходу, але в цьому режимі проявляються не всі несправності. Точність цього методу значною мірою залежить від правильності математичної моделі, яка використовується для розрахунку витоків. Ще одним недоліком є те, що не враховуються витки повітря, що проходить через газорозподільний механізм. Ці недоліки призводять до низької надійності методу.

У нашій роботі для діагностики елементів ЦПГ використовувався інструментальний комплекс – осцилограф USB-Autoscope. Чутливість і точність методу можна підвищити завдяки використанню прокручування колінчастого вала двигуна внутрішнього згоряння за допомогою стартера.

#### Математичне моделювання процесу

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Метою математичного моделювання є вивчення впливу різних факторів на процес стиснення робочої суміші в надпоршневому просторі під час прокручування двигуна стартером.

Ми проаналізували процес вимірювання тиску залежно від кута повороту поршня колінчастого вала в бензиновому двигуні. Припустили, що процес стиснення в циліндрі відбувається адіабатично (без взаємодії з навколишнім середовищем). Система, яка не обмінюється з навколишнім середовищем речовиною та енергією, називається ізольованою (циліндр з поршнем). Якщо система не здійснює обмін речовиною та енергією з навколишнім середовищем, то вона знаходиться в стані термодинамічної рівноваги і без зовнішніх впливів не може вийти з цього стану.

Ми вивчали умови рівноважних процесів, коли система в будь-який момент часу перебуває в рівновазі. Реальні процеси повинні відбуватися в цих умовах нескінченно повільно. У цьому випадку всі параметри системи – тиск, температура тощо – в будь-який момент часу повинні бути однаковими по всьому об'єму системи. У нерівноважному процесі різні частини системи мають різні температури, тиски тощо. Адіабатичний процес підпорядковуватиметься рівнянню ідеального газу Менделєєва-Клапейрона.

$$PV = \mu RT$$

Де  $P$  – тиск (Па);  $V$  – об'єм (мм<sup>3</sup>);  $\mu$  – молярна маса речовини;  $R$  – газова стала (Дж/кг);  $T$  – температура (К).

Розрахунки проводилися для циліндра двигуна ЗМЗ-4062. Застосовано формулу Менделєєва-Клапейрона, прийняте значення початкового тиску в один бар. Конструкція двигуна така, що циліндр повідомляється з

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

атмосферою при обертанні колінчастого вала від нижньої мертвої точки до кута  $46^\circ$  повороту колінчастого вала. У цьому випадку зміна об'єму циліндра не впливає на зміну тиску. Визначено кількість тепла, яке повітря стискає в циліндрі, віддаючи стінкам циліндра та камері згоряння під час обертання вала двигуна на два градуси. Коефіцієнт теплопередачі повітря є функцією тиску та температури в циліндрі.

Щоб визначити об'єм повітря, що просочилося через зазори ЦПГ, потрібно знайти характер потоку повітря. Потрібно визначити швидкість потоку повітря: докритична чи критична. Для цього необхідно знайти показник степеня  $\beta$

$$\beta = \frac{P_0}{P_3}$$

:

Де  $P_0$  – атмосферний тиск, (Па);  $P_3$  – тиск у циліндрі, (Па).

Для двоатомного газу  $\beta_{cr}=0,528$ . Якщо  $\beta > \beta_{cr}$ , видих відбувається з субкритичної швидкості та розраховується за формулою:

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_3 \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Де  $k$  – показник адіабати, для повітря  $k=1,4$ .

Якщо  $\beta < \beta_{cr}$ , то видих повітря відбувається з критичною швидкістю та розраховується за формулою:

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

$$\omega_{\sigma} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_3}$$

Об'єм повітря, що просочився через зазори ЦПГ при повороті колінчастого вала на величину  $2^{\circ}$  визначимо за формулою:

$$\Delta V = \frac{2}{6n} F \omega \cdot 10^3$$

Де  $F$  – розмір зазору в СРГ внаслідок зносу (мм<sup>2</sup>).

Припустимо, що витік відбувається внаслідок адіабатичного розширення повітря в циліндрі за рахунок  $\dot{V}$ . Таким чином, розроблено математичну модель, яка з урахуванням частоти проколів повітря в зазорах та інших факторів дозволяє моделювати зміну тиску в камері згоряння та порівнювати розраховані значення з експериментальними даними.

Для підтвердження адекватності отриманої моделі було проведено пілотне дослідження. Залежність тиску в кінці ходу стиснення від швидкості обертання колінчастого вала двигуна при зносі поршневих кілець показано на графіку рис. 2.1 (а). Як видно з графіка, зі збільшенням величини зносу натискних кілець в кінці ходу стиснення зменшується. Збільшення зносу викликає сильну зміну тиску в кінці ходу стиснення. Наприклад, якщо встановлені зазори 1,5 мм (лінія P1,5), швидкість обертання 100 об/хв, тиск дорівнює 6 бар. Якщо швидкість 300 об/хв, тиск становить 12 бар. Якщо зазори 0,1 мм (лінія P0) і швидкість від 100 до 300 об/хв, тиск встановлюється на рівні 16–17 бар.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

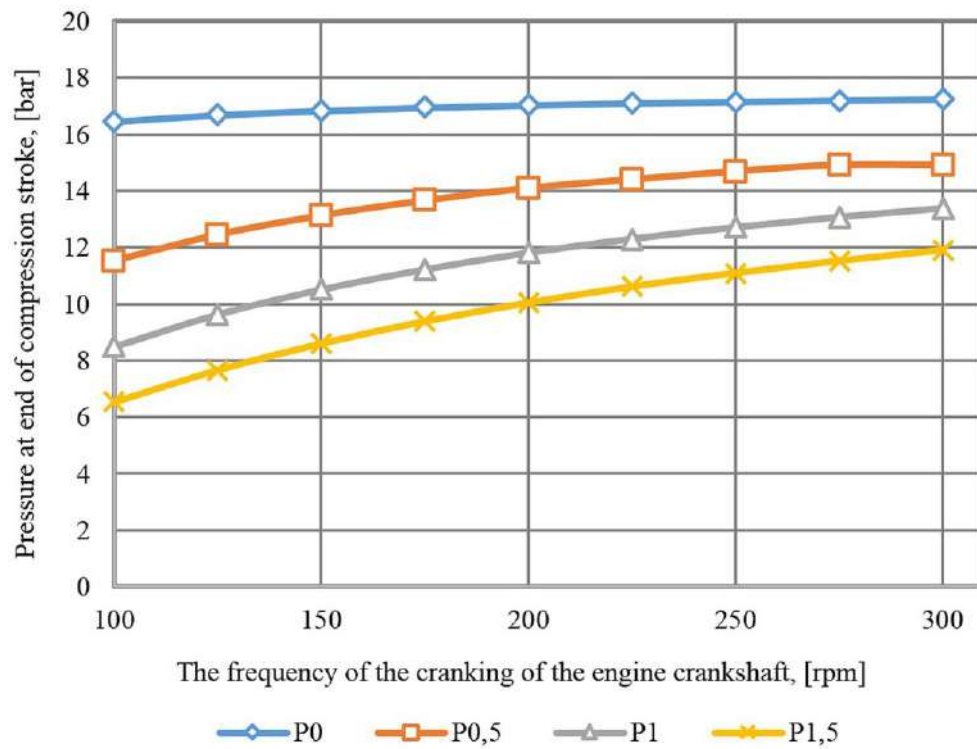


Рис. 2.1. Залежність зміни тиску [бар] в кінці такту стиснення для різних значень частоти [об/хв] обертання колінчастого вала двигуна, при зносі поршневих кілець

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

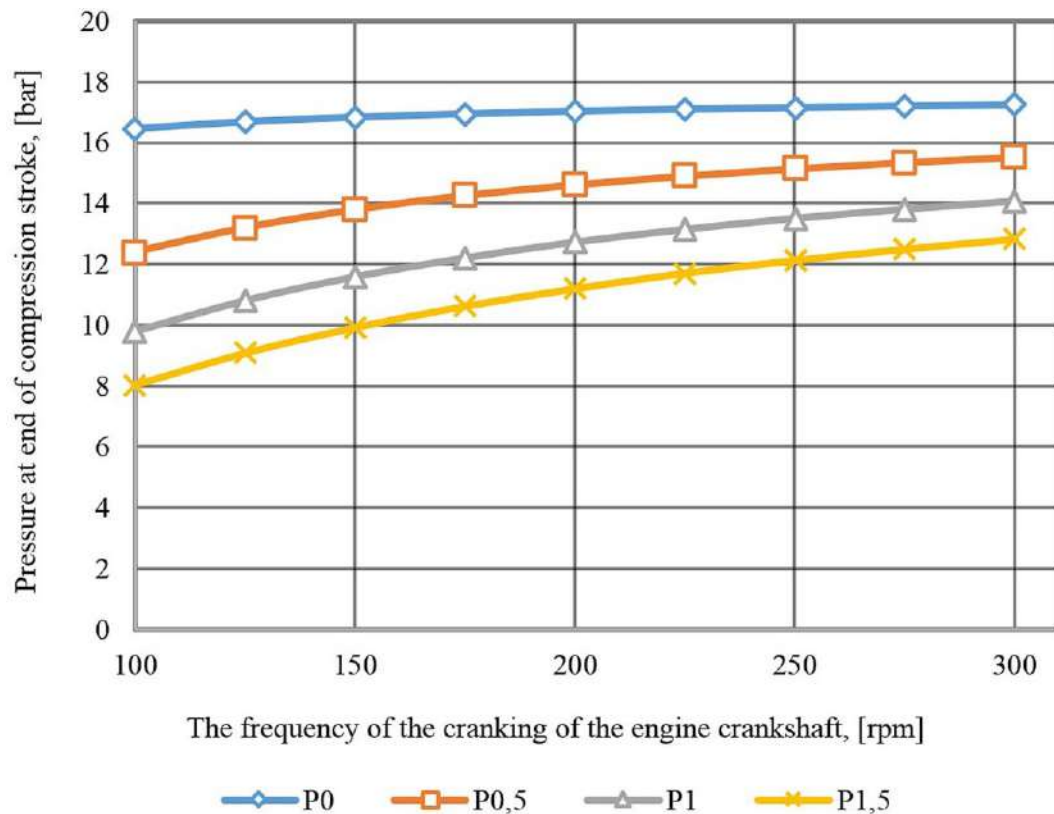


Рис. 2.2 Залежність зміни тиску [бар] в кінці такту стиснення для різних значень частоти [об/хв] обертання колінчастого вала двигуна у разі зносу циліндрів двигуна; лінії P0, P0,6, P1, P1,5 – значення еквівалентних перерізів натягів повітря відповідно, [мм]: 0,1; 0,6; 1,0; 1,6

