

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**«Методика діагностики дизельного двигуна на основі  
спектральних характеристик мастильних матеріалів»**

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

Шифр КвРМТВА. 21153.01.06.00

Виконав студент 2 курсу група МТВАм-24-1

  
Підпис

Максим ПАКУЛЬКО

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ

  
Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ

  
Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри ТАМ

5.12.2025

Дата

  
Підпис


Олександр ДИХА

Хмельницький, 2025

# 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

  
Диха О.В.  
10.10 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

### Пакулько Максиму Михайловичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Методика діагностики дизельного двигуна на основі спектральних характеристик мастильних матеріалів.*

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25.08.2025 р. № 65 (Д 27)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів, робіт, практики.*

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

1) *Основи систем діагностування автомобільного транспорту.*

2) *Спектральний аналіз масла.*

3) *Застосування спектрального аналізу для діагностики технічного стану дизельних двигунів.*

4) *Обладнання для спектрального аналізу.*

4) *Висновки, рекомендації.*

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 10 жовтня 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Основи систем діагностування автомобільного транспорту	30.10.25	вик
2	Спектральний аналіз масла	18.11.25	вик
3	Застосування спектрального аналізу для діагностики технічного стану дизельних двигунів	30.11.25	вик
4	Обладнання для спектрального аналізу	8.12.25	вик
5	Висновки, рекомендації	11.12.25	вик
6	Оформлення пояснювальної записки	20.12.25	вик
7	Захист дипломної роботи	22.12.25	

Студент



Максим ПАКУЛЬКО

Керівник кваліфікаційної роботи



Сергій ПОСОНСЬКИЙ

«Методи  
характер  
розділів,  
наймену  
сторінка  
тексту, н  
Ме  
ефектив  
діагност  
дозволяє  
локаліза  
У  
мастиль  
результ  
результ  
Викона  
гаранту  
ефектив  
спектра  
своєчас  
трудомі  
техніки  
точність  
рахуно  
МОТО  
СПЕКТ  
ЗНОШ

## РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-24-1 Пакулько Максим Михайлович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Методика діагностики дизельного двигуна на основі спектральних характеристик мастильних матеріалів» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 17 найменування, розміщених на 2 сторінках, та 2 додатків розміщених на 20 сторінках. Роботу викладено на 84 сторінках, з них 76 сторінок основного тексту, на яких розміщено 22 рисунки і 12 таблиць.

Метою роботи є обґрунтування та експериментальне підтвердження ефективності спектрального аналізу мастильних матеріалів як методу діагностики технічного стану дизельного двигуна внутрішнього згоряння, що дозволяє виявляти інтенсивність і характер зносу деталей, визначати його локалізацію та прогнозувати ресурс роботи двигуна.

У роботі використано сучасні методи спектрального аналізу мастильних матеріалів, що забезпечують високу точність і відтворюваність результатів. Отримані дані зіставлялися з нормативними значеннями та результатами попередніх досліджень, що підтвердило їх достовірність. Виконані експерименти відповідають вимогам методик контролю, що гарантує надійність отриманих висновків.

Запропоновані заходи та рекомендації спрямовані на підвищення ефективності діагностики дизельних двигунів шляхом застосування спектрального аналізу мастила. Практична цінність полягає у можливості своєчасного виявлення початкових стадій зношування деталей без потреби у трудомісткому розбиранні двигуна, що знижує витрати на ремонт і простої техніки. Ефективність методики підтверджується здатністю підвищити точність оцінки технічного стану агрегатів та продовжити їх ресурс за рахунок оптимізації обслуговування.

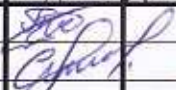


**Ключові слова:** ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ, ДІАГНОСТИКА; МОТОРНЕ МАСЛО; ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ; СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ; ПРОДУКТИ ЗНОСУ; КОНЦЕНТРАЦІЯ; ЗНОШУВАННЯ.

УВАЖАЄМО, 24344 01.12.00

№	Адреса	Адреса
1	1	11
ДНУ МТВАм-24-1		

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ОСНОВИ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ	9
1.1 Технічна діагностика автомобільного транспорту	9
1.2 Основні поняття та визначення	12
1.3 Завдання технічної діагностики	15
1.4 Діагностичні елементи	17
1.5 Системи функціонального та тестового діагностування	20
1.6 Особливості автомобільних дизельних двигунів	26
1.7 Основи діагностики ДВЗ за складом відпрацьованих газів	29
1.8 Діагностика ДВЗ за параметрами картерного масла	31
1.9 Діагностика ДВЗ за герметичністю надпоршневого простору циліндрів	32
2 СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАСЛА	35
2.1 Перспективи використання спектрального аналізу в комплексній оцінці матеріалів	35
2.2 Метод магнітного осадження (феррографічний)	49
3 ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ	57
3.1 Характерні ознаки металевих частинок продуктів зносу при виникненні задирів у двигуні	58
3.2 Характерні риси частинок зносу при перегріванні ДВЗ	59
3.3 Моделі зношування ЦПГ і КШМ дизельного ДВЗ	63

КвРМТВА. 24344.01.12.00								
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Методика діагностики дизельного двигуна на основі спектральних характеристик мастильних матеріалів	Літера	Арквш	Арквшів
Виконав		Пакулько						
Перевір.		Посонський					4	88
Н.контр. Затвер.		Бабак Диха				ХНУ МТВАм-24-1		

3.4 Оцінка особливостей зношування деталей КШМ та ЦПГ	66
3.4.1 Оцінка зношування шийок колінчастого валу	66
3.4.2 Оцінка зношування кілець компресійних	70
4 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ	75
4.1 Оптико-емісійний багатофункціональний спектрометр МФС-12	75
4.2 Програмне забезпечення приладу МФС-12	78
ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
ДОДАТКИ	84

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Транспортна галузь є однією з провідних сфер матеріального виробництва, оскільки забезпечує розвиток економіки та підвищує загальну ефективність виробничих процесів країни. В Україні основна частина вантажо- та пасажироперевезень здійснюється автомобільним і залізничним транспортом [1]. Водночас серйозною проблемою залишається швидке старіння транспортного парку, що безпосередньо впливає на якість перевізного процесу. Тому оновлення та модернізація транспортних засобів мають супроводжуватися вдосконаленням системи технічного обслуговування, а також організацією поточного й капітального ремонту.

Регулярне проведення технічного обслуговування (ТО) є необхідною умовою підтримання працездатності транспортного засобу. Це не лише підвищує безпеку експлуатації, а й дозволяє своєчасно виявляти можливі несправності. У результаті вдається уникнути значних витрат на заміну дорогих агрегатів та комплектуючих. Для транспортних засобів передбачено щоденне обслуговування перед виїздом у рейс, а також планове ТО-1 та ТО-2 з періодичністю, визначеною виробником. Кожний вид обслуговування має свій перелік робіт.

Підвищити ефективність використання тягового рухомого складу можливо шляхом широкого впровадження систем технічної діагностики – як вбудованих, так і стаціонарних чи переносних. Такі системи формують базу даних про стан транспортних засобів та їхніх вузлів, що дає змогу переходити на обслуговування за фактичним технічним станом [1].

Перехід до такої системи ремонту потребує розв'язання ряду завдань, зокрема:

- створення інфраструктури безперервного моніторингу технічного стану обладнання на всіх етапах його життєвого циклу – від виробництва до експлуатації та ремонту;

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- організації спеціального моніторингу для вузлів та агрегатів, які безпосередньо впливають на безпеку руху.

Для реалізації ремонту «за фактом» необхідна достовірна та повна інформація про технічний стан систем і механізмів, яку можна отримати завдяки комплексу діагностичних засобів. Вони мають забезпечувати належну точність і повноту контролю. При цьому варто враховувати, що з розвитком транспорту з'являється нова техніка з невідомими заздалегідь характеристиками надійності, що ускладнює процес організації діагностики та ремонту. Актуальність проблеми зумовлена потребою раціонального використання ресурсів і постійним удосконаленням систем технічного діагностування.

Останнім часом значна увага приділяється методам діагностики без розбирання агрегатів транспортного засобу. Основною перевагою такого підходу є підвищення надійності та зменшення витрат, оскільки не потрібно вносити суттєвих конструктивних змін [1–2].

Серед діагностичних технологій важливе місце займають методи, засновані на аналізі зміни властивостей мастильних матеріалів. Експлуатація двигуна супроводжується як хімічною деградацією мастила, так і його забрудненням внутрішніми й зовнішніми домішками. Ці процеси впливають на роботу механізмів та можуть спричинити відмови.

Для контролю зношування деталей двигуна створено низку приладів, що працюють на основі вимірювання електропровідності мастила залежно від концентрації в ньому продуктів зносу. Інший підхід – визначення кольору й оптичної щільності мастила, що використовується у методі «масляної плями».

Важливим напрямом сучасних досліджень є розробка методів кількісної оцінки зносу деталей. Найбільшого поширення набув непрямий метод, який ґрунтується на визначенні концентрації продуктів зносу в

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мастилі. Його активно застосовують для діагностики великогабаритних дизельних двигунів вантажних автомобілів, локомотивів і суден [3].

Моторне масло є своєрідним «носієм інформації» про технічний стан двигуна внутрішнього згоряння. Дослідження, проведені в різних країнах, довели високу ефективність такого підходу: у 95% випадків передбачені за результатами аналізу несправності підтверджуються під час ремонту. Регулярна діагностика дизельних двигунів на основі аналізу мастила дозволяє знизити експлуатаційні витрати приблизно на чверть.

Метою роботи є обґрунтування та експериментальне підтвердження ефективності спектрального аналізу мастильних матеріалів як методу діагностики технічного стану дизельного двигуна внутрішнього згоряння, що дозволяє виявляти інтенсивність і характер зносу деталей, визначати його локалізацію та прогнозувати ресурс роботи двигуна.

Завдання роботи:

1. Проаналізувати сучасні методи діагностики дизельних двигунів внутрішнього згоряння та визначити їхні переваги й обмеження.
2. Дослідити особливості застосування спектроскопічних і феррографічних методів контролю технічного стану двигунів за складом мастильних матеріалів.
3. Визначити динаміку зміни концентрацій основних хімічних елементів у мастилі в процесі експлуатації двигуна.
4. Оцінити можливість ідентифікації характеру та локалізації зносу за результатами спектрально-феррографічного аналізу.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОСНОВИ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

## 1.1. Технічна діагностика автомобільного транспорту.

Технічна діагностика – це наукова галузь, що вивчає технічний стан об'єктів, особливості його прояву, а також розробляє методи його визначення й принципи організації систем діагностування [2].

Експлуатація автомобільного транспорту в різних сферах господарської діяльності супроводжується значними витратами на підтримання його працездатності протягом усього життєвого циклу. Працездатність транспортних засобів забезпечується виконанням планово-попереджувальних заходів з технічного обслуговування (ТО) і ремонту, а також позапланових робіт, що здійснюються для ліквідації відмов та несправностей, які виникають у міжремонтний період [2].

При застосуванні традиційної планово-попереджувальної системи автомобіль після певного пробігу чи періоду експлуатації обов'язково проходить технічне обслуговування у встановленому обсязі. Попри можливість коригування регламентів ТО залежно від умов експлуатації, індивідуальні особливості конкретного автомобіля при цьому фактично не враховуються.

Однак індивідуальний підхід є вкрай необхідним, адже навіть за однакових умов експлуатації технічний стан кожного автомобіля може суттєво відрізнятись. Це зумовлено якістю виготовлення та складання, особливостями експлуатації, рівнем обслуговування, стилем водіння тощо. У результаті для частини транспортних засобів проведення повного комплексу операцій, передбачених регламентом, виявляється недоцільним. Такі «зайві» роботи не лише збільшують витрати на ТО, а й не покращують технічний стан автомобіля. Більш того, часті втручання у вузли й агрегати можуть

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спричинити прискорене зношування сполучених поверхонь, появу пошкоджень і порушення герметичності з'єднань. Значних матеріальних і трудових витрат також потребують ремонти, викликані несвоєчасним виявленням відмов.