Був проведений експеримент з різним технічним станом циліндрів. Була отримана залежність, представлена на рисунку 2.2 Характер зміни тиску в кінці ходу стиснення при збільшенні швидкості аналогічний показаному на рисунку 1. Однак, коли відбувається знос поршневих кілець, відбувається сильний фазовий зсув тиску. Чим більше кілець зношено, тим більший фазовий зсув.

Оцінка технічного стану ЦПГ за запропонованою методикою за різних умов діагностики показала, що зі збільшенням величини зносу кілець також

зменшується тиск в кінці ходу стиснення. Більше того, у разі великого зносу деталей значно змінюється тиск в кінці ходу стиснення. Розроблений метод дозволяє поєднати всі позитивні сторони існуючого та запропонованого методів та вирішити проблему підвищення достовірності оцінки технічного стану агрегатів та механізмів двигунів внутрішнього згорання. Експеримент з різним технічним станом циліндрів та різними зносними кільцями показав подібну закономірність зміни тиску в кінці ходу стиснення. Виявлено суттєве зміщення фаз тиску, що вимагає коригування фази для покращення пускових властивостей двигунів внутрішнього згорання

## 2.2. Віброакустичний метод діагностування

Якщо поршневе кільце нерухомо закріплене в точці, протилежній зазору, то кільце можна приблизно розглядати як камертон. Класичний камертон типу «U» був винайдений у 1716 році придворним музикантом англійської королеви Джоном Шор.

Поршневі кільця є одним з найважливіших елементів центрального поршневого механізму двигуна. Вони виконують три важливі функції: а) забезпечують надійне ущільнення камери згорання;

б) інтенсивно відводити тепло від поршня до стінок циліндра; в) регулювати ширину масляної плівки на внутрішній частині дзеркала циліндра. Поршневі кільця працюють у гарячому середовищі агресивних газів зі значно змінними навантаженнями та перепадами температур. З досвіду Ризького суднобудівного заводу відомо, що більшість пошкоджень поршневих кілець припадає на область зазору. При діаметрі кільця 500-800 мм перегини відбуваються переважно на відстані 50-150 мм від зазору. Це зона підвищеної вібрації кільця. У канавках поршня кільце зазнає постійних згинально-крутильних коливань.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відкрите поршневе кільце – це коливальна система з розподіленими параметрами. З першим ступенем наближення площу поперечного перерізу поршневого кільця можна вважати дуже малою порівняно з радіусом  $R$  кола кільця. Експериментальний стенд графічно показано на рис. 1.

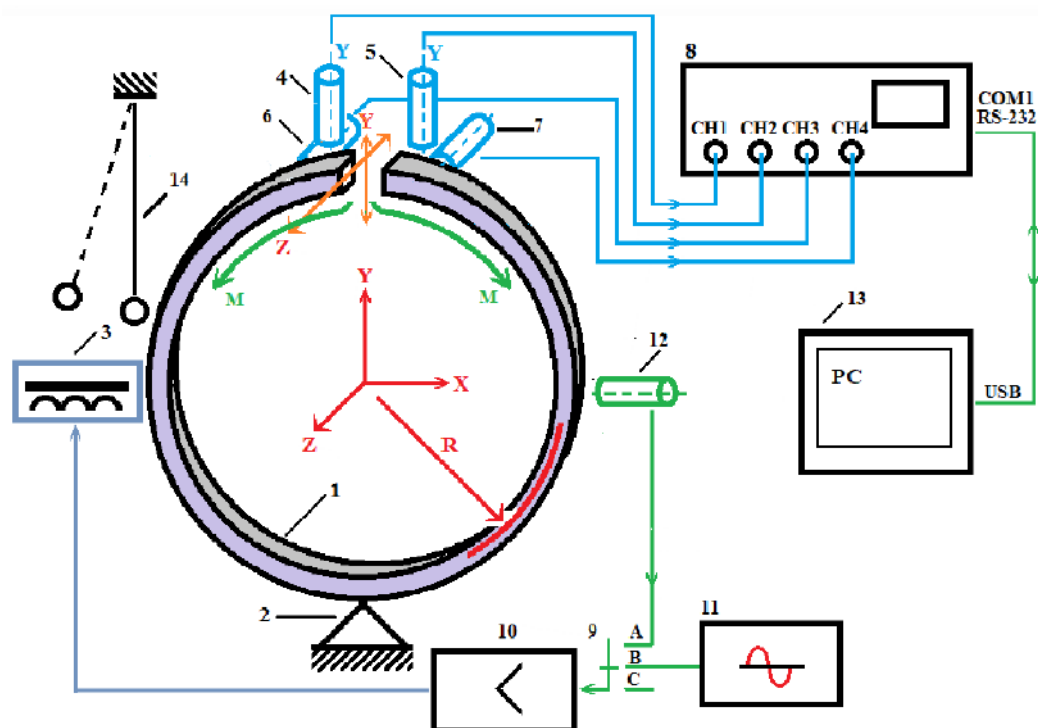


Рис. 2.3. Експериментальний стенд: 1 – поршневе кільце; 2 – основа; 3 – обурений електромагніт петлі зворотного зв'язку; 4 та 5 – лівий (L) та правий (R) магнітоелектричні датчики переміщень країв кільця в напрямку радіуса  $R$ , вздовж осі  $Y$ ; 6 та 7 лівий (L) та правий (R) магнітоелектричні датчики переміщень країв кільця у власній площині, вздовж осі  $Z$ ; 8 – багатоканальний осцилограф – аналізатор спектру; 9 – перемикач режимів вимірювання; 10 – підсилювач; 11 – генератор звуку; 12 – магнітоелектричний датчик петлі зворотного зв'язку; 13 – комп'ютер; 14 – кулька.  $M$  – згинальний момент;  $R$  – радіус осьової лінії кільця

Для проведення експериментів розроблено новий

експериментальний стенд; він має покращену міцність конструкції, збільшену його масу, зменшену власну резонансну частоту, а кількість магнітоелектричних датчиків збільшено з 2 до 4. Він дозволяє досліджувати поршневі кільця різного діаметра.

Коливання вільного відкритого кільця відбуваються вздовж усіх трьох осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Крім того, кільце відчуває згинальні моменти  $M$ .

Поршневе кільце може мати канавки різної форми на своїй зовнішній поверхні. На рис. 2.3 показано фрагмент зовнішньої поверхні нижнього маслоснімного кільця. Така форма значно ускладнює теоретичний розрахунок частот коливань. У цьому експериментальному стенді частоти та амплітуди коливань обох гілок кільця визначалися вздовж осей  $Y$  та  $Z$ . Згинальні моменти  $M$  у цій роботі не вимірювалися. Їх можна розрахувати за параметрами коливань країв кільця вздовж осей  $Y$  та  $Z$ . Якщо дефекти знаходяться в структурі металу кільця (локальні зони перегріву, неоднорідні механічні напруження, мікротріщини тощо), частотні характеристики обох гілок кільця суттєво відрізняються одна від одної.

У цій статті окремо розглядається режим автоколивань кілець (на частоті власного механічного резонансу) та вимушені коливання кільця на частотах його гармонік. Вільні затухаючі коливання, а також відповідний математичний апарат для визначення параметрів коливального процесу, були розглянуті в попередніх статтях авторів.

Кільце може коливатися у своїй площині (вісь  $X_1$  вздовж радіуса  $R$ ) та перпендикулярно – вздовж осі  $X_3$ . З першим ступенем наближення поршневе кільце можна вважати кільцевою балкою прямокутного перерізу. Реальне поршневе кільце має складнішу форму.

Близько 1-2% нових кілець отримують дефекти протягом перших

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

двох-трьох тижнів після встановлення в умовах їх безперервної експлуатації. Запропонований метод спектрального аналізу дає точну оцінку поточного технічного стану поршневих кілець. Характеристики можна порівняти за допомогою математичного моделювання або за характеристиками деяких еталонних кілець. Останнє є більш кращим. Застосоване вимірювальне обладнання повинно мати високу чутливість (від кількох одиниць мікровольт), високу лінійність власних характеристик та низький коефіцієнт нелінійних спотворень. Збільшення амплітуди існуючих гармонік або поява нових сигналізує про наявність або розвиток нечітких дефектів. Через складну форму коливань, отриманих експериментально, застосування цифрових вимірювачів частоти є складним<sup>8</sup>.

Різниця між частотами, отриманими експериментально та при моделюванні, становить близько 15 %. При моделюванні припускалося, що кільце має однорідну структуру та поперечний переріз по всій довжині кільця.