Найповніше використати технічні можливості автомобіля та забезпечити ефективність його роботи в процесі експлуатації можна завдяки впровадженню діагностики технічного стану у процесі технічного обслуговування та ремонту.

Сьогодні розроблено методи й засоби діагностування, які можуть застосовуватись як у складі регламентних робіт, так і як окремий технологічний процес. Використання діагностики дає змогу підвищити коефіцієнт технічної готовності, забезпечити надійність і безвідмовність роботи транспортних засобів, знизити трудомісткість і витрати на їх експлуатацію, а також покращити ремонтпридатність і можливість контролю технічного стану.

Технічне діагностування – це процес визначення стану об'єкта з певною точністю. Його застосування дозволяє:

- продовжити ресурс агрегатів і вузлів за рахунок зменшення кількості розбирань.
- скоротити витрати запасних частин, матеріалів і трудових ресурсів шляхом проведення обслуговування та ремонтів «за потребою» на основі результатів діагностування, яке здебільшого здійснюється планово.
- підвищити надійність автомобілів завдяки своєчасному призначенню робіт з технічного обслуговування чи ремонту та запобігти появі відмов.

Технічне діагностування застосовується у таких випадках [2–3]:

- для встановлення оптимальних режимів виконання робіт з ТО та поточного ремонту з подальшою їх стандартизацією;

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- для прогнозування технічного стану транспортного засобу з метою підготовки виробництва до виконання планових ТО та суміщення їх з поточними ремонтами;

- для визначення потреби у виконанні регулювальних операцій під час проведення регламентних робіт на постах обслуговування;

- для комплексного контролю технічного стану після завершення робіт з обслуговування або ремонту.

Таким чином, технічна діагностика повинна бути інтегрованою у всі етапи експлуатації транспортних засобів – від підготовки до використання і до контролю їх працездатності в процесі роботи.

Відсутність діагностування при перевірці технічного стану негативно впливає на рівень готовності автомобіля. Постановою Кабінету Міністрів України від 9 липня 2008 р. № 607 «Про затвердження Порядку надання суб'єктам господарювання повноважень на проведення перевірки технічного стану колісних транспортних засобів під час державного технічного огляду» закріплено необхідність застосування діагностичного обладнання під час таких перевірок.

Перевірка технічного стану транспортного засобу – це технологічний процес, що передбачає використання спеціальних діагностичних засобів для визначення відповідності транспортного засобу вимогам безпеки дорожнього руху та екологічним нормам. Для цього виробничі приміщення обладнуються спеціальними постами або діагностичними лініями.

Згідно зі статтею 12 Закону України «Про дорожній рух», відповідальні посадові особи повинні забезпечувати справний технічний стан транспортних засобів, дотримання екологічних вимог при їх експлуатації та не допускати виїзду на лінію автомобілів, що не відповідають встановленим стандартам і правилам дорожнього руху.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2 Основні поняття та визначення.

Діагностика – це галузь знань, яка вивчає технічний стан об'єктів, закономірності прояву різних станів та методи їх виявлення, а також принципи побудови й організації систем діагностування. Якщо об'єктами є технічні пристрої, то мова йде про технічну діагностику.

Технічне діагностування – це процес встановлення фактичного технічного стану об'єкта з визначеною точністю [2].

Об'єкт технічного діагностування – технічний засіб, стан якого визначають без повного демонтажу, а лише з частковим розбиранням або зовсім без нього. Це може бути автомобіль у цілому, його система, агрегат чи окремий вузол. Наприклад, безпосереднє вимірювання діаметра шийки колінчастого валу після розбирання не вважається діагностикою, а сам колінчастий вал чи двигун у такому випадку не є об'єктами діагностування. Якщо ж цей параметр визначають опосередковано (наприклад, через вимірювання тиску мастила в системі змащування), тоді об'єктом виступає двигун у зібраному стані.

Технічний стан – сукупність властивостей об'єкта, що змінюються в процесі виготовлення чи експлуатації та характеризуються у певний момент часу показниками, зафіксованими у технічній документації. Стан може бути справним, працездатним, несправним або непрацездатним, залежно від значень контрольованих параметрів. На нього впливають кліматичні умови, процеси старіння, регулювальні роботи, ремонти чи заміни елементів. Оцінка стану здійснюється за діагностичними параметрами без розбирання.

Контроль технічного стану – процедура перевірки відповідності параметрів вимогам технічних норм і визначення на цій основі поточного виду технічного стану.

Параметр технічного стану – фізична величина, що відображає рівень працездатності або справності об'єкта і змінюється під час його роботи.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Діагностичний параметр – величина, яка використовується для встановлення технічного стану. Він може бути:

- прямим, коли характеризує стан безпосередньо (наприклад, зазор, знос);

- непрямим, що визначає стан опосередковано (наприклад, тиск масла).

Структурний параметр – показник, який прямо вказує на працездатність об'єкта (натяг, знос, зазор тощо).

Вимірювання – процес визначення значень фізичних величин експериментальним шляхом із використанням спеціальних технічних засобів.

Прогнозування технічного стану – визначення тенденції зміни параметрів у майбутньому з метою передбачення ресурсу роботи об'єкта.

Достовірність діагностування – ймовірність того, що встановлений технічний стан відповідає реальному.

Залишковий ресурс – відпрацьований час або пробіг від моменту діагностики до досягнення граничного стану.

Безвідмовність – здатність об'єкта працювати без відмов упродовж певного часу.

Працездатність – стан, коли об'єкт виконує свої функції, а його параметри відповідають нормам.

Довговічність – спроможність зберігати працездатність до настання граничного стану при заданій системі техобслуговування та ремонту.

Ремонтопридатність – здатність об'єкта до виявлення причин відмов і усунення їх наслідків під час ремонту та технічного обслуговування.

Контролепридатність – властивість виробу, що забезпечує можливість здійснення контролю стандартними методами.

Технічний діагноз – результат контролю або діагностування.

Тестове діагностування – перевірка із застосуванням тестових дій.

Робоче діагностування – перевірка стану об'єкта при подачі робочих впливів.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Експрес-діагностування – швидка оцінка стану за обмеженою кількістю параметрів у визначений час.

Система технічного діагностування – сукупність засобів, об'єкта та персоналу, що виконує діагностику згідно з технічною документацією.

Засоби технічного діагностування – апаратура та програмні інструменти, які забезпечують процес діагностики.

Автоматична система діагностики – система, що працює повністю без участі оператора.

Автоматизована система діагностики – система, у якій частина функцій виконується автоматично за участі людини.

Алгоритм діагностування – послідовність дій та перевірок, необхідних для встановлення технічного стану. Він може бути:

- 1) із безумовною зупинкою (усі перевірки виконуються повністю);
- 2) з умовною зупинкою (аналіз здійснюється після кожної перевірки).

Діагностичне забезпечення – комплекс методів, правил, алгоритмів та засобів, що дозволяють здійснювати діагностику протягом усього життєвого циклу об'єкта. Його формують ще на стадії проектування, створюючи діагностичну модель.

Діагностична модель – формалізований опис об'єкта, необхідний для визначення методів і параметрів діагностики [2].

Таким чином, діагностика автомобілів вивчає закономірності зміни технічного стану, способи виявлення несправностей і прогнозування ресурсу роботи без повного демонтажу. Вона дозволяє оцінити надійність і ефективність транспортного засобу, підвищити його продуктивність, зменшити витрати на ремонт і обслуговування.

Сучасна діагностика сформувалася на стику різних наук – від інтроскопії та акустики до математичної логіки й гармонійного аналізу. Однак через різноманітність конструкцій транспортних засобів вона поки що

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

не має строгої універсальної системи, що вимагає від фахівця досвіду та інженерної інтуїції.

Діагностування як складова технічного обслуговування є важливим інструментом профілактики та ремонту. Його основна особливість – виявлення несправностей без розбирання агрегатів.

Технологічна пристосованість діагностування до процесів ТО і ремонту визначається його призначенням, глибиною визначення технічного стану та рівнем спеціалізації діагностичних робіт.

### 1.3 Завдання технічної діагностики.

Основні завдання технічної діагностики зводяться до такого [2–4]:

- накопичення інформації, необхідної для прогнозування залишкового ресурсу чи оцінки ймовірності безвідмовної роботи між періодами контролю;
- виявлення несправностей і дефектів, що впливають на працездатність машини;
- перевірка фактичного технічного стану автомобіля або його складових з певною вірогідністю правильності результату.

Головна мета діагностування полягає у визначенні реального стану об'єкта за умов невизначеності при мінімальних витратах матеріальних ресурсів та енергії.

Для чіткого розуміння сфери, яку охоплює технічна діагностика, варто виділити три типи завдань, пов'язаних із визначенням стану об'єктів:

1. Завдання діагнозу – встановлення технічного стану об'єкта на поточний момент часу (від грец. diagnosis – розпізнавання, визначення).
2. Завдання прогноз у– передбачення стану, у якому об'єкт може опинитися в майбутньому (від грец. Prognosis – передбачення).

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Завдання генезису – визначення стану, у якому об’єкт перебував у минулому, з метою з’ясування причин виникнення його поточного стану (від грец. genesis – походження, виникнення).

До завдань технічного прогнозування належить, зокрема, визначення терміну служби об’єкта, розрахунок інтервалів технічного обслуговування чи ремонтів. Їх виконують шляхом аналізу можливих сценаріїв зміни технічного стану, що починаються з теперішнього моменту.

Завдання технічної генетики найчастіше виникають під час розслідування аварій або відмов, коли потрібно з’ясувати, який стан і які події передували настанню несправності. Для цього досліджуються можливі попередні зміни, що призвели до сучасного стану об’єкта.

Таким чином, інформація про технічний стан у теперішньому часі є базовою: вона необхідна і для прогнозування майбутніх змін, і для реконструкції минулих подій. Отже, технічна діагностика виступає фундаментом як для технічного прогнозування, так і для технічної генетики.

У багатьох випадках важливо переконатися, що технічний об’єкт перебуває у справному стані, тобто не має жодних дефектів. Така процедура називається перевіркою справності. Наприклад, на виробничому етапі вона дозволяє виявити можливі помилки складання або наявність бракованих деталей, вузлів чи блоків. Саме перевірка справності лежить в основі роботи відділів технічного контролю на підприємствах. Під час ремонту ця перевірка необхідна для підтвердження того, що всі виявлені несправності були усунуті.

В умовах експлуатації при проведенні технічного обслуговування (як перед використанням автомобіля, так і після нього) нерідко потрібно визначити, чи здатний об’єкт виконувати всі функції відповідно до заданого алгоритму роботи. Така процедура називається перевіркою працездатності. Вона є менш повною за перевірку справності, оскільки не завжди дозволяє

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

виявити дефекти, які не впливають безпосередньо на виконання об'єктом його основних функцій.

Під час роботи технічного засобу важливим є контроль правильності його функціонування, тобто спостереження за тим, щоб не з'явилися несправності, здатні порушити роботу саме в даний момент часу. Такий контроль дає можливість попередити відмови, небажані для нормальної експлуатації. Однак перевірка правильності функціонування є ще менш повною, ніж перевірка працездатності, адже вона лише підтверджує нормальну роботу об'єкта в конкретному режимі. Тобто навіть у разі правильної роботи в поточних умовах в об'єкті можуть бути дефекти, які проявляться в інших режимах.

Таким чином, справний об'єкт завжди буде працездатним і здатним функціонувати правильно. Натомість несправний або неправильно функціонуючий об'єкт завжди буде непрацездатним. Ситуація можлива й зворотна: працездатний об'єкт може мати приховані несправності.

Одним із ключових завдань технічної діагностики є пошук несправностей, тобто визначення їхнього характеру та місця виникнення. Лише після їх усунення об'єкт може знову вважатися справним, працездатним та правильно функціонуючим.

Сукупність справних і несправних станів утворює різні технічні стани об'єкта. Відповідно, перевірка справності, працездатності, правильності функціонування та локалізація несправностей є окремими складовими загального завдання діагностики технічного стану.