Запропонований метод спектрального аналізу дає точну оцінку поточного технічного стану поршневих кілець. Зібравши достатньо велику кількість статистичного матеріалу, можна визначити не тільки наявність дефектів, але й їх характеристики та розташування з достатньо високою точністю. Цей підхід можна застосовувати разом з іншими неруйнівними методами контролю.

Вищі гармоніки парного порядку є найбільш інформативними в цьому методі (починаючи з шостої і вище).

Відносно низьке значення непарних гармонік можна пояснити тим, що гілки кільця мають фазові зустрічні та розбіжні протифазні коливання. Збільшення амплітуди та кількості вищих гармонік сигналізує про виникнення дефектів у гілках кільця.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

### 2.3.Трибодіагностика

Триботехнічна діагностика використовує мастильні матеріали як носії, що допомагають отримати інформацію про процеси та зміни в системах, які вони змащують. Якщо трибодіагностика застосовується правильно та ретельно, вона призводить до значної економії в багатьох сферах; наприклад, вона сприяє збільшенню терміну служби транспортних засобів, а також інших машин і пристроїв, зменшенню споживання енергії, обмеженню часу простою через несправності та подальший ремонт, зменшенню інвестиційних та експлуатаційних витрат (особливо витрат на технічне обслуговування та ремонт машин), підвищенню безпеки експлуатації та зменшенню негативного впливу транспорту на навколишнє середовище. Вона базується на моніторингу прогресуючого зносу мастильних матеріалів, а також механічних деталей.

Нозглядаються можливості використання сучасних інструментальних методів, зокрема: інфрачервоної спектрометрії з перетворенням Фур'є, аналітичної ферографії з послідовним аналізом зображень, скануючої електронної мікроскопії, локального електронного мікроаналізу та вольтаметрії в галузі аналізу мастильних матеріалів транспортних засобів.

У першій частині представлено результати дослідження процесу зношування моторних, трансмісійних та гідравлічних олів, а також пластичних мастил, що використовуються для змащування деталей транспортних засобів.

У другій частині розглядаються частинки стирання, виділені з масляних фільтрів у різних типах транспортних засобів. Оцінка їхньої кількості, розміру, форми, кольору, характеристик поверхні та інших морфологічних ознак допомагає отримати інформацію про деталі, з яких вони походять, та про механізм їхнього утворення. Ці знання можуть згодом сприяти (особливо у зв'язку зі знанням хімічної структури частинок) усуненню небезпеки пошкодження або поломки машини.

Поєднання вищезазначених методів допомагає контролювати

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оцінювання з перебіг процесів, пов'язаних зі зношуванням частинок транспортних засобів, а також стаціонарних механізмів, та отримати їх комплексну оцінку.

Трибодіагностика базується на регулярному зборі зразків мастильних масел з механізмів, що контролюються, а також на аналізі та випробуваннях цих зразків. Метою такої діагностики є з'ясування стану як мастильного масла, так і змащованого механізму. Аналіз масла зосереджений на визначенні змін його фізичних та хімічних властивостей, що відбулися під час експлуатації (ці зміни в основному зумовлені процесами термоокислення та зменшенням кількості присадок), а також на ідентифікації та/або визначенні забруднюючих речовин (води, гліколів, палива, механічних домішок, що потрапляють у зону згоряння разом з повітрям, нітросполук, що утворюються внаслідок контакту масла з газами згоряння тощо). Масло також містить частинки, що утворюються внаслідок зносу змащуваних компонентів; їх аналіз може надати інформацію про процеси, що відбуваються в системі.

Моніторинг хімічних та фізичних змін, що відбуваються в оливі, дозволяє нам сформулювати відносно точне уявлення про поточний стан мастила та можливість його подальшого використання. Відправною точкою для оцінки динаміки змін окремих параметрів є значення цих параметрів у невикористаній оливі. Численні методи, що використовуються для цієї мети, включають інфрачервону спектрометрію або електрохімічні методи. Група інших методів дозволяє контролювати хід зносу компонентів, які змащуються відповідним мастилом: ці методи підходять для опису морфології та розподілу частинок, що утворюються внаслідок стирання металів, волокнистих частинок з фільтрувальних матеріалів, забруднюючих речовин із зовнішнього середовища тощо. Зокрема, до цих методів належить аналітична ферографія з подальшим аналізом зображень та з додатковим вивченням морфології окремих частинок

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

за допомогою скануючої електронної мікроскопії з можливістю аналізу складу частинок за допомогою локального електронного мікроаналізатора.

### Використані експериментальні методи

Інфрачервона спектrometerія: Аналізи проводили за допомогою ІЧ-спектрометра з Фур'є Vector 44 (Bruker) у спектральному діапазоні 600-4000  $\text{cm}^{-1}$ , з роздільною здатністю 4  $\text{cm}^{-1}$  та номером сканування 32 за допомогою методики кристал ZnSe.

Ферографія Розділення частинок на пластиковій підкладці проводили за допомогою ферографа REO 1 (Ostrava Reo Trade). Ферограми оцінювали за допомогою комплексу, що складався з біхроматичного триокулярного мікроскопа типу Н 6800 та цифрової камери Micrometrics 318 CU, підключеної до ПК, оснащеного системою аналізу зображень LUIA.

Вольтамперометрія Розроблено метод вольтамперометричного визначення антиоксидантів у мастильних оливах. Вольтамперометричний аналіз вибраних антиоксидантів – 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенолу (ВНТ, чистота 99 %, AppliChem) та N-феніл-1-нафтиламін (FNA, чистота 98 %, Acros Organics) – проводили за допомогою електрохімічного аналізатора EP 100 (HSC service, Братислава) у триелектродній схемі. Електрохімічне окислення антиоксидантів проводили методом постійного струму з лінійною зміною потенціалу (лінійна вольтамперометрія з розгорткою). Індикаційний електрод у формі золотого диска (AuDE) поляризували в діапазоні потенціалів від 0 мВ до 1400 мВ зі швидкістю сканування 40 мВ/с.

Скануюча електронна мікроскопія та локальний електронний мікроаналіз За допомогою скануючого електронного мікроскопа TESCAN VEGA TS 5130 з EDX-спектрометром Quantax 200 (Bruker) ми досліджували частинки, виділені з масляних фільтрів різних транспортних засобів. Поверхня кріплень була

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

покрита провідним шаром золота в напилувальному приладі SC7620 (Quorum).

### **Експериментальні результати**

Експериментальна робота включала аналіз зразків свіжих та використаних моторних олив і олив для ЦПГ. Знос олив контролювався у зразках, взятих з двигунів та коробок передач різних типів транспортних засобів, таких як автобуси, автомобілі, важкі вантажівки та дорожні тягачі, локомотиви чеських залізниць, позашляхові та дорожні мотоцикли, сільськогосподарські трактори та машини.

Метою виконаної роботи було

- оптимізувати процедури та експериментальні умови вибраних методів,
- перевірити можливість їх застосування для трибодіагностичних цілей,
- оцінити експериментальні результати та сформулювати рекомендації для користувачів на основі їх інтерпретації.

### **ІЧ-спектрометрія з Фур'є**

Цей метод дозволив моніторити зміни, що відбуваються в оливах внаслідок впливу під час експлуатації. Такі зміни включають, наприклад, виснаження присадок в моторних та коробчатих оливах: значне зниження поглинання в області близько  $960\text{ см}^{-1}$  вказує на виснаження присадок, що покращують змащення та запобігають задиранню (рис. 1).

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

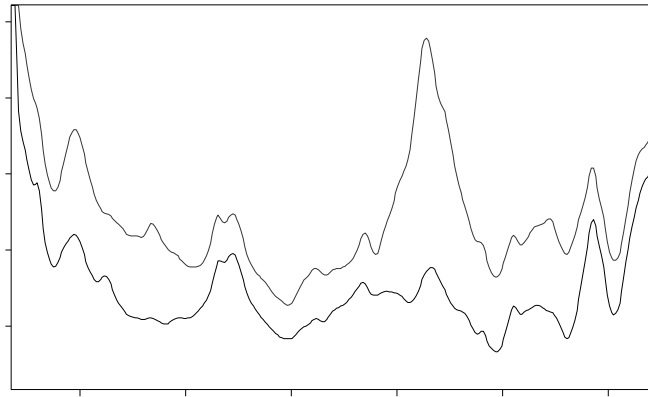


Рис. 2.3. Фрагмент ІЧ-спектру моторної оливи SAE 15W 40 (трактор ZETOR) зразок № 1 – нижній спектр (зношена олива)  
зразок № 2 – верхній спектр (нова олія)

Олива, спектр якої представлено на рис. 2, демонструє помітне зниження вмісту присадок, що покращують змащення та запобігають задиранню, в області 996-969 см<sup>-1</sup> та зниження вмісту високотемпературного антиоксиданту на основі сполук сірки, що пов'язано з високим температурним навантаженням двигуна. Пік в області 880 см<sup>-1</sup> зумовлений наявністю палива в оливі внаслідок поганої герметичності паливної системи, а пік в області 1630 см<sup>-1</sup> пов'язаний зі значною негерметичністю поршневої групи, що призводить до продування газів згоряння, що містять оксиди азоту.

Деградація пластичного мастила LV-2,3, що міститься в підшипнику, спричинена електричним струмом, задокументована на рис. 3; ерозійний вплив електричного струму також пошкодив матеріал підшипника.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

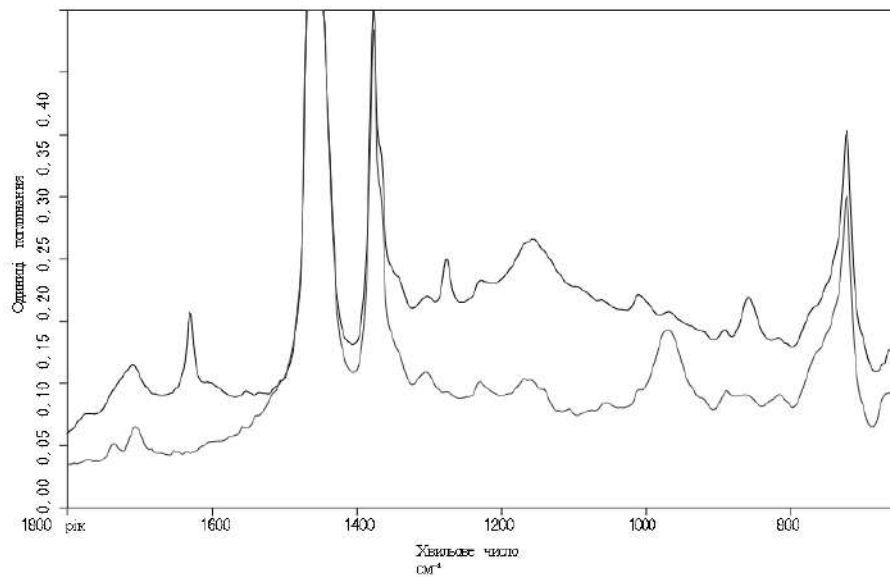


Рис. 2. 4Фрагмент ІЧ-спектру моторної оливи (CITY BUS ) зразка № 1 – нижній спектр (нова олива)  
зразок № 2 – верхній спектр (відпрацьована олія)

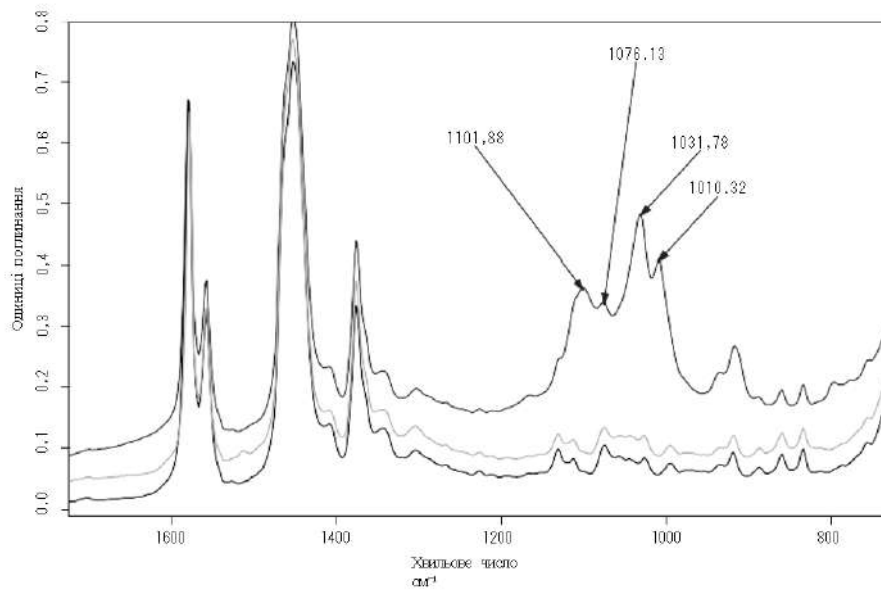


Рис. 2.5. ІЧ-спектри FTRE зразків пластичного мастила LV 2,3 зразок № 1 – нижній спектр (мастило з непошкодженої частини підшипника) зразок № 2 – верхній спектр (мастило з

пошкодженої частини підшипника) зразок № 3 для порівняння – середній спектр (невикористане мастило)

### Вольтамперометрія

У рамках експериментальних робіт, виконаних у вольтамперометрії, було знайдено відповідні умови для одночасного визначення фенольних та аміноантиоксидантів. Антиоксиданти на основі фенолів можуть бути електрохімічно окислені при поляризації золотого дискового електрода AuD в діапазоні потенціалів від 0 мВ до 1700 мВ у 0,2 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> у присутності етанолу та ацетонітрилу (3:1).

Якщо аналізується суміш аміно- та фенольних антиоксидантів, необхідно використовувати кислий розчин H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> у присутності ацетонітрилу; у цьому середовищі потенціали півхвиль окремих хвиль помітно диференціюються. Потенціал півхвиль, E<sub>1/2</sub>, фенілнафтиламіну має значення 805 мВ, а E<sub>1/2</sub> для ВНТ становить 1070 мВ. Вторинні аміни можна визначити безпосередньо в цьому основному електроліті; присутність ВНТ не заважає їх визначенню. Визначення ВНТ у зразках, що містять порівнянні кількості вторинних ароматичних амінів, вимагає виключення амінів, оскільки їх присутність заважає визначенню фенольних сполук.

Було запропоновано та оптимізовано процедуру маскування ароматичних амінів шляхом їх реакції з азотистою кислотою. Отримані нітрозаміни можуть бути згодом використані для чутливого та селективного визначення аміноантиоксидантів методом катодного відновлення на підвісному ртутному краплинному електроді (HMDE) за допомогою диференціальної імпульсної вольтамперометрії швидкого сканування (DPV FS). Метод був застосований до практичних зразків олій. Результати та їх детальне обговорення були опубліковані, наприклад, у посиланні [4].

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

## Ферографія з подальшим аналізом зображень

Цей метод було застосовано для визначення поверхневої частки частинок у певній локалізації ферограми та оцінки коефіцієнта форми  $S$  абразивних частинок.

$$S = 4\pi \cdot A/P^2,$$

де  $P$  та  $A$  позначають відповідно довжину кола та площу поверхні частинки. Також інші морфологічні параметри були визначені на ферограмах на мікрофотографіях (Таблиця 1), а саме видовження =  $MaxF/MinF$ , де  $MaxF/MinF$  (максимальний/мінімальний діаметр Фере) – найбільша/найменша відстань між двома паралельними дотичними об'єкта.

Було створено програмний модуль, який дозволяє після початкового розмежування об'єкта подальшу модифікацію зображення в бінарному представленні шляхом його протягування. Після цього можна проаналізувати всю площу поверхні або окремі частинки. Результати вимірювань полів надають таблицю значень. Далі йде цикл розділення об'єктів за допомогою математичних морфологічних методів. Після розділення частинок визначається рамка вимірювання, яка обмежує область подальшого аналізу (що особливо вигідно при недосконалій сегментації або якщо потрібен вибір аналізованих частинок з часткового сегмента зображення). Іншою можливістю є ручна модифікація шляхом вибору з команд, запропонованих для обробки бінарного зображення. Представлення супроводжується інформацією про загальну кількість вибраних об'єктів.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

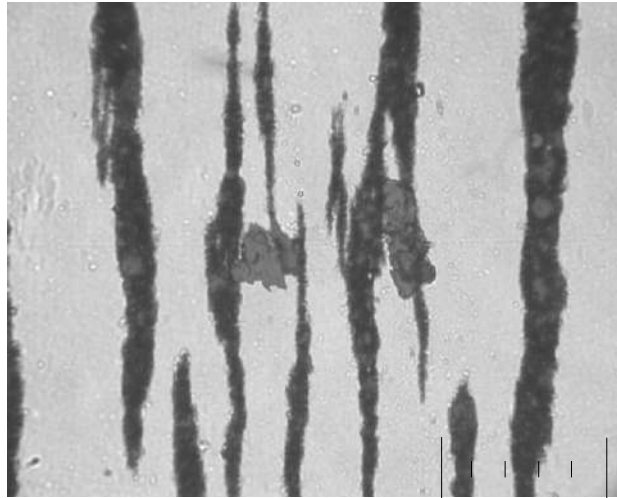
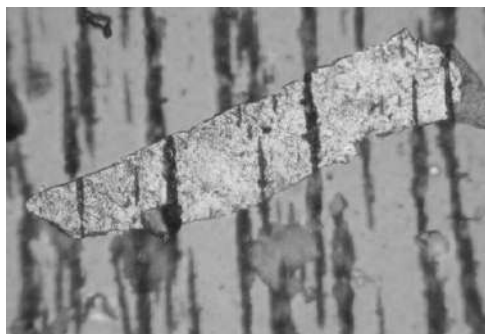
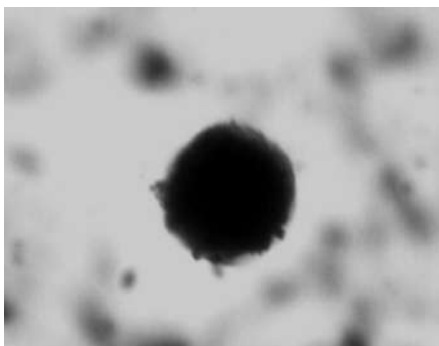


Рис. 2.6 Ферограма з ланцюжками частинок від адгезійного зносу та великими частинками, що утворилися внаслідок відриву від поверхневого шару змащеного компонента

(1 лінія поділу ~ 10 мкм)



					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58



а

б

с

Рис. 2.7 Типові частинки, фεροграфічно відокремлені від масел

а – Частинка зносу типової сферичної форми (діаметром приблизно 20 мкм)

б – Шарувата частинка з видимими слідами абразивного зносу (довжина приблизно 150 мкм)

с – Вдавлена частинка зносу різання (макс. розмір приблизно 100 мкм)