#### 1.4 Діагностичні елементи.

Під час проектування автомобіля визначаються основні елементи системи діагностування [2], зокрема:

- критерії контролепридатності автомобіля;

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- види, періодичність та обсяг діагностичних робіт залежно від умов і характеру експлуатації;

- перелік діагностичних параметрів та ознак, що відображають технічний стан автомобіля та допомагають виявляти можливі несправності;

- порядок і методика проведення діагностування;

- номінальні, допустимі й граничні значення контрольованих параметрів, а також залежність їх зміни від напрацювання автомобіля;

- перелік діагностичного обладнання та режими роботи автомобіля і його складових;

- вимоги до точності вимірювань;

- правила дотримання техніки безпеки.

У автотранспортних підприємствах діагностування виконується як перед введенням автомобіля в експлуатацію, так і в процесі його використання, відповідно до інструкцій заводу-виробника та чинних нормативних документів.

Результати обстеження заносяться до діагностичної карти, що містить повну інформацію про автомобіль. Вона охоплює 43 контрольні позиції щодо систем і агрегатів машини, включає рекомендації з ремонту та профілактичного обслуговування. Діагностична карта може виступати як офіційний документ для планування ремонтних заходів, бути підставою для визначення технічного стану та ринкової вартості автомобіля. Крім того, документ містить обов'язкову приписку, яка захищає автосервіс від претензій, пов'язаних із результатами діагностування [2].

За підсумками перевірки приймається рішення про подальшу експлуатацію автомобіля після технічного обслуговування чи про необхідність ремонту. Обсяг робіт при ТО та ремонті визначається саме на основі діагностики.

Головним нормативним документом, що регламентує проведення технічного діагностування під час експлуатації та ремонту автомобіля, є

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

«Інструкція з експлуатації» або «Інструкція з технічного обслуговування автомобілів і машин».

У практиці АТП застосовуються такі види діагностування рухомого складу [6]:

- Д-1 – загальна діагностика, яка виконується з періодичністю ТО-1 і спрямована переважно на контроль вузлів, що забезпечують безпеку руху;

- Д-2 – поглиблена діагностика, яку проводять за 1–2 дні до ТО-2. Вона дозволяє визначити потребу в ремонті агрегатів, а також з'ясувати причини зниження потужності двигуна чи погіршення економічних показників.

Д-1 також застосовується після ТО-2 і поточного ремонту для остаточної перевірки стану механізмів, а Д-2 – для визначення потреби у капітальному ремонті та контролю якості його виконання.

Технологічні процеси ТО-1, ТО-2 та поточного ремонту взаємопов'язані з діагностикою Д-1 і Д-2, що схематично показано на рис. 1.1, а, б. Усі виробничі потоки можуть проходити через зону очікування, хоча можливі і прямі переміщення між ділянками діагностики, ТО та ремонту.

Технічний стан об'єкта визначається за допомогою контрольно-діагностичного обладнання. Результатом цього процесу є технічний діагноз. Під системою діагнозу розуміють взаємодію між об'єктом контролю та діагностичними засобами. Вона реалізується шляхом багаторазової подачі вхідних впливів на об'єкт і аналізу його відповідних реакцій. Такі дії можуть формуватися як контрольно-діагностичними засобами, так і зовнішніми сигналами, що визначаються алгоритмом роботи об'єкта.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

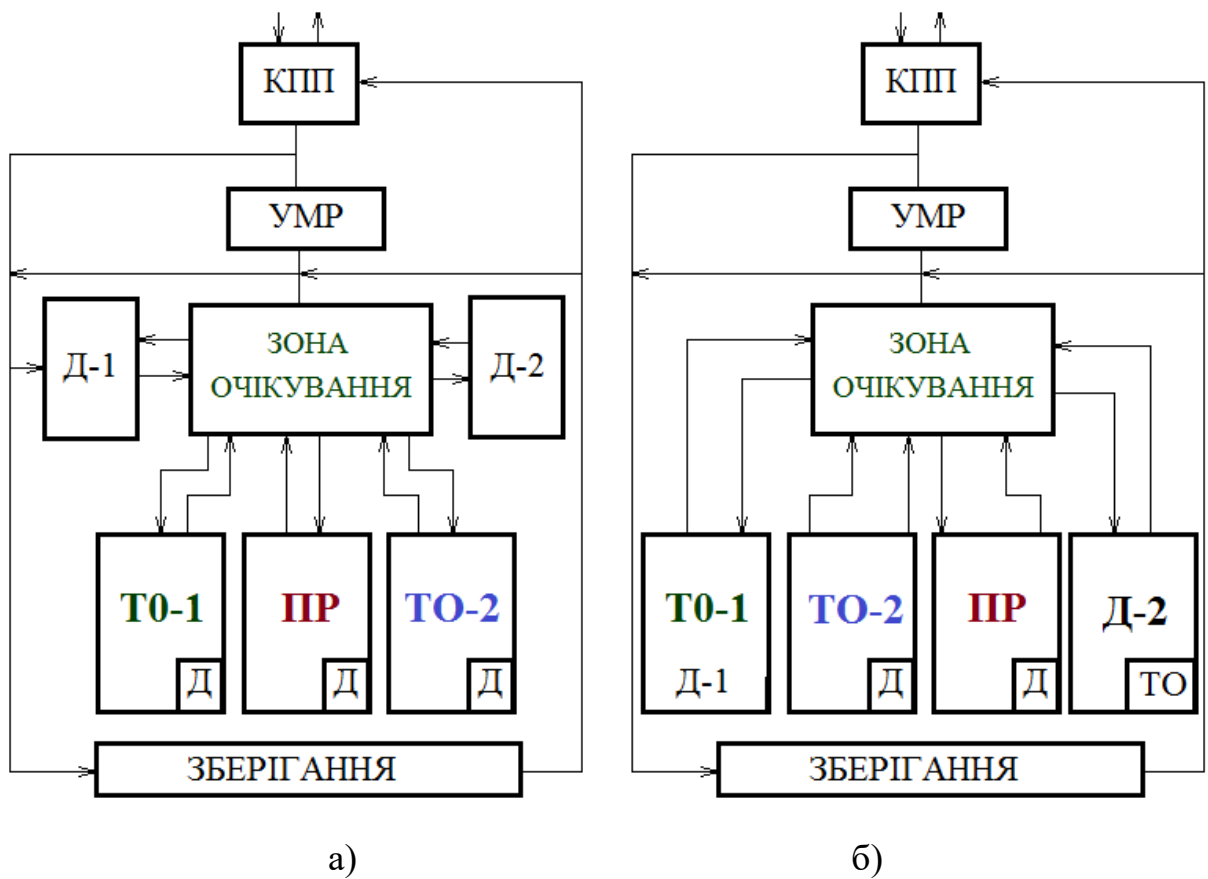


Рисунок 1.1 – Загальний технологічний процес АТП:  
 а) – роздільне розміщення, б) – сполучене розміщенні Д-1.

### 1.5 Системи функціонального та тестового діагностування.

Залежно від способу впливу на об'єкт розрізняють системи функціонального і тестового діагностування. Їхні узагальнені схеми наведені на рис. 1.2.

У функціональних системах діагностики дії, що подаються на основні входи об'єкта, визначаються його штатним алгоритмом роботи (рис. 1.2, а). Такі впливи називають робочими, оскільки вони забезпечують контроль технічного стану автомобіля безпосередньо під час експлуатації. Подібні системи застосовуються для оцінки правильності функціонування та виявлення відмов у ключових агрегатах, вузлах і системах автомобіля. Їх

можна використовувати як у реальних умовах роботи машини, так і в режимі імітації, наприклад, при ремонті чи налагодженні обладнання.

Найбільшого поширення функціональні системи діагностики набули саме під час штатної експлуатації. Так, водій сучасного автомобіля отримує від системи індикацію про тиск мастила в магістралі двигуна, температуру охолоджувальної рідини, стан показчиків повороту та блокування міжосьового диференціала, падіння тиску в контурах пневматичного гальмівного приводу, рівень пального в баках, оберти колінчастого вала, тиск повітря у гальмівних системах та інші параметри. Ці дані дозволяють оперативно реагувати на відхилення в роботі: своєчасно замінювати несправні вузли, переходити на інший режим функціонування чи виконувати нескладні регулювання. Завдяки цьому забезпечується продовження виконання завдань перевезення та підвищується ефективність використання автомобіля. Крім того, наявна інформація допомагає водію застосовувати свій практичний досвід для прийняття оптимальних рішень щодо управління технічним станом транспортного засобу.

Подальший розвиток функціональних систем діагностики передбачає надання оператору більш розширеної інформації про ключові експлуатаційні характеристики автомобіля: паливну економічність, динамічні та гальмівні властивості, а також рівень екологічного впливу. Однією з головних вимог до таких систем є можливість корегування режимів руху задля підвищення економічності пального при одночасному забезпеченні безпеки транспортного процесу.

У системах тестового діагностування дії на об'єкт подаються не за його робочим алгоритмом, а від спеціальних контрольно-діагностичних засобів (рис. 1.2, б) [5–7]. Послідовність і склад тестових впливів добирають так, щоб процес діагностування був максимально ефективним. У результаті тестового контролю вирішуються завдання перевірки працездатності, пошуку несправностей та оцінки технічного стану окремих вузлів.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тестові системи зазвичай застосовуються тоді, коли автомобіль не використовується за прямим призначенням. Водночас можливе їх використання і під час роботи об'єкта, але за умови, що тестові дії не заважають його нормальному функціонуванню.



Рисунок 1.2 – Системи діагнозу технічного стану ТЗ.

Процес технічного діагностування доцільно поділяти на найменші технологічно неподільні етапи, кожен з яких включає певний тестовий або робочий вплив та аналіз відповідної реакції об'єкта. Такі етапи називають елементарними перевітками. Сукупність послідовно виконаних елементарних перевірок утворює діагностичний тест.

Результати діагностування можуть фіксуватися як з основних виходів системи, які використовуються під час її штатної роботи, так і з додаткових, спеціально створених для контролю. Такі виходи отримали назву контрольних точок. Параметри, виміряні у цих точках, є діагностичними параметрами. У межах одного контрольованого виходу може визначатися кілька характеристик. Наприклад, при оцінюванні гармонійного сигналу зазвичай одночасно вимірюють його амплітуду та частоту.

Технічна діагностика тісно взаємопов'язана з теорією інформації та методами кодування. Основними поняттями тут є дані, повідомлення та інформація. Даними вважають усі відомості, отримані з навколишнього середовища та подані у зручному для опрацювання вигляді (цифрами, символами, літерами тощо) – наприклад, покази індикаторів температури,

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тиску або частоти обертання. Дані, що підлягають передачі, утворюють повідомлення. Повідомлення ж набуває статусу інформації лише тоді, коли використовується для прийняття рішення, тобто тоді, коли воно несе новизну для оператора.

Приклад. Якщо температура охолоджувальної рідини двигуна становить 40 °С і цей показник тривалий час залишається незмінним, то це повідомлення не несе діагностичної інформації. Але якщо відомо, що така температура є нетиповою для зимового періоду під час прогрівання двигуна, це вже може свідчити про несправність термостата і, відповідно, вважатися інформацією.

Для технічної обробки повідомлення переводять у сигнал – матеріальну форму подання відомостей. Сигнали можуть бути акустичними, електричними, оптичними, гідравлічними та іншими. Вони здатні перетворюватися з одного виду в інший (наприклад, електричний у звуковий). Основними характеристиками сигналів є тривалість, ширина спектра частот і динамічний діапазон.

Організація діагностування потребує джерел тестових впливів, вимірювальних приладів і пристроїв для з'єднання їх з об'єктом. Для управління процесом контролю та аналізу реакцій об'єкта застосовують електронно-обчислювальні засоби. У сучасних системах цю функцію найчастіше виконують мікропроцесори.

За умов значного обсягу діагностичних операцій (наприклад, у спеціалізованих сервісних центрах) процеси тестового контролю зазвичай організовуються під керуванням персональних ЕОМ. Типова структура такої системи наведена на рис. 1.3.