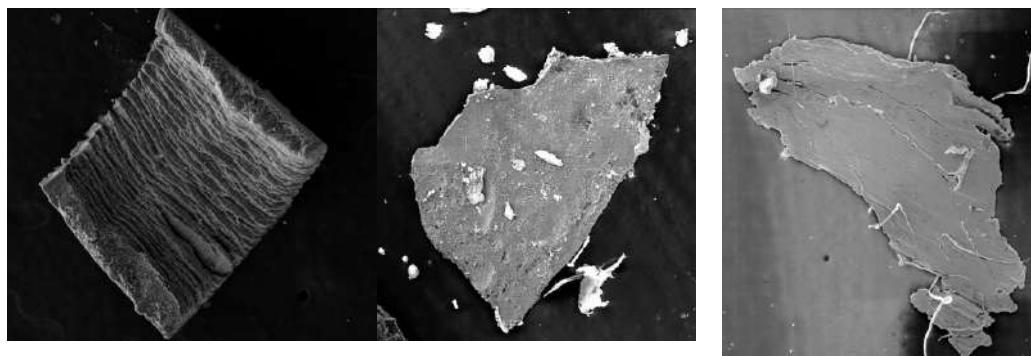


Рис. 2.8. Шарувата частинка зі слідами абразивного зносу (REM, макс. розмір частинок 400-500 мкм)

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

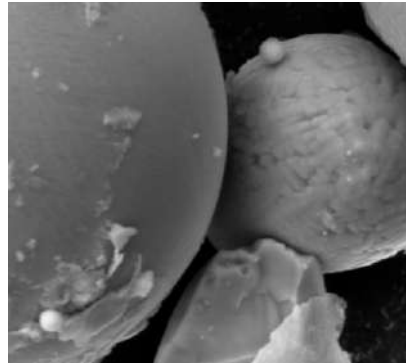
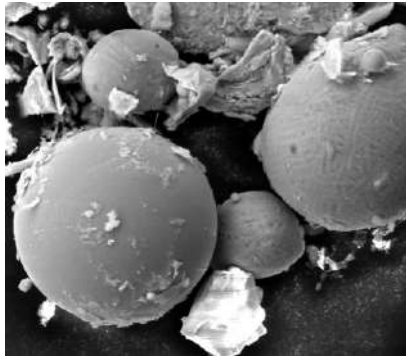


Рис. 2.9 Зносостійка частинка типової сферичної форми (REM, діаметри частинок 20-50 мкм)

Проведені досі експериментальні роботи призводять до висновку, що комплексна оцінка зносу моторних олиव та компонентів двигуна, що змащуються ними, повинна бути доречно доповнена також дослідженням частинок, що затримуються на масляних фільтрах. Хоча ця інформація має якісний, а не кількісний характер і отримується *ex post* (зазвичай під час одночасної заміни оливи та фільтрів), проте вона може дати додаткові важливі результати щодо процесів, що відбулися з моменту попередньої заміни.

Програмний модуль було протестовано на частинках, типових для окремих видів зношування; приклади див. на рис. 5-8. Автори опублікували низку робіт, присвячених проблемі вивчення частинок стирання з точки зору кількісного опису морфології частинок та аналізу їх складу.

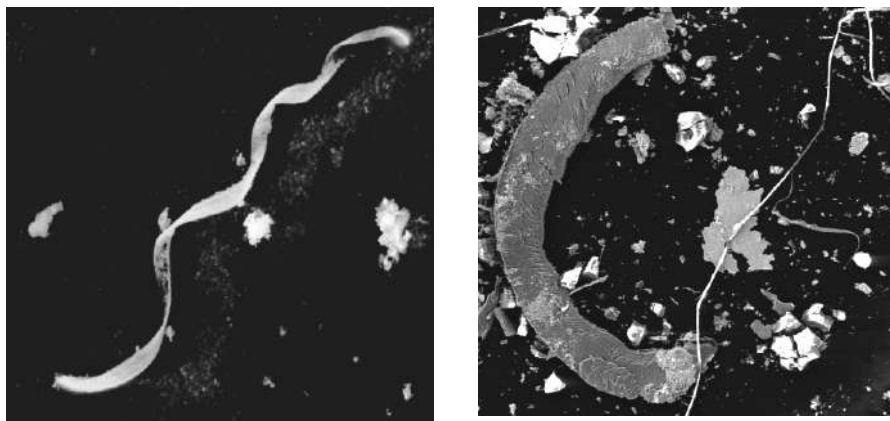


Рис. 210/ Частинки різального зносу (довжина 300-600 мкм)

### Аналіз частинок з масляних фільтрів двигуна

Вибрані типові частинки, виділені з фільтрувальних картриджів масляних фільтрів двигунів різних типів транспортних засобів, були проаналізовані на РЕМ за допомогою локального електронного мікроаналізатора. За хімічним складом досліджувані частинки можна розділити на п'ять груп, які детально описані в попередніх роботах.

Тип 1: дрібні частинки, зазвичай округлої форми та з поганою провідністю; невідомими елементами можуть бути залишки добавок, сторонні домішки тощо – це або вуглецеві відкладення (пористі пухкі утворення), або морфологічно різноманітні частинки біологічного походження, що містять вуглець.

EDX-аналіз оливи двигуна показав, що переважна частина частинок походить з матеріалу турбіни (домінуючим елементом був алюміній). Лише епізодично

Були виявлені частинки з переважним вмістом заліза. Стирання може бути зумовлене, перш за все, безпосереднім контактом поверхонь, що труться;

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

іншою причиною може бути інтенсивна дія оливи на поверхню лопаток турбіни під час обертання роторів турбіни. Частинки, присутні в оливі, можуть атакувати поверхню лопатки та спричиняти її підвищений знос. Якщо така дія погіршує початкову якість поверхні лопатки (яка тоді стає грубішою), то змінюється і режим потоку заповнення, що може призвести до зниження ефективності передачі потужності.

Інструментальні методи, які можуть надати значний обсяг даних про перебіг та ступінь зносу мастильних матеріалів транспортних засобів, інтенсивно розвиваються. Цінним фактом є те, що ця методологія надає окрім діагностичної також прогностичну інформацію, тобто дозволяє передбачати та запобігати надзвичайним ситуаціям. Оптимізація обміну масляних наповнювачів є серйозною економічною та екологічною проблемою; саме в цій галузі трибодіагностика знаходить широке застосування.

Його головна перевага полягає в тому, що цей метод діагностики не вимагає розбирання двигуна. На основі аналізу частинок в експлуатованому мастилі він дозволяє оцінити режим зношування в даному механізмі. Оцінка кількості, морфології та складу абразивних частинок дозволяє передбачити настання граничного або аварійного зносу; в деяких випадках також можна визначити походження абразивних частинок та розрізнити типи матеріалів, з яких вони були виготовлені. Деградацію масел протягом терміну їх служби можна контролювати за допомогою спектрохімічних та вольтамперометричних методів. Їх поєднання дозволяє комплексно оцінити зміни, що відбуваються в мастилі та в механізмі, що ним змащується.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.3. Вибір режимів діагностування.

#### **Вимірювання тертя для поршнево-циліндрової системи**

Для глибшого розуміння механізму трибології поршневого вузла, а також для підтримки моделювання поршневого вузла, як згадувалося вище, була розроблена методологія експериментальних вимірювань, яка в основному вимірює силу тертя між кільцем та вкладишем. Метод, що застосовується для вимірювання тертя вздовж циліндра.

Повний цикл двигуна можна розділити на три підходи: метод розбирання двигуна, метод плаваючої гільзи та метод миттєвого середнього ефективного тиску.

Запуск двигуна без ущільнювальних компонентів є загальним методом вимірювання тертя двигуна. Колінчастий вал двигуна зазвичай обертається електродвигуном з підсистемою реєстрації крутного моменту. Для точного вимірювання загальної потужності тертя ущільнювальні компоненти були видалені, що має на меті полегшити запуск двигуна та зменшити перешкоди, пов'язані зі споживанням потужності, не пов'язані з тертям. Отже, випробуваний крутний момент відображає тертя поршня та шатуна. Однак неможливо відокремити тертя поршня від тертя штока через низку проблем, пов'язаних з випробуваннями на розбирання двигуна:

- Вплив високого тиску в циліндрах не враховується.
- Випробування не проводиметься за реальних температур порівняно з працюючим двигуном. Отже, температура трибоплівки, очевидно, низька під час випробування з двигуном без процесу згоряння.
- Неможливо по-справжньому виділити внесок кожного окремого компонента. Наприклад, якщо одне кільце видалити, це дозволить більшій кількості оливи надходити до решти кілець. Це змінить загальні трибологічні властивості та ефект тертя.

Отже, різниця в терті між випробуваннями двигунів з двигуном та

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

двигунів з функцією запалювання пов'язана з впливом високого тиску газу та високої температури згоряння. Муфті та Пріст повідомляли, що втрати на тертя в умовах запалювання дещо вищі, ніж за умов роботи двигуна, через високий тиск і температуру процесу згоряння. Хоча випробування з двигуном не змогло точно виявити тертя поршня, все ж дуже корисно кількісно визначити зміни тертя поршневого вузла за допомогою дуже невеликої модифікації випробувального стенду двигуна. Зокрема, Дуглас та ін. провели випробування двигуна з двигуном зі знятою головкою блоку циліндрів, щоб усунути події побічних ефектів від інжектора та клапана, отже, решта побічних ефектів пов'язана з трибологічною поведінкою взаємодії поршневого кільця/гільзи циліндра.

Іншим методом, ймовірно, найточнішим методом кількісної оцінки сили тертя системи кільце-вкладиш, є метод плаваючого вкладиша. Метод плаваючого вкладиша використовує плаваючу

Гільза циліндра, що підтримується датчиками навантаження, для вимірювання тертя в поршневому вузлі. Випробувальний стенд відокремлює гільзу від головки циліндра та картера додатковими пружними зв'язками, щоб забезпечити вільний рух в осьовому напрямку, та вимірює сили, що діють на гільзу циліндра. Було проведено кілька досліджень двигуна з плаваючою гільзою для тертя поршневих кілець, що підтверджує валідацію моделі для змащування кілець контролю оливи та чутливості для вирішення відмінностей у характеристиках тертя між різними мастилами. Однак ці результати також свідчать про аномальний робочий стан порівняно з випробуванням двигуна з запальним двигуном, який зазнав перешкод від вібраційної нестабільності. З іншого боку, проблема цього методу полягає в тому, що складна модифікація є дорогою та важко збалансувати радіальну силу та вплив тиску, що діють на гільзу.

Метод необхідний для точних вимірювань ряду параметрів, таких як

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

тиск у циліндрах, зусилля на шатуні, швидкість обертання двигуна та положення колінчастого вала, а також для розрахунку прискорення поршня та сил інерції. Сила тертя – це оцінений результат, віднятий від зусилля на шатуні. Недоліком є те, що сила тертя – це невелика різниця між тиском та зусиллям на шатуні, на яку легко впливає похибка вимірювань тиску.

Загалом, немає засобів для онлайн-вимірювання тертя та трибологічних ефектів, які можна було б застосувати для моніторингу стану.

### **Моніторинг стану мастила для системи двигуна**

Мастильні матеріали відіграють життєво важливу роль у системі двигуна, захищаючи рухомі частини від тертя та зносу, розсіюючи тепло компонентів та очищаючи поверхні контакту компонентів від забруднення частинками. Аналіз мастильної оливи є ефективним підходом до оцінки стану машини та забезпечення раннього попередження про прогресування її несправності. Як підсумовано, показники для оцінки ступеня деградації оливи включають головним чином в'язкість, вміст води, кількість частинок, загальне кислотне число, температуру спалаху, програму спектрометричного аналізу оливи тощо. Загалом, основні сенсорні стратегії моніторингу роботи оливи можна класифікувати на два основні типи: (а) фізичне виявлення, яке надає інформацію про стан оливи з точки зору в'язкості, частинок та сміття, полярності або діелектричної проникності; (б) хімічне розпізнавання старої оливи, що передається під впливом високої температури, вологи, вмісту палива в моторній оливі та інших забруднень.

Онлайн-метод може отримувати інформацію в режимі реального часу для запобігання катастрофічним відмовам компонентів під час роботи. Отже, було розроблено безліч досліджень та сенсорних технологій для онлайн-моніторингу ефективності змащення. Однак більшість датчиків у системі вимірювання мастила були розроблені як інтрузивні системи та не можуть

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

запропонувати інтегровану інформацію про решту терміну служби мастил. Крім того, вищезгадані методи моніторингу стану мастила є дорогими у виробництві та обслуговуванні або складними в експлуатації та монтажі.

Ультразвуковий метод є привабливим неінвазивним методом моніторингу стану без будь-якого втручання. Ультразвуковий метод має потенціал для моніторингу режиму потоку завдяки тому, що ця технологія чутлива як до швидкості потоку, так і до розміру частинок у системах транспортування шламу. Ультразвуковий метод також використовувався для визначення товщини трибоплівки підшипникової системи. Сюй та ін. повідомили про результати моделювання та аналізу фізичної моделі з використанням ультразвукового датчика забруднень оливи для виявлення твердих частинок та бульбашок повітря. Лі та Цзян представили теоретичний аналіз ультразвукового датчика для розпізнавання забруднень від зносу в мастилi. Зокрема, Міллс та ін. [95] розробили ультразвуковий метод для вимірювання товщини мастильної плівки між кільцем та поверхнею вкладиша в робочому стані. Ці досягнення демонструють можливість визначення ефективності змащування за допомогою активних ультразвукових методів.

Зокрема, оскільки всі основні характеристики деградації оливи можна співвіднести зі зміною в'язкості, включаючи окислення, забруднення водою/частинками та розведення паливом, в'язкість зазвичай береться за стандарт порівняння деградації мастильної оливи. Крім того, АС-тестування, як спеціальний тип ультразвукового методу, активно вивчається для моніторингу стану двигуна. Щоб співвіднести АС з в'язкістю мастильної оливи двигуна, Еламін та його колеги повідомили про можливість прогнозування якості моторної оливи за допомогою значень АС РМС завдяки тому, що на значення АС більше впливає в'язкість оливи. Таким чином, АС потенційно може запропонувати вичерпну інформацію про стан змащення економічно ефективним та простим у впровадженні способом.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

### 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЦПГ

#### 3.1. Загальна методика експериментальних досліджень

Було проведено експериментальні роботи на двох типах одноциліндрових двигунів для оцінки доцільності використання вимірювань АС як основи для моніторингу та діагностики трибологічних характеристик поршневої системи.

Попередні випробування були проведені на вертикальному одноциліндровому двигуні з безпосереднім уприскуванням від стиснення моделі QH10II. Використання одноциліндрового двигуна пов'язане з меншим фоновим шумом від інших циліндрів порівняно з багатоциліндровим двигуном. На основі цих експериментальних досліджень було проведено подальші експерименти на новому одноциліндровому двигуні CIDІ моделі CH125. Основні характеристики наведено табл. 3.1. Вихрострумний динамометр та система керування DW 160 (від Chengbang, Китай) були поєднані з випробувальним двигуном для керування швидкістю обертання та навантаженням під час випробування. Рисунок 3.1 ілюструє діаграму фаз газорозподілу та фаз подачі палива. Принципова схема показано принципову схему системи тестування двигуна та положення датчика АС.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Таблиця 3.1 Основна специфікація випробувальних двигунів

Циліндри число	один	один
Горіння система	Безпосереднє впорскування. вертикальний тип	Безпосереднє впорскування. вертикальний тип
Діаметр циліндра/хід поршня	125/11.1 мм	135/12.1 мм
Обсягзміщення	1..195 л	1.475 л
Стиснення співвідношення	18:1	18:1
Номінальна потужність	14.7/24.1.1 кВт/об/хв	2.1.6/22.1.1 кВт/об/хв
Макс. крутний момент	67/192.1 Нм/об/хв	67/192.1 Нм/об/хв

Датчик АЕ розташований на зовнішній поверхні циліндра поблизу головки блоку циліндрів. Оскільки швидкість передачі хвиль АС висока в тому ж середовищі, а слабкі сигнали тертя АС легко послаблюються через водяну сорочку, датчик розташований поблизу металевої частини циліндра, як показано на діаграмі вертикального поперечного перерізу. Крім того, це місце також мало зазнає впливу розподільного вала та підшипника колінчастого вала через велику відстань передачі.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

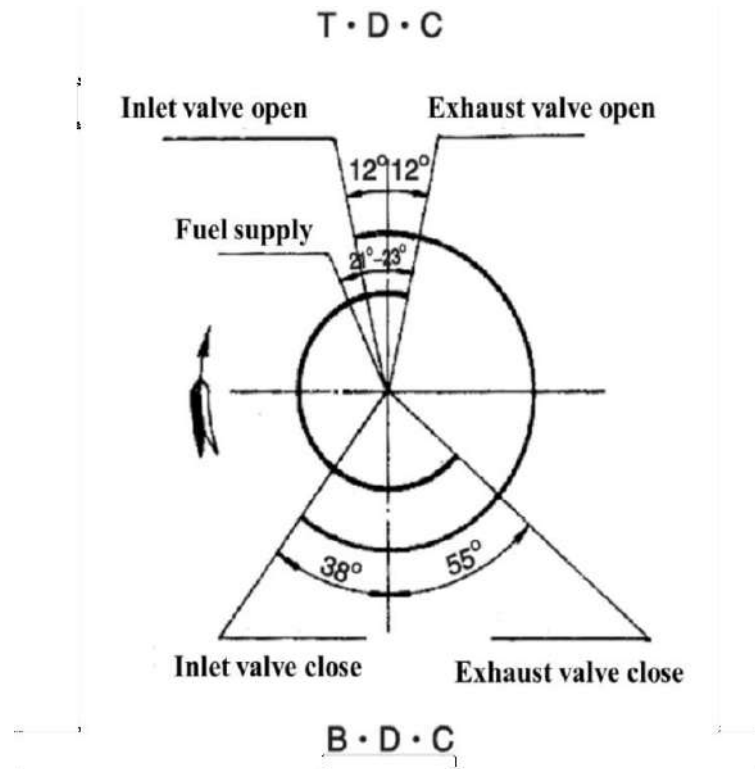


Рисунок 3.1 Діаграма фаз газорозподілу та фаз подачі палива

Зокрема, випробування двигуна також проводилося на тому ж випробувальному стенді для випробування в русі. Для придушення перешкод, що виникають внаслідок аварії, клапан і паливний насос були видалені. Двигун приводився в рух електродвигуном, специфікація якого наведена в Стіл 5-2. Вихідний крутний момент і швидкість двигуна були перевірені системою вимірювання крутного моменту, специфікацію приладу для вимірювання крутного моменту наведено нижче.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