Оскільки діагностування автотранспортних засобів передбачає обробку великої кількості інформації, прийняття рішень (розпізнавання стану) часто виконується із залученням ЕОМ. Послідовність дій при такому розпізнаванні становить алгоритм діагностування. Він охоплює оцінювання обраних

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

параметрів, перевірку окремих конструктивних елементів або блоків, визначення їх працездатності та виявлення дефектів, а також обробку та інтерпретацію отриманих результатів.

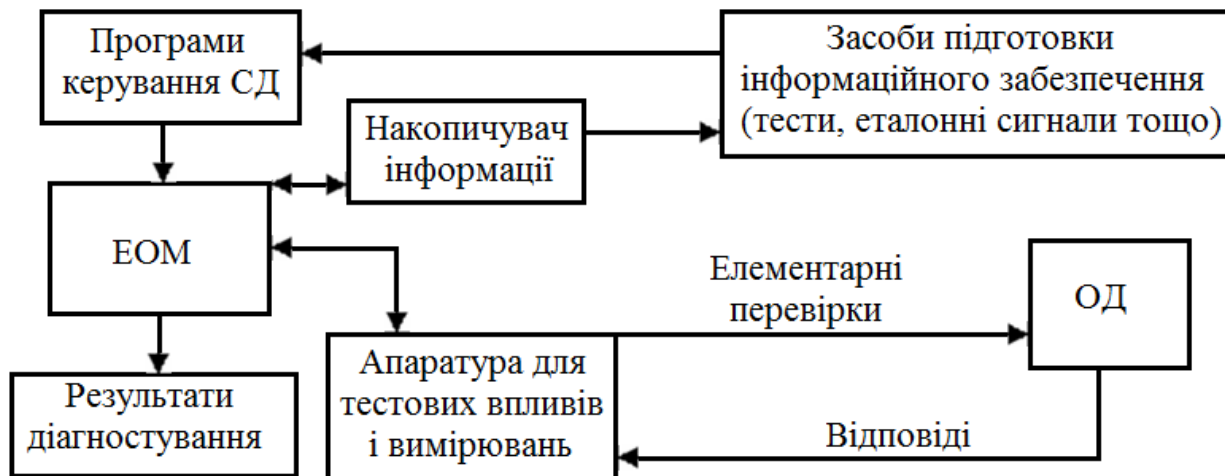


Рисунок 1.3 – Комп'ютеризована система діагностування ТЗ.

Алгоритми діагностування об'єднують у програму діагностування, яка передбачає оцінку сукупності параметрів, що відображають технічний стан об'єкта протягом певного періоду експлуатації. Оскільки складні технічні системи, зокрема автотранспортні засоби (АТЗ), складаються з багатьох різномірних вузлів і блоків, кожен з яких потребує контролю у різний час, програма діагностування повинна враховувати інтервали перевірок для кожної структурної одиниці.

Діагностування включає впорядковану послідовність контрольних дій. При цьому поняття «контроль» є ширшим, ніж «діагностика». Діагностика може розглядатися як один із різновидів контролю, однак не всі контрольні дії є діагностичними. Наприклад, вимірювання тиску в шинах належить до контрольних операцій; спостереження за показами датчика температури охолоджувальної рідини – це контрольна дія; а ось виявлення факту

підвищеної температури та висновок про можливу несправність вже є діагностикою.

Основним завданням систем діагностування є визначення справності, працездатності, правильності функціонування об'єкта та пошук можливих дефектів. Такі системи поділяють:

- за рівнем автоматизації – автоматичні, автоматизовані та ручні;
- за обсягом охоплення об'єкта – на локальні та загальні;
- за застосованими засобами – з універсальними або спеціалізованими, вбудованими чи зовнішніми пристроями;
- за способом взаємодії із системою – на функціональні та тестові (часто використовуються спільно).

Проектування системи діагностування передбачає виконання ряду завдань: проведення техніко-економічного аналізу для вибору типу системи та її призначення; дослідження фізичних процесів, що протікають у діагностованому об'єкті, з метою виявлення причин виникнення несправностей та їх ознак; збір і узагальнення даних про типові пошкодження аналогічних виробів; вибір оптимального методу діагностування; створення моделі об'єкта; формування алгоритму діагностування; розроблення конструктивних вимог до об'єкта для забезпечення його контрольованості; підготовку технічної документації; вибір та розроблення засобів діагностики й пристроїв для їхнього підключення; а також підготовку експлуатаційних і ремонтних інструкцій та проведення випробувань системи.

Для кожної сфери застосування системи діагностування визначаються такі характеристики, як глибина пошуку дефектів, достовірність встановлення діагнозу, а також ураховуються надійність виробу, відмова якого може становити небезпеку для людини, його ремонтпридатність, вартість і трудомісткість проведення діагностичних операцій.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.6 Особливості автомобільних дизельних двигунів.

Дизельний двигун – це різновид поршневого двигуна внутрішнього згоряння, що працює на дизельному паливі. Його головна відмінність від бензинового полягає у способі утворення паливо-повітряної суміші та механізмі займання. У бензиновому двигуні пальне змішується з повітрям до потрапляння в циліндр, а згодом суміш запалюється свічкою. У дизельному ж двигуні в циліндр спочатку надходить лише повітря, яке при стисканні нагрівається до температури самозаймання пального (приблизно 700–800 °С). У цей момент форсунки під високим тиском впорскують пальне безпосередньо в камеру згоряння.

Принцип роботи дизельних двигунів ґрунтується на циклі Дизеля або ж на комбінованому циклі Трінклера–Сабате. Порівняно з циклом Отто, що використовується у бензинових моторах, вони забезпечують вищий коефіцієнт корисної дії. Завдяки цьому дизельні агрегати спочатку знайшли застосування у вантажному транспорті, а згодом поширилися й серед легкових авто. Сьогодні в Європі значна частка нових автомобілів (понад 50 %) обладнана дизельними двигунами [6].

Однією з конструктивних особливостей дизельних моторів є відсутність системи запалювання, зокрема свічок. Це робить конструкцію простішою і підвищує надійність. Водночас паливна система ускладнюється, адже потребує роботи під високим тиском і надзвичайно точної дозованої подачі пального.

Дизельні двигуни поділяють за конструкцією камери згоряння. У моторах з нерозділеною камерою згоряння (безпосереднє упорскування) пальне подається прямо у простір над поршнем, де камера формується в самому поршні. Такий принцип застосовується переважно у низько обертових двигунах великого робочого об'єму, хоча він має недоліки у

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вигляді підвищеного рівня шуму та вібрацій, а також складності процесу горіння.

Завдяки використанню паливних насосів високого тиску з електронним керуванням, системи двоступеневого впорскування пального та вдосконаленню процесу згорання вдалося забезпечити стабільну роботу дизелів із нерозділеною камерою згорання на частотах обертання до 4500 об/хв, підвищити економічність, а також знизити рівень шуму й вібрацій.

Водночас найбільше поширення отримали двигуни з розділеною камерою згорання. У них подача палива здійснюється не безпосередньо в циліндр, а в допоміжну камеру. Найчастіше використовується вихрова камера, розташована в головці блоку циліндрів і з'єднана з циліндром каналом [9]. Завдяки такій конструкції повітря при стисканні спрямовується у вихрову камеру, де закручується, що покращує процес утворення паливо-повітряної суміші та її займання. Спалах відбувається спершу у вихровій камері, а потім поширюється на основний об'єм камери згорання.

Застосування розділених камер згорання дозволяє знизити швидкість наростання тиску в циліндрі, що позитивно впливає на зменшення шумності роботи та дає змогу досягати вищих обертів двигунами. Саме тому цей тип камер використовується в більшості сучасних автомобільних дизелів (рис. 1.4). У легкових авто вони встановлюються найчастіше, оскільки забезпечують хорошу швидкохідність і робочий діапазон обертів у межах 4000–5000 об/хв.

Особливої уваги заслуговує принцип роботи вихрових камер. На такті впуску, на відміну від бензинових двигунів, камера згорання наповнюється лише повітрям, без паливної суміші. Під час такту стискання відбувається ще одна відмінність: ступінь стискання у дизельних двигунах значно вища й може сягати 20–22.

Коли поршень рухається до верхньої мертвої точки, він майже щільно наближається до головки блоку циліндрів, витісняючи 40–60 % повітря у

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вихрової камери. Через спеціальний канал це повітря потрапляє у камеру та набуває обертального руху. У ній розташовані свічка розжарювання і форсунка, яка подає відміряну порцію палива приблизно за  $5-10^\circ$  до досягнення поршнем ВМТ.

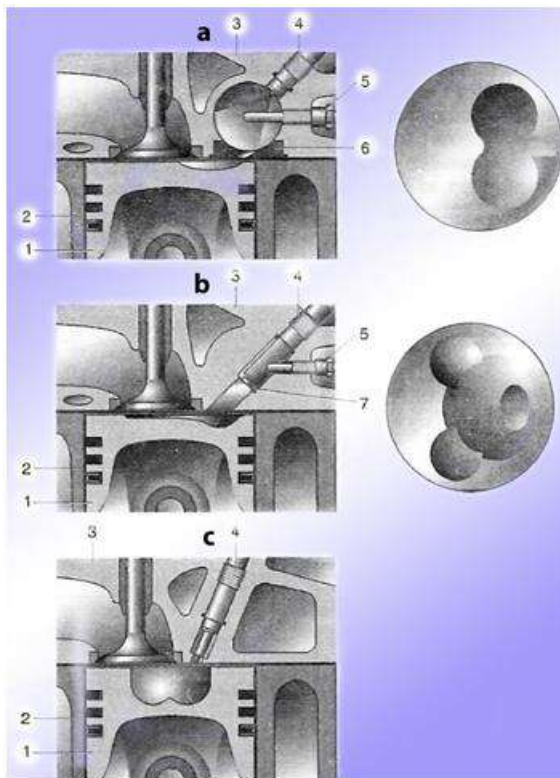


Рисунок 1.4 – Камери згоряння дизельних двигунів:

а – віхреподібна; б – перед камерна; в – з безпосереднім впорскуванням палива; 1 – поршень; 2 – блок (гільза) циліндрів; 3 – головка; 4 – форсунка; 5 – свічка розжарювання; 6 – кришка форкамери; 7 - передкамера

Оскільки ступінь стиску у дизельному двигуні значно вищий, ніж у бензинового, тиск упорскування палива має перевищувати тиск у циліндрі, створюваний поршнем. Тому робочий тиск на виході з форсунки сягає 12–15 МПа (120–150 атм). Нагріте під час стискання повітря завдяки формі вихрової камери добре перемішується з паливом, що упорскується, і суміш самозаймається. Для полегшення пуску двигуна свічка розжарювання нагрівається електричним струмом до температури близько  $800^\circ\text{C}$ , а під час роботи підтримує температуру завдяки продуктам згоряння.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Процес горіння в дизелі відрізняється від бензинового і проходить у кілька етапів. У вихровій камері займання відбувається при коефіцієнті надлишку повітря близькому до 1 ( $\epsilon=1$ ). Далі горіння переходить у простір над поршнем, де вміст повітря значно вищий. Завдяки цьому дизель здатний працювати на дуже збіднених сумішах ( $\epsilon=3-4$ ), що знижує витрату пального.

На відміну від бензинових моторів, у дизелях керування обертами не потребує дросельної заслінки — достатньо регулювати подачу палива.

Окремим різновидом двигунів з розділеною камерою є передкамерні дизелі. Вони не мають високої літрової потужності, проте забезпечують кращу економічність завдяки широким межах регулювання складу суміші.

Сучасні легкові авто дедалі частіше оснащуються дизельними двигунами з безпосереднім упорскуванням палива. У таких моторах немає окремої камери згорання: паливо впорскується безпосередньо у простір над поршнем. Сам поршень має заглиблення у днищі, куди і надходить паливо. Тиск упорскування тут значно вищий — до 35 МПа (350 атм). Основна перевага цієї схеми — підвищена економічність і вищий крутний момент.

Характерною особливістю дизельних двигунів є їхній шум. Це пов'язано з підвищеним тиском і навантаженням на деталі. Найбільш відчутний «стукіт» дизеля на холостих обертах, а зі збільшенням частоти обертання він зменшується. Чим більше випередження упорскування, тим вищим є тиск згорання і, відповідно, інтенсивність шуму (так звана жорсткість роботи двигуна).

### 1.7 Основи діагностики ДВЗ за складом відпрацьованих газів.

Не зупинятимемося детально на екологічних наслідках вихлопів, адже зрозуміло, що чим менші шкідливі викиди, тим безпечніше для довкілля та здоров'я людини. Однак для самого автомобіля ситуація інша: надмірне обмеження викидів може негативно впливати на його динаміку. При цьому

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залежність між потужністю двигуна і рівнем токсичності вихлопу не є прямолінійною.

Для контролю технічного стану силового агрегату використовується чотирьохкомпонентний газоаналізатор, який дозволяє визначити вміст основних складових відпрацьованих газів [8]:

- Вуглеводні (СН, ppm) – залишки незгорілого палива. Їхня підвищена концентрація свідчить про надмірно збагачену суміш, потрапляння масла в камеру згорання через зношення циліндро-поршневої групи або про несправності системи запалювання (пропуски займання).

- Кисень (O<sub>2</sub>, %) – залишковий кисень у вихлопі. Оптимальним є мінімальний його вміст (приблизно 0,5 %), що свідчить про повноцінне згорання. Підвищені показники вказують на надто бідну суміш та зниження ефективності процесу.

- Оксид вуглецю (СО, %) – продукт неповного згорання палива. Його підвищення може бути наслідком забрудненого повітряного фільтра, завищеного тиску подачі палива чи інших факторів, що формують збагачену суміш.

- Діоксид вуглецю (СО<sub>2</sub> %) – утворюється в результаті повного окиснення вуглецю. Високий вміст СО<sub>2</sub> (понад 12 %) вважається показником ефективного процесу згорання. Низькі значення сигналізують про несправності, пов'язані як із бідною, так і з багатою сумішшю.

Нормативні значення цих параметрів залежать від конкретної моделі автомобіля, тому найбільш коректно орієнтуватися на технічну документацію виробника. Загалом умовно розрізняють два випадки – двигуни з каталізатором і без нього (табл. 1.1).

Надмірна кількість вуглеводнів у складі вихлопу зазвичай свідчить про пропуски займання, коли паливо не згорає повністю й потрапляє у вихлопну систему. Основними причинами цього можуть бути:

- пошкодження або деградація високовольтних проводів;

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- забруднені свічки запалювання;
- неправильне встановлення кута випередження запалювання;
- несправність котушки чи модуля запалювання.

Таблиця 1.1 – Рекомендовані показники складових відпрацьованих газів [8].

Елемент	Розмірність	Наявність каталізатора	
		Без	З
Вуглеводні	ppm	не більше 300	менше 50
Діоксид вуглецю	%	12 і більше	12 і більше
Кисень	%	0...2	0...2
Оксид вуглецю	%	1...2	0,3...0,5

Ще однією причиною підвищеного вмісту вуглеводнів у вихлопних газах може бути надто збіднена паливо повітряна суміш, яка погано запалюється. У такому випадку слід перевіряти вузли, що впливають на її склад: можливий підсос повітря, недостатній тиск паливного насоса, забруднення форсунок, а також несправності датчиків температури двигуна чи витрати повітря.

### 1.8 Діагностика ДВЗ за параметрами картерного масла.

Оцінка технічного стану двигуна за характеристиками моторного масла дозволяє встановити інтенсивність зношування його деталей, працездатність системи фільтрації, герметичність охолоджувального контуру, а також визначити залишковий ресурс самого мастила. Принцип методу полягає в тому, що при нормальному функціонуванні силового агрегату концентрація

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

продуктів зношування в оливі залишається відносно стабільною, тоді як у разі виникнення несправностей вона різко зростає.

Діагностику здійснюють шляхом порівняння результатів аналізу проби мастила (за умови справної роботи масляних і повітряних фільтрів, а також відсутності ознак деградації оливи) із граничними нормативами та попередніми вимірюваннями. Так, перевищення допустимого вмісту металів свідчить про підвищене зношування спряжених деталей, надлишок кремнію вказує на порушення роботи системи охолодження, а зменшення в'язкості сигналізує про втрату експлуатаційних властивостей масла.

Для визначення концентрації продуктів зношування застосовують спектральний аналіз. Проба масла спалюється у високотемпературному полум'ї дугового розряду, а випромінювання аналізується за допомогою високочутливого спектрографа автоматизованої фотоелектричної системи. Пари металів, що потрапили в оливу внаслідок зношування, формують характерний лінійчастий спектр, який піддається подальшому кількісному та якісному аналізу. При якісному аналізі фіксують наявність спектральних ліній, що відповідають конкретним елементам, а при кількісному – вимірюють інтенсивність їх почорніння. Щільність спектральних ліній визначається мікрофотометром, після чого результати перераховуються в абсолютні концентрації з використанням тарувальних графіків [9].

1.9 Діагностика ДВЗ за герметичністю надпоршневого простору циліндрів.

Перевірка герметичності циліндрів виконується за допомогою кількох методів: вимірювання компресії, визначення витoku стисненого повітря, контролю прориву газів у картер, а також оцінки витрати моторного масла.

Діагностика за компресією. Тиск газів у циліндрі наприкінці такту стискання (компресія) залежить від технічного стану циліндропоршневої

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

групи, в'язкісних характеристик масла, частоти обертання колінчастого вала, а також герметичності клапанного механізму. Для вимірювання компресії застосовують компресометри або компресографи (реєструючі манометри).

Перед проведенням випробування двигун прогрівають до робочої температури охолоджувальної рідини (80...90 °С), після чого зупиняють. Дросельна та повітряна заслінки відкриваються повністю, а високовольтні дроти від'єднують від свічок запалювання [9]. Після очищення та продування стисненим повітрям заглиблень біля свічкових отворів свічки викручують. У різьбовий отвір одного з циліндрів встановлюють гумовий наконечник компресометра (для бензинових двигунів – у місце свічки, для дизельних – у отвір форсунки). Потім колінчастий вал прокручують стартером на 10–12 обертів, після чого значення тиску знімають зі шкали манометра.

Після вимірювання стрілку манометра повертають у нульове положення, натискаючи на стрижень золотника приладу, і аналогічним чином перевіряють тиск у решті циліндрів (рис. 1.5).

Для отримання об'єктивних результатів перевірку компресії виконують кілька разів. Допустима різниця показників у різних циліндрах не повинна перевищувати 0,1 МПа для бензинових (карбюраторних) двигунів та 0,2 МПа для дизельних. Конкретні мінімальні значення компресії встановлюються виробниками двигунів і зазначаються в експлуатаційній документації. Наприклад, для двигуна КРАЗ тиск у циліндрі наприкінці такту стискання має бути не менше ніж 0,7 МПа; для дизелів MERSRDES – близько 3 МПа.

Разом із тим метод вимірювання компресії має певні обмеження:

- за допомогою цього методу неможливо точно встановити причину зниження компресії, а лише зафіксувати сам факт її наявності;
- під час багаторазового прокручування колінчастого вала відбувається значний розряд акумуляторної батареї;

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

- показники різних компресометрів можуть відрізнятися через неможливість забезпечити однакову частоту обертання стартера на різних двигунах.

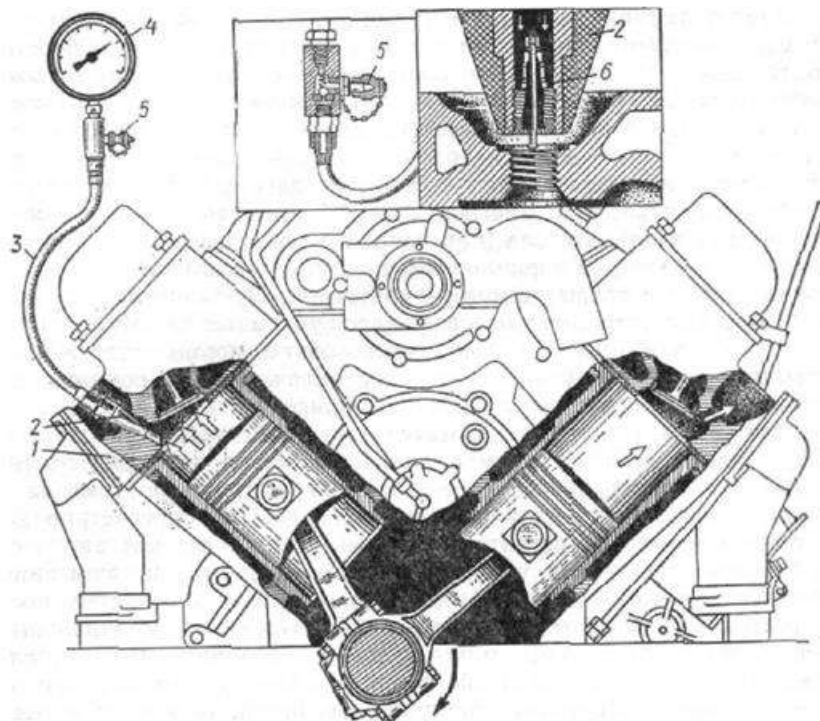


Рисунок 1.5 – Схема перевірки компресії:

1 - головка циліндрів; 2 - гумовий наконечник; 3 - шланг; 4 - манометр;  
5 - клапан випуску повітря; 6 - золотник

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

## 2. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАСЛА

### 2.1 Перспективи використання спектрального аналізу в комплексній оцінці матеріалів

Сучасне машинобудування та транспортна галузь висувають високі вимоги до якості продукції, оскільки саме цей показник визначає її конкурентоспроможність на ринку. Для забезпечення стабільних експлуатаційних характеристик активно застосовуються системи управління якістю, важливим елементом яких є автоматизовані комплекси вимірювання та контролю.

Одним із провідних напрямів розвитку цих систем є удосконалення методів спектрального аналізу, що дає змогу підвищити точність оцінки якості матеріалів і готових виробів. Цього досягають завдяки застосуванню сучасних методик математичної обробки результатів, алгоритмів і програмного забезпечення, інтегрованого в автоматизовані системи контролю.

Спектральний (емісійний) аналіз є фізичним методом якісного та кількісного визначення складу речовин шляхом вивчення їх спектрів. Серед його переваг – відносна простота виконання, швидкість отримання результатів, мінімальна підготовка проб, а також незначна кількість матеріалу (10–30 мг), необхідного для одночасного визначення багатьох елементів [11-12]. Для отримання спектрів речовину переводять у пароподібний стан і збуджують атоми елементів нагріванням до 1000–10000 °С. Як джерела збудження застосовують іскру або дугу змінного струму (для твердих провідних матеріалів) чи полум'я газових пальників (для розчинів). Якісний і напівкількісний аналіз полягає у виявленні характерних спектральних ліній та оцінюванні їх інтенсивності, тоді як кількісний – у

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

встановленні залежності між інтенсивністю ліній і концентрацією елементів у пробі.

У процесі роботи двигуна внутрішнього згоряння мастило взаємодіє з поверхнями тертя, продуктами згоряння палива та активними хімічними сполуками. Через це відбувається нерівномірне зношування окремих деталей: одні елементи піддаються швидкому руйнуванню, інші служать значно довше. Традиційний контроль стану деталей здійснюється під час профілактичних оглядів і ремонтів, що не лише знижує ефективність експлуатації, але й суттєво підвищує вартість обслуговування. Тому особливу цінність мають методи діагностування технічного стану двигуна без його розбирання.

Зношування спричиняє накопичення у мастилi металевих домішок, таких як залізо, мідь, свинець, олово. Зміна їх концентрації свідчить не лише про інтенсивність зношування, а й про стан конкретних пар тертя. Наприклад, критичний стан двигуна можна визначити за концентрацією у мастилi понад 150–200 г/т Fe та 60–100 г/т Cu. Раніше ці показники встановлювали звичайними методами хімічного аналізу, які потребували значних витрат часу й ресурсів, що обмежувало їхню практичність.