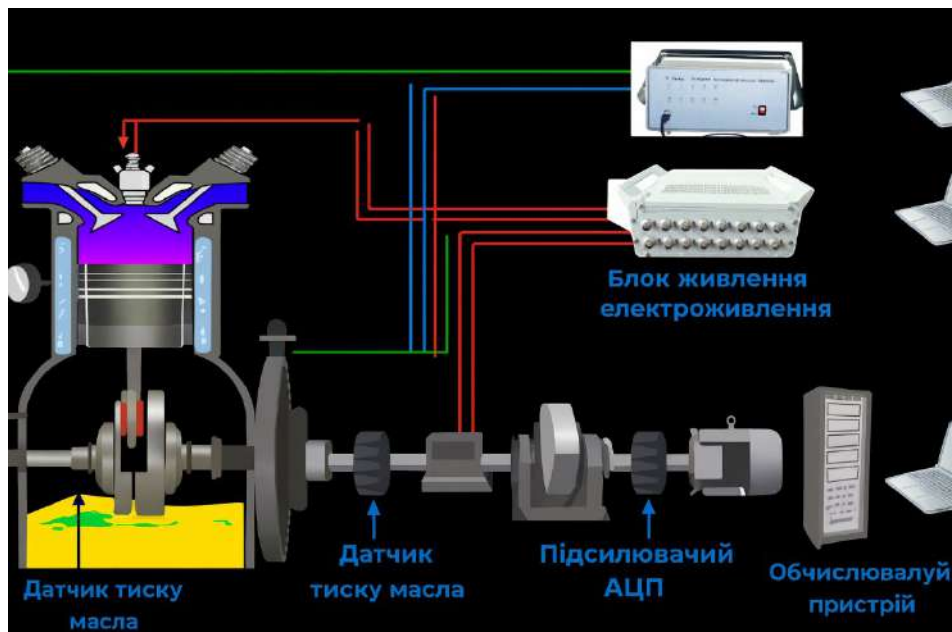


Рисунок 3.2. Випробувальний стенд

Виробник	Шаньсі Електричний Мотор Ко.. Лтд
Тип	Y3-160M-4
Вихідна потужність (кВт)	11
Електричний струм (А)	33.6
Номінальна швидкість (об/хв)	1460
Ефективність (%)	89
Коефіцієнт потужності	0.86
Номінальний крутний момент (Нм)	71
Макс. крутний момент (Нм)	88
Вага (кг)	140



Датчик швидкості та кутового

Рисунок 3.3 Фотографія системи вимірювання крутного моменту

Під час цього дослідження сигнал АС, швидкість обертання двигуна, тиск у циліндрі та кут повороту колінчастого вала вимірювалися та реєструвалися за допомогою наступних вимірювальних приладів.



Рисунок 3.4 Датчик акустичної емісії широкого діапазону SR800

Широкосмугові датчики зазвичай мають хороший потенціал для надання додаткової інформації, але, на жаль, більшість найкращої інформації знаходиться в нижній частині спектра, саме там, де виникають проблеми з шумом, тому для більшості практичного структурного моніторингу рекомендуються високочастотні резонансні датчики. У цій роботі датчик Technology Co., Ltd встановлюється на зовнішній поверхні корпусу циліндра для вимірювання відгуків АС, де він насправді доступніший для здійснення

онлайн-моніторингу змащення двигуна. Специфікація датчиків акустичної емісії S800 була наведена в частотну характеристику датчика АС наведено в Рисунок 5-6. Датчик має добру частотну характеристику та високу чутливість у діапазоні від 25 кГц до 405 кГц згідно з калібрувальною таблицею. Зокрема, діапазон може охоплювати нижні характерні частоти від 20 кГц до 50 кГц, оцінено за...(4-3) від FAI, коли тестовий двигун працює в діапазоні від 1000 об/хв до 2000 об/хв. Сигнали АС для кожного типу тестових випадків були отримані за стабільних робочих умов. Тривалість запису даних становить майже 1 с, безперервно дискретизується з частотою 800 кГц, що охоплює понад 150 робочих циклів двигуна для достатнього усереднення та, таким чином, отримання надійних результатів. Крім того, разом із сигналами АС також записується опорний сигнал верхньої мертвої точки (ВМТ), щоб можна було здійснити аналіз кутової області для пов'язування сигналів АС з ключовими подіями двигуна. Загалом, випробування запечатали майже 1 терабайт даних. Таким чином, датчик SR800 АЕ було обрано продукцію від Soundwel Technology Co., Ltd. Специфікація датчиків акустичної емісії SR800 така:

Модель	SR800
Розмір (мм)	Φ19×15
Робоча температура (°C)	-20-80
З'єднувач	M5 – KY
Розташування роз'єму	Сторона
Робоча частота (кГц)	10~800
Резонансна частота (кГц)	600
Пікова чутливість (дБ)	70 \$

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

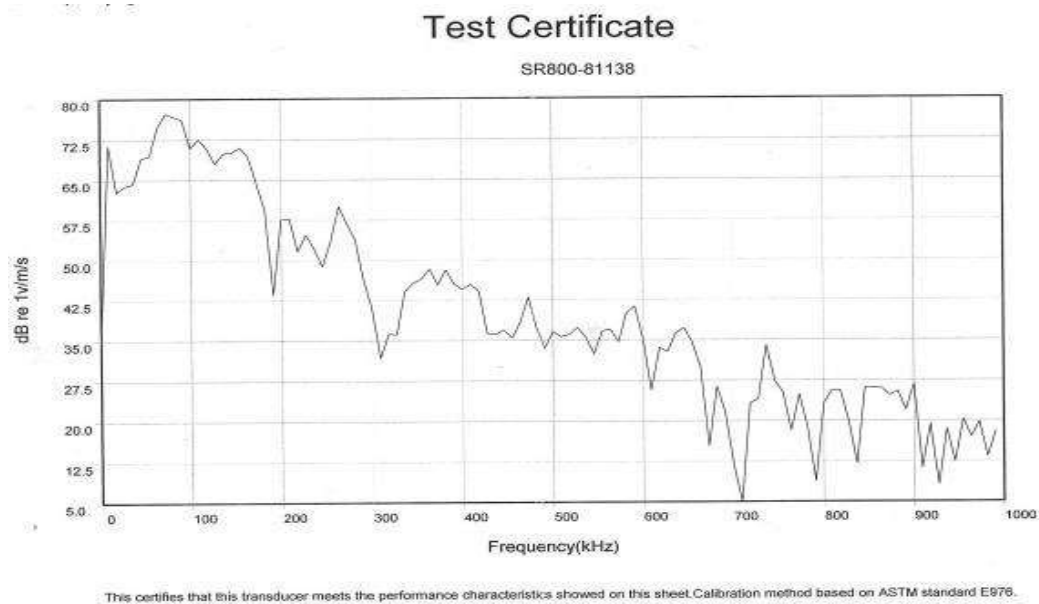


Рисунок 3.5 Крива частотної характеристики датчика акустичної емісії SR800

Згідно з калібрувальними графіками, частотна характеристика показує три діапазони: 0-200 кГц, 100-200 кГц та 350-800 кГц, в яких коефіцієнти підсилення помітно падають. Крім того, в кожному діапазоні є багато локальних піків. Ця основна частотна характеристика також буде врахована під час аналізу даних.

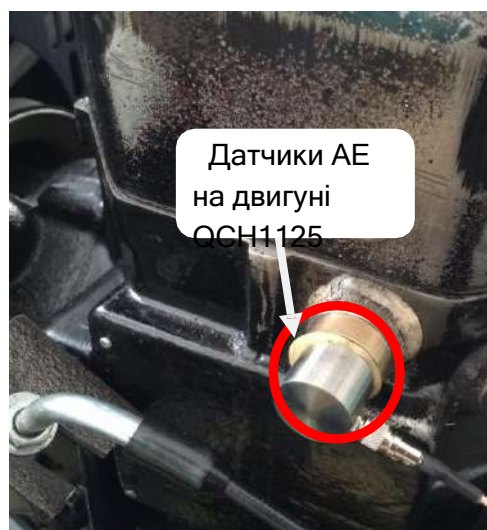


Рисунок 3.6 Датчик АЕ на поверхні двигуна

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Датчик АС закріплено на зовнішній поверхні циліндра, як показано на рисунку розташований поблизу внутрішньої поверхні циліндра, таким чином, він відносно далеко від джерел перешкод, таких як посадка клапанів та згоряння.

У цьому дослідженні для отримання сигналів АС використовувалася система вимірювання ASE2S з двома каналами. Вихідний сигнал датчика АС іноді сягає кількох мікрвольт, тому для такого слабкого сигналу інтенсивність сигналу зменшується при передачі на великі відстані. Отже, передпідсилювач повинен збільшити вихідний сигнал датчика в кілька разів перед передачею, а потім передати його через високочастотний коаксіальний кабель до блоку збору сигналу. Зазвичай використовується збільшення 40 дБ. Специфікація та фотографія передпідсилювача для системи збору акустичної емісії в цій роботі наведені в Таблиця 3.4 та рис 3.7 відповідно. Одночасно сигнал енкодера був вибірково підібраний для позначення положення верхньої мертвої точки (ВМТ) з метою вирівнювання сигналу АС зі швидкістю двигуна для подальшого аналізу в кутовій області.

Таблиця 3.4 Специфікація передпідсилювача для системи збору даних акустичної емісії

Модель	ПА
Коефіцієнт посилення (дБ)	40
Розмір (мм)	118*37*30
Робоча температура (°C)	-25~60
ум (дБ)	<25
Діапазон вихідного сигналу (В)	±12

Робоча частота (кГц)	10~2040
Напруга (В)	28 В постійного струму
Номінальне навантаження (Ом)	55



Рисунок 3.7 Ілюстративні фотографії передпідсилювачів



Рисунок 3.8 Система збору даних акустичної емісії

Система вимірювання АС в цьому дослідженні складається з датчика АС, попереднього підсилювача, детектора АС та ПК, як показано на рисунку. Детектор акустичної емісії є дуже важливою частиною системи детектування акустичної емісії. Його основна роль полягає в попередньому підсиленні

аналогового сигналу напруги, що проходить через аналого-цифровий перетворювач, в дискретний цифровий сигнал, який може бути зібраний програмним забезпеченням та збережений на комп'ютері. Детектор акустичної емісії, що використовується в цьому експерименті, - це детектор акустичної емісії SAU2-116-08 виробництва Пекіна.