Спектральний аналіз, на відміну від хімічних методів, відзначається високою чутливістю та універсальністю. Він широко використовується у хімії, металургії, машинобудуванні, астрофізиці та геохімії. Його традиційним завданням є визначення елементного складу матеріалів, при цьому кількісні результати базуються на градуйованих графіках, побудованих за даними державних стандартних зразків (ДСЗ). Однак варто враховувати, що структурні відмінності між еталонними зразками і досліджуваними пробами можуть спричиняти додаткові похибки вимірювань, що потребує вдосконалення методичного забезпечення.

Метою проведених досліджень було мінімізувати похибки, що виникають у процесі спектрального аналізу, та створити узагальнену

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методику контролю, яка дозволяє одночасно оцінювати як елементний склад, так і структурні та фізико-механічні характеристики металів і сплавів.

Запропонована фізична модель аналізу базується на використанні багато параметричних залежностей між інтенсивністю випромінювання спектральних ліній та вмістом елементів. Це дало змогу визначати концентрацію складових і розраховувати похибки, застосовуючи лише один еталонний зразок у широкому діапазоні спектральних вимірювань. Для підвищення точності результатів було введено поняття «віртуальних зразків» (ВЗ), що дозволяє коригувати розраховані похибки.

Розроблені алгоритми та методики, у поєднанні з сучасними реєстраційними системами, стали основою модернізованих комплексів контролю. Це дало змогу розширити можливості традиційних приладів спектрального аналізу та підвищити їх функціональність у промисловому застосуванні.

Експериментальні дані були отримані із застосуванням вдосконаленої фотоелектричної системи МФС-8. Для реєстрації спектральних ліній використовувався блок із сенсорами зарядового зв'язку типу ILX511 (Sony). Визначення концентрації елементів та обчислення похибок здійснювалося на основі одного стандартного зразка. У таблиці 2.1 наведено результати хімічного аналізу бронзи марки ОСН 10-2-3. Як контрольний зразок (КЗ) використовувався еталон № 952 [13].

На рисунку 2.1 наведено побудовані градуювальні криві залежності  $X(HV)=f(Y_{cp})$  для досліджуваних зразків із використанням методу еталона контрольного.

Подальший розвиток досліджень пов'язаний із створенням методик та алгоритмів вхідного контролю матеріалів і промислових виробів. На початковому етапі проводиться якісний аналіз, після чого вирішується задача ідентифікації марки невідомого матеріалу. Для цього дані з бази еталонів

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

комп'ютерної системи зіставляються з енергетичними характеристиками досліджуваної проби.

Таблиця 2.1 - Виміряні параметри і результат випробування хімічного складу стандартних зразків/

СЗ	Fe		Pb		Sn	
	$P_x - P_{xcp}$	$C \pm \Delta C$	$P_x - P_{xcp}$	$C \pm \Delta C$	$P_x - P_{xcp}$	$C \pm \Delta C$
52	2,8-44,8	0,12	50,0-56,3	2,13	0,0-56,3	9,1
53	30,5-41,3	$0,270 \pm 0,009$	36,0-52,5	$2,800 \pm 0,015$	89,5-52,5	$9,89 \pm 0,29$
54	46,5-41,5	$0,330 \pm 0,012$	36,0-50,3	$2,860 \pm 0,017$	90,5-50,3	$9,70 \pm 0,30$
55	73,3-39,8	$0,710 \pm 0,015$	35,5-44,3	$3,110 \pm 0,016$	91,5-44,3	$10,1 \pm 0,30$

$P_x$  - відображення інтенсивності спектральної лінії елементу;

$P_{xcp}$  - відображення інтенсивності спектральної лінії порівняння (Cu);

$C \pm \Delta C$  - кількісний вміст і похибка визначення.

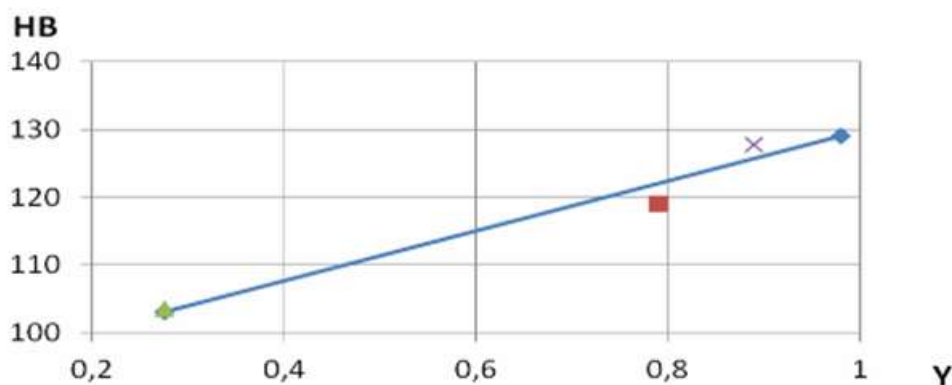


Рисунок 2.1 – Залежність НВ ( $\gamma_{cp}$ ) для сплаву бронзи ОСН 10-2-3

Під час кількісного аналізу розраховується вміст окремих елементів у відсотках та визначаються похибки за допомогою рівнянь спектральної моделі. Для цього була розроблена структурна схема системи вхідного контролю.

З технічної та економічної точок зору найбільш раціональними є підходи, що забезпечують комплексне дослідження контрольованих параметрів, які формують сукупні властивості матеріалів. Однак більшість існуючих методів дозволяє оцінювати лише окремі характеристики. Для визначення повного комплексу фізико-механічних параметрів зазвичай застосовують серію незалежних випробувань на обладнанні руйнівного типу. Спектральний аналіз при цьому традиційно використовується тільки для визначення елементного складу.

З метою розширення можливостей комплексної оцінки елементи досліджуваної проби та еталону розглядаються як єдина енергетична система. Кожному рівню енергії відповідає власний набір рівнянь, що описують його стан. Перехід між енергетичними рівнями здійснюється за розробленим алгоритмом. При цьому відкриті (експериментально виміряні) енергетичні системи переводяться спочатку у замкнуті (ЗС), далі у рівноважні (РІС), а потім у нерівноважні ізольовані стани (НІС).

Застосування критеріїв відповідності між різними енергетичними системами у поєднанні з фізичною моделлю аналізу вперше дало змогу виокремити структурні та кількісні складові вхідного сигналу та сформувати незалежні методики контролю.

Згідно з розробленими методиками, кількісний аналіз елементного складу здійснюється у рівноважному ізольованому стані (РІС) шляхом розрахунку скоригованих значень інтенсивності [12]:

$$\Delta P_X = P_X - P_{XCP}, \quad (2.1)$$

де  $P_X$  – інтенсивність спектральної лінії досліджуваного елемента;

$P_{XCP}$  – інтенсивність відносно лінії порівняння.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перехід від нерівноважного ізольованого стану (НІС) до рівноважного (РІС) на заключних етапах визначається різницею між інтенсивністю лінії, зафіксованої у пробі, та аналогічною лінією  $P_{CPE}$  в еталоні. Така різниця відображає зміни механічних властивостей  $M_X$  досліджуваного зразка відносно стандарту.

На основі рівнянь моделі було отримано структурно-енергетичний параметр кутового зміщення елемента проби щодо еталона, який розраховується через додатковий параметр, що описує перехід системи від відкритого стану до ізольованого.

Ефективність і достовірність запропонованих підходів перевіряли під час досліджень різних сплавів міді, алюмінію та заліза. У випробуваннях використовувалися державні стандартні зразки, а також СЗ, що піддавалися додатковій термічній обробці з метою зміни їхніх структурних та фізико-механічних характеристик. Для визначення фактичних значень твердості досліджуваних матеріалів застосовувався метод Брінелля.

Комплексні експерименти проводилися на модернізованій установці ІСП-30, обладнаній фотоелектронною касетою з лінійними ПЗС. У таблиці 2.2 наведені результати вимірювань початкових інтенсивностей для бронзи ОСН 10-2-3.

На рисунку 2.2 подано градувальні графіки залежності  $(НВ)X=f(Y_{cp})$ , отримані для досліджуваних зразків із застосуванням методу контрольного еталона.

У таблиці 2.3 наведено результати розрахунків фізико-механічних характеристик  $Y_i$  для зразків бронзи та алюмінію АК9 [13].

Середні величини, наведені у таблиці 2.3, були обчислені шляхом узагальнення поточних значень  $Y_i$  амплітудних параметрів із підсумовуванням по всіх досліджуваних елементах. Як контрольний еталон застосовувався стандартний зразок з маркуванням «952 пов».

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Початкові, виміряні і розраховані параметри для бронзи марки ОСН 10-2-3

Ел.	СЗ	$P_E$	$P_{ECP}$	$\Delta P_E$	$\sum P_E$	$P_X$	$Y$
Fe	953	22,8	44,8	-22,0	67,6	30,5	-0,68
	954					46,5	-0,86
	955					73,3	-0,94
Pb	953	25,0	56,3	-31,3	81,3	36,0	-0,74
	954					36,0	-0,78
	955					35,5	-0,85
Sn	953	72,0	56,3	15,7	128,3	89,5	-0,95
	954					90,5	-0,99
	955					95,5	-1,10
Ni	953	51,3	73,8	-22,5	125,3	65,8	-0,79
	954					71,0	-0,93
	955					77,8	-1,08

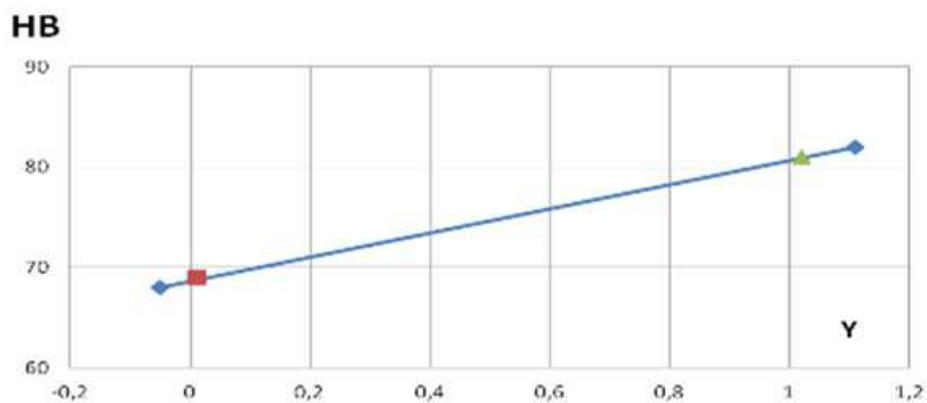


Рисунок 2.2 – Залежність НВ ( $Y_{cp}$ ) для сплаву алюмінію АК9

Таблиця 2.3 – Результати визначення твердості HB

Бронза ОСН 10-2-3					Алюміній АК9				
СЗ	$Y_{cp}$	(HB) <sub>0</sub>	(HB) <sub>x</sub>	$\delta, \%$	СЗ	$Y_{cp}$	(HB) <sub>0</sub>	(HB) <sub>x</sub>	$\delta, \%$
953	-0,79	114	119.2	4,6	141	1,11	80,4	80,5	0,12
954	-0,89	121	126.3	4,4	142	-0,04	68,5	68,0	0,73
955	-0,99	138	130,1	5,7	142	1,04	80,9	80,7	0,25
952	-0,26	107	102,2	4,5	141	-	69,1	69,3	0,30

(HB) 0 - дійсне значення твердості, виміряне класичним методом;

(HB) x - значення твердості, отримане запропонованим методом.

На рисунку 2.3 подані початкові характеристики матеріалів, що використовувалися для визначення структурних особливостей та фізико-механічних властивостей алюмінієвого сплаву АК5М.

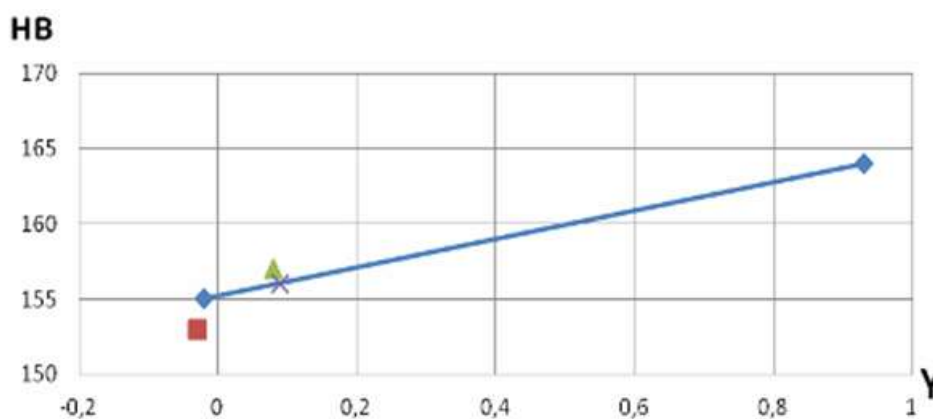


Рисунок 2.3 – Залежність HB (Y) для сплаву алюмінію АК5М

Побудова залежностей здійснювалася на основі п'яти паралельних вимірювань без коригування зареєстрованих значень інтенсивностей. Відносна похибка при цьому перебувала в межах 5–40 %, що зумовлено нестабільністю процесів випромінювання та поглинання в умовах низькотемпературної плазми.

$$\delta = \frac{|P_x - P_{xcp}|}{P_{xcp}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Подальше визначення механічних характеристик можливе двома способами:

1) за допомогою градуювальних графіків, збережених у комп'ютерній базі даних;

2) шляхом аналітичного розрахунку контрольованого параметра  $M_j$  для конкретного зразка відносно еталонного значення  $M_0$  за рівнянням [13–14]:

$$M_j = M_0 + tgA \cdot Y_{CP}(Z')J. \quad (2.3)$$

Надалі була проведена серія експериментів із ливарним алюмінієм АК5М. Зміна його структурних властивостей забезпечувалася шляхом внесення під час кристалізації модифікаторів у вигляді різних доз ультрадисперсних порошоків сажі (СЗ №5, №43) та діоксиду кремнію  $SiO_2$  (СЗ №38, №50). Отримані дані щодо механічних і структурних характеристик наведені у таблиці 2.4.

На рисунку 2.4 подано вихідні дані, що характеризують матеріал у процесі визначення структурних та фізико-механічних властивостей алюмінієвого сплаву АК5М.

Експериментальні результати наведені у таблиці 2.5.

					КВРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Дійсні механічні параметри зразків.

Зразок	Вплив	Кількість, %	НВ	$G_E$	$G_T$	L, мкм	D, мкм
0 ет	Ультрадиспер	0,000	154,9	268,3	246,4	28,1	31,9
5	сний порошок	0,010	154,1	269,7	250,1	20,3	42,0
43	С (сажа)	0,700	164,6	326,2	315,1	11,5	51,8
38	Ультрадиспер	0,025	156,1	277,8	253,2	19,2	42,9
50	сний порошок $SiO_2$	0,700	156,8	280,4	255,0	18,8	43,8

Позначення параметрів:

D – середній розмір мікрозерна, мкм;

L – середня відстань між осями зерен, мкм;

$G_E$  – тимчасовий опір розриву;

$G_T$  – межа текучості;

НВ – твердість за Брінеллем.

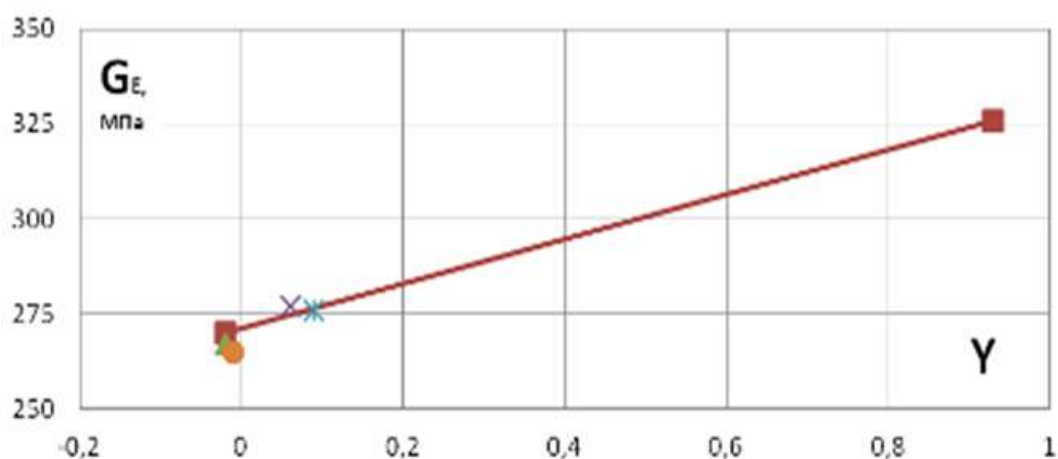


Рисунок 2.4 – Залежність  $G_E$  (Y) для сплаву алюмінію АК5М

Таблиця 2.5 – Залежність основних параметрів від умов випробування.

Зразок	$T_{\text{екс}}=5\text{с}$		$T_{\text{екс}}=10\text{с}$		Результат	
	$Y$	$Z'$	$Y$	$Z'$	$Y_{\text{cp}}\pm\Delta Y$	$Y_{\text{cp}}\pm\Delta Y$
5	-0,02	1,64	-0,08	1,63	$-0,05\pm 0,03$	$1,635\pm 0,05$
43	0,92	2,45	1,18	2,44	$1,05\pm 0,13$	$2,445\pm 0,005$
38	0,09	1,79	0,07	1,69	$0,08\pm 0,01$	$1,740\pm 0,050$
50	0,06	1,70	0,04	1,72	$0,05\pm 0,01$	$1,710\pm 0,010$

На рисунку 2.5 подано початкові характеристики, які використовувалися для оцінки структурних та фізико-механічних властивостей алюмінієвого сплаву АК5М. Узагальнені результати, що стали основою для побудови відповідних графіків, наведені у таблиці 2.6.

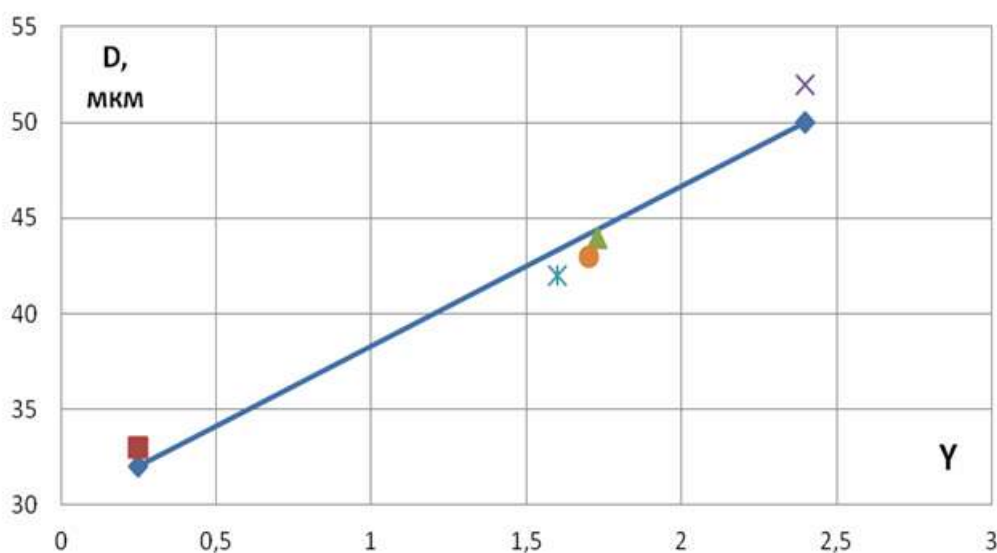


Рисунок 2.5 – Залежність структурних параметрів D ( $Z'$ ) для сплаву АК5М

Таблиця 2.6 – Вихідні дані для побудови графіків.

Параметр	Метод	Еталон	Графічний спосіб				Аналітичний спосіб			
		0	5	43	38	50	5	43	38	50
НВ	Дійсн.	155,8	155,0	166,0	156,9	156,1	154,4	165,4	155,7	155,4
	Вимір.	154,9	154,1	164,6	156,1	156,8	154,1	164,6	156,1	156,8
	$\delta, \%$	0,58	0,58	0,85	0,51	0,45	0,19	0,49	0,26	0,89
$\sigma_E$	Дійсн.	270,0	266,5	330,0	276,5	275,0	265,5	324,4	272,8	271,1
	Вимір.	268,3	269,4	326,2	277,8	280,4	269,4	326,2	277,8	280,4
	$\delta, \%$	0,63	1,08	1,17	0,47	1,57	1,45	0,55	1,80	3,32
$\sigma_T$	Дійсн.	250,0	246,5	319,0	255,5	254,5	243,2	314,3	251,6	249,6
	Вимір.	246,4	250,1	315,1	253,2	255,0	250,1	315,1	253,2	255,0
	$\delta, \%$	1,46	1,44	1,24	0,83	0,24	2,76	0,25	0,63	2,12
D	Дійсн.	31,5	41,7	48,5	42,5	42,0	46,9	54,5	48,0	47,7
	Вимір.	31,9	42,0	51,8	42,9	43,8	42,0	51,8	42,9	43,8
	$\delta, \%$	1,25	0,71	6,35	0,93	4,09	11,7	8,43	11,9	8,86
L	Дійсн.	28,5	18,5	12,2	17,8	18,1	16,5	10,7	15,7	16,0
	Вимір.	28,1	20,3	11,5	19,2	18,8	20,3	11,5	19,2	18,8
	$\delta, \%$	1,43	9,04	6,09	7,37	3,68	18,7	6,96	18,2	14,9

Отримані дані зберігаються у комп'ютерній базі, де разом із визначеними параметрами  $M_0$ ,  $tgA$  та вимірними вхідними характеристиками формують основу для розрахунку механічних і структурних властивостей як графічним, так і аналітичним методом.

Запропонована методика передбачає застосування одного еталонного зразка для кожного типу матеріалу. Водночас можливий варіант періодичного використання кількох (3–5) стандартних зразків із відомими фізико-механічними характеристиками, внесеними в пам'ять комп'ютера, що дозволяє підвищити точність поточного контролю.

Можливість структурного аналізу за допомогою спектральних методів була підтверджена у ряді досліджень, проте кількісна оцінка цих параметрів раніше не виконувалася.

Запропонований підхід до комплексного дослідження елементного складу, механічних властивостей і структурних особливостей матеріалів може бути впроваджений у промислове виробництво та застосований як для вхідного контролю, так і для оперативного аналізу якості готових виробів.

Використання аналізу відпрацьованого моторного масла має значні переваги. Для проведення такого дослідження не потрібно зупиняти техніку чи розбирати двигун, адже процедура виконується безпосередньо під час експлуатації. Діагностика за станом мастильного матеріалу дозволяє своєчасно виявляти початкові ознаки несправностей і запобігати серйозним поломкам. При цьому відпадає потреба транспортувати машину до діагностичного центру або доставляти спеціальне обладнання до місця її роботи. Ще однією важливою перевагою є можливість заміни масла за фактичним ступенем його відпрацювання, а не за регламентованим ресурсом у мотогодинах чи кілометрах. Попри простоту виконання, такий аналіз забезпечує отримання вичерпних даних про стан двигуна.

Для досягнення максимальної точності необхідно дотримуватися кількох умов. Протягом усього періоду спостереження двигун має працювати на мастилі однієї марки. Якщо ж через обставини довелося долити інше масло, підвищилося навантаження чи змінилися умови експлуатації, про це обов'язково повідомляють у лабораторію. Відбір проб здійснюють лише з прогрітого двигуна, після чого допускається доливання свіжого масла. Частота відбору складає приблизно чверть від встановленого пробігу або напрацювання, зазначеного в технічній документації.