Довжина вибірки сигналу становить до 129 тисяч точок вибірки з точністю 16 біт.

Тиск у циліндрі вимірювався датчиком тиску Kistler 6052с, який був підключений до головки блоку циліндрів, як показано на малюнку. Рисунок 5-10. Технічні характеристики датчика тиску Kistler наведено в таблиці. Сигнали від датчика тиску пропускалися через підсилювач заряду Kistler Types 4618A2, який використовувався для посилення сигналів перед подачею їх на аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Положення колінчастого вала вимірювалося датчиком положення колінчастого вала 39180 (Hyundai Mobis) для пов'язування сигналів АС з кутом положення колінчастого вала. Цей датчик положення колінчастого вала є електромагнітним пристроєм, розташованим на маховику, як показано на малюнку контролювати швидкість обертання колінчастий вал для кожного оберту.

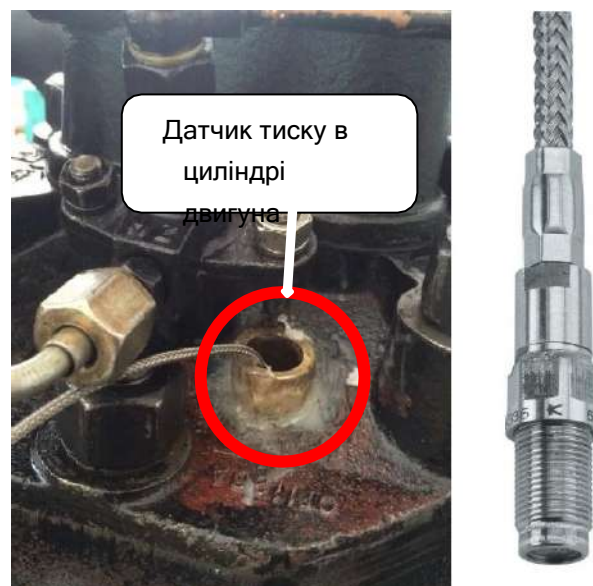


Рисунок 3.9.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Відносний кут між положенням випробування та положенням ВМТ на маховику вимірювався перед випробуваннями. Отже, інформацію про ВМТ можна поєднати із сигналами АС для позначення фаз газорозподілу, впорскування та згоряння випробуваного двигуна відповідно до діаграми фаз газорозподілу та фаз подачі палива тестового двигуна.

Чутливість	пКл/ба р	≈-20
Власна частота (вимірювальний елемент)	кГц	≈160
Лінійність, усі діапазони (при 23 °С)	%/FSO	≤±0,4
Чутливість до прискорення (осьова)	бар/г	<0,0002
Чутливість до прискорення (радіальна)	бар/г	<0,0005
Діапазон робочих температур мін.-макс.	°С	-20-350
Зміна чутливості в діапазоні температур: 23-350 °С	%	≤±2
Помилка теплового удару (при 1500 1/хв, р <sub>тп</sub> = 9 бар) Δр (короткочасний дрейф)	Бар	≤±0,5
Опір ізоляції при 23 °С	Ом	≥1013
Ударостійкість	г	2 000
Момент затягування	Н·м	1,5
Ємність, без кабелю	пФ	5

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77



Рисунок 3.10 Розташування датчика положення колінчастого вала

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Визначено, що більшість відомих методів діагностування циліндро-поршневої групи характеризуються недостатньою точністю або не адаптовані до конструкцій і систем керування сучасних автомобільних двигунів. Це знижує ефективність технічного контролю під час експлуатації.
2. Розроблено діагностичну модель, яка дає змогу оцінювати тиск у кінці такту стиснення з урахуванням зносу циліндра та впливу основних експлуатаційних факторів, що визначають зміну цього параметра.
3. Встановлено, що головним джерелом похибки моделі є неврахування реальних втрат тиску через витік повітря, величина яких змінюється залежно від положення поршня в циліндрі. Разом з тим модель враховує робочий температурний діапазон двигуна (20...90 °С) та повітря (25...40 °С), що підвищує достовірність результатів у реальних умовах.
4. З'ясовано, що найінформативнішим параметром, який відображає зношування верхньої частини циліндра, є кутове положення колінчастого вала в момент досягнення максимального тиску наприкінці стиснення.
5. Виявлено, що найчутливішим комплексним показником технічного стану циліндро-поршневої групи є поєднання двох діагностичних параметрів — величини максимального тиску в кінці такту стиснення та фази цього тиску відносно положення колінчастого вала.

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

## Список використаних джерел

1. Кисликов, В. Ф., & Луцик, В. В. (2006). Будова й експлуатація автомобілів: Підручник (6-е вид.). Либідь. <https://www.mvpuatb.lviv.ua/wp-content/uploads/2018/02/Budova-jj-ekspluataciya-avtomobiliv.pdf>
2. Лудченко, О. А. (2003). Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Підручник. Знання-Прес. [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Ludchenko\\_2003\\_511.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Ludchenko_2003_511.pdf)
3. Дембіцький, В. М., Павлюк, В. І., & Придюк, В. М. (2018). Технічна експлуатація автомобілів: Навчальний посібник. Луцький НТУ. [https://e-tk.lntu.edu.ua/pluginfile.php/10557/mod\\_resource/content/0/TEA%20\(лекції\).pdf](https://e-tk.lntu.edu.ua/pluginfile.php/10557/mod_resource/content/0/TEA%20(лекції).pdf)
4. Хрулев, А., Сараєв, О. В., & Воробйов, О. (2021). Expert assessment of the technical condition of the cylinder-piston group of the car engine. Журнал машинобудування та транспорту. [https://www.researchgate.net/publication/353308137\\_Expert\\_assessment\\_of\\_the\\_technical\\_condition\\_of\\_the\\_cylinder-piston\\_group\\_of\\_the\\_car\\_engine](https://www.researchgate.net/publication/353308137_Expert_assessment_of_the_technical_condition_of_the_cylinder-piston_group_of_the_car_engine)
5. Gilles, T. (2017). Automotive Engines: Diagnosis, Repair, Rebuilding (8th ed.). Cengage Learning. <https://dokumen.pub/automotive-engines-diagnosis-repair-rebuilding-8nbsped-2017952153-9781337567480.html>
6. McCord, K. (2009). Automotive Diagnostic Systems: Understanding OBD I and OBD II. Delmar Cengage Learning. [https://books.google.com/books/about/Automotive\\_Diagnostic\\_Systems.html?id=kyEtsrPk9ZQC](https://books.google.com/books/about/Automotive_Diagnostic_Systems.html?id=kyEtsrPk9ZQC)
7. MAHLE GmbH (Ed.) (2016). Pistons and Engine Testing. Springer Fachmedien. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-658-09941-1.pdf>
8. Zinko, R. (2021). Vehicle diagnostic system of the car engine. MATEC Web of Conferences. [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2021/20/mateconf\\_icdmv21\\_01014.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2021/20/mateconf_icdmv21_01014.pdf)
9. MS Motorservice International GmbH (2016). Piston damage – recognising and

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

rectifying. Technical brochure. [https://www.ms-motorservice.com/MediaAssets/piston-damage-recognising-and-rectifying\\_51730.pdf](https://www.ms-motorservice.com/MediaAssets/piston-damage-recognising-and-rectifying_51730.pdf)

10. Unknown (2020). Examination of engine cylinder-piston group damages. ResearchGate.

[https://www.researchgate.net/publication/343637396\\_Examination\\_of\\_engine\\_cylinder-piston\\_group\\_damages](https://www.researchgate.net/publication/343637396_Examination_of_engine_cylinder-piston_group_damages)

11. Лудченко, О. А. (2021). Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. Організація і управління. ЖАТК. <https://zhatk.zt.ua/wp-content/uploads/2021/03/navchalna-literatura-dlya-speczialnosti.pdf>

12. Навчальний заклад ХДА (2020). Технічна експлуатація автомобілів. Електронний підручник. <https://xdakollege.lcloud.in.ua/ebook/254>

13. Кукурудзяк, І. С. (2010). Технічна експлуатація (Автомобілі). ВНТУ. [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Kukurudzyak\\_2010\\_198.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Kukurudzyak_2010_198.pdf)

14. Delgado, C. A. (2014). Automotive Engine Performance: Theory and Servicing. Pearson. <https://www.amazon.com/Automotive-Engine-Performance-Theory-Servicing/dp/0133146126>

15. Snyder, C. W. (2015). Advanced Engine Performance Diagnosis. Cengage Learning. <https://www.cengage.com/c/advanced-engine-performance-diagnosis-6e-halderman>.

16. Haynes Publishing (2013). Haynes Manual: Automotive maintenance & repair. Haynes. [https://en.wikipedia.org/wiki/Haynes\\_Manual](https://en.wikipedia.org/wiki/Haynes_Manual)

17. Automotive Education & Supply (2020). Training Books & Manuals for Automotive Diagnostics. AESwave. <https://www.aeswave.com/cart.php?c=413>

18. Saeed, K. (2020). Automated Diagnostic System for Engine Cylinder-Piston Group. SAE Technical Paper. <https://www.sae.org/papers/automated-diagnostic-system-engine-cylinder-piston-group-2020-01-2022>

					КРММТВА 25. 24339. 000 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		