Найбільш достовірні результати отримують при наявності не менше чотирьох проб. Це дає змогу оцінити динаміку зміни властивостей мастила та визначити його залишковий ресурс. Якщо параметри змінюються рівномірно та закономірно — двигун вважається справним. Ознакою несправностей є різке чи нетипове відхилення одного або кількох показників моторного масла.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для оцінки стану моторного масла застосовують різні методи, які підтвердили свою дієвість на практиці. Зокрема, феррографічний метод (осадження магнітних частинок) дає змогу визначити характер і інтенсивність зношування, умови роботи вузлів тертя, а також виявити продукти руйнування масла чи сторонні домішки. Його перевага полягає в універсальності, адже дослідженню підлягають не лише магнітні частки, але й немагнітні — такі як бронза, латунь, алюміній чи полімерні матеріали.

Поєднання феррографії з інфрачервоним спектральним аналізом дозволяє виявляти дефекти, що виникають у змащувальних вузлах двигунів. Ці методики належать до лабораторної трибодіагностики й забезпечують своєчасне виявлення пошкоджень, знижуючи витрати на ремонт та обслуговування.

Порівняно з іншими видами діагностування, аналіз моторного масла [11–14] має низку суттєвих переваг:

- відсутність потреби зупиняти машину під час обстеження;
- можливість проведення діагностики без розбирання й візуальної перевірки двигуна;
- виявлення несправностей на ранніх етапах;
- немає необхідності транспортувати техніку до діагностичного поста або доставляти туди обладнання;
- можливість виконувати заміну мастила відповідно до реального стану, а не за регламентованим ресурсом;
- отримання широкого спектра діагностичної інформації при невисоких трудовитратах.

Надійність оцінки значно підвищується при дослідженні не менше чотирьох проб масла. Це дозволяє простежити закономірність змін у складі та властивостях мастильного матеріалу. Якщо параметри змінюються прогнозовано — двигун вважається працездатним, у разі ж виявлення різких чи атипових відхилень одного або кількох показників виникає підозра на

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

несправність. Узагальнене діагностичне значення основних показників наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 - Діагностичне значення показників

Показник	Діагностичне значення
В'язкість	Зниження - потрапляння палива в масло; підвищення окислення масла, забруднення нерозчинними речовинами
Лужне число	Характеризує виснаження нейтралізуючих властивостей (спрацьованість миючих присадок)
Кислотне число	Характеризує накопичення в маслі кислот, які можуть викликати корозію деталей
Вміст металів (Fe, Cu, Pb, Al, Cr, Zn)	Характеризує швидкість зношування або інтенсивність корозії деталей двигуна
Вміст кремнію	Вказує на зовнішнє забруднення масла абразивними частинками
Вміст нерозчинного в паливі осаду	Характеризує забрудненість масла в основному частинками сажі через неповне згоряння палива
Температура спалаху	Вказує на наявність в маслі палива, охолоджувальної рідини або відпрацьованих газів
Інфрачервона Спектрограма	Вказує на ступінь окислення масла, наявність в маслі охолоджуючої рідини (води, етиленгліколю), втрату працездатності присадок
Феррограма	Характеризує форму, розміри, колір і кількість частинок - продуктів зносу, що дає надійне уявлення про нормальний або аномальний протіканні процесу

## 2.2 Метод магнітного осадження (феррографічний).

Феррографія – це метод, заснований на магнітному осадженні металевих частинок зносу з проб мастильного матеріалу. Він дає можливість визначити характер і інтенсивність зношування, умови тертя та мастила, аналізуючи форму частинок, стан їх поверхні, розподіл за розмірами, матеріал, з якого вони утворені, а також наявність сторонніх домішок чи продуктів руйнування оливи.

Цей метод застосовується не лише для виявлення феромагнітних частинок, але й для немагнітних – алюмінію, латуні, бронзи, графіту, полімерів тощо. Сукупність отриманих показників дозволяє ідентифікувати тип зносу, локалізувати можливе джерело дефекту та оцінити рівень його небезпеки. Так, для частинок задирів типовими є подряпини уздовж напрямку руху; при розвитку втомних мікротріщин у зоні кочення в оливі з'являються сферичні частинки; при втомному викришуванні спостерігаються пухкі утворення з численними мікропорами. Корозійний знос супроводжується появою великої кількості мікрочастинок (до 2 мкм), тоді як при мікрорізанні формуються стружкоподібні елементи [12].

Регулярний аналіз проб оливи дозволяє точно визначити момент її заміни, уникнути передчасного чи запізненого технічного обслуговування, а також підвищити надійність та безпечність експлуатації двигуна.

Окрім лабораторних досліджень, що виконуються у спеціалізованих центрах, широко застосовують і спрощені методи контролю, доступні для персоналу автотранспортних підприємств. Для цього існують набори експрес-аналізу з мінімальним комплектом приладів і реагентів. Одним із таких методів є «крапельна проба»: крапля мастила, нанесена на фільтрувальний папір, дозволяє оцінити дисперсні властивості оливи, ступінь її забруднення та окиснення, а також виявити наявність води. Завдяки можливості проведення експрес-аналізу з високою частотою можна своєчасно виявляти відхилення у роботі двигуна. Найбільш ефективним є поєднання повномасштабних лабораторних досліджень з експрес-контролем.

Процедура феррографічного аналізу полягає в осадженні зносних частинок з проби мастила на скляну пластину під дією магнітного поля, після чого вони вивчаються під мікроскопом. При градієнті магнітного поля приблизно 2000 Ерстед/мм на пластині осідають практично всі частинки, що є в оливі – від феромагнітних до діа- та парамагнітних (за рахунок мікрровключень феромагнетиків). Спершу на поверхню пластини

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

відкладаються великі частинки, а потім – дрібніші, оскільки магнітна сила зростає пропорційно кубу розміру частинки, тоді як опір в'язкого середовища – пропорційно квадрату. Частинки однакових розмірів, але з різною магнітною сприйнятливістю, осідають відповідно до цього параметра.

Можливість оцінки технічного стану дизельного двигуна за допомогою спектрально-феррографічного аналізу мастила була перевірена під час досліджень моторного масла Mannol M.O. SAE20W API CD (базове) та того ж масла з присадкою ADDILEX D-540 (дослідна) на двигуні в умовах холодних запусків і прогрівів. Досліди проводилися при температурах навколишнього повітря  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (без використання допоміжних засобів) та  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  (з електрофакельним пристроєм). Загальні результати пусків двигуна в умовах низьких температур подані в таблиці 2.8.

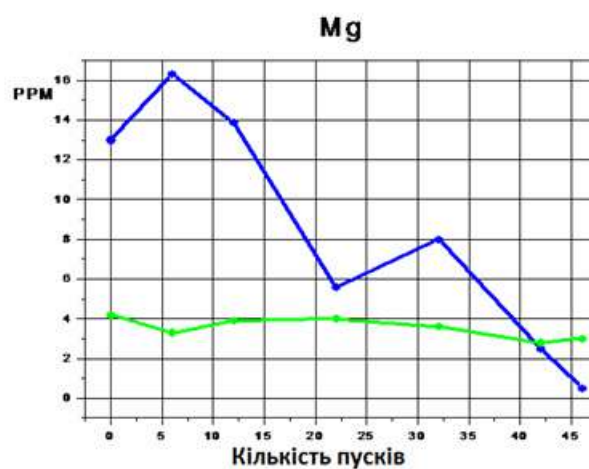
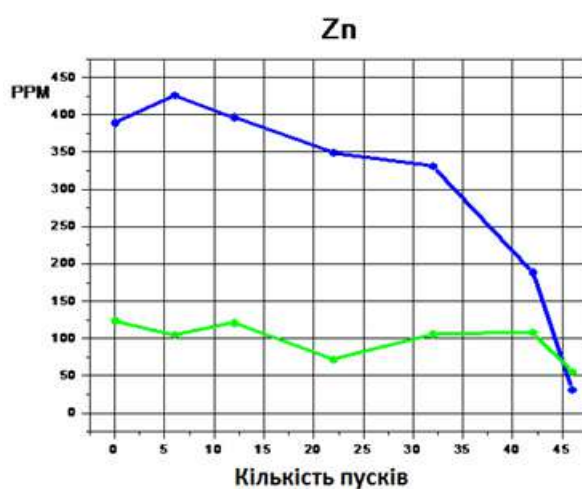
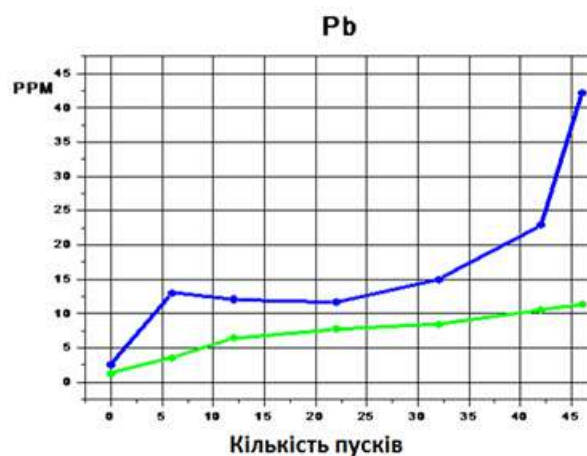
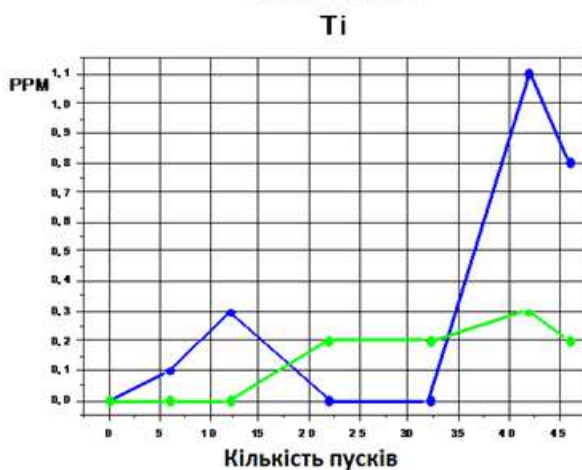
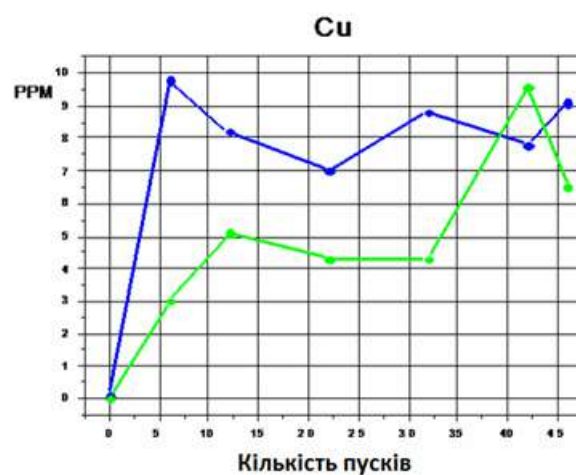
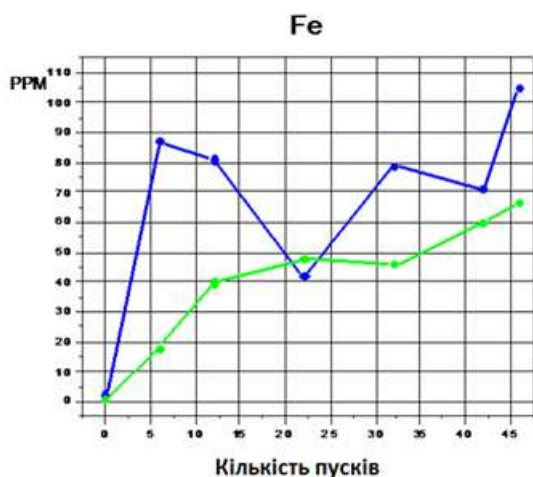
ADDILEX D-540 — це універсальний (all-purpose) пакет присадок для моторних масел (особливо дизельних) з високими вимогами до чистоти, захисту від зносу та стабільності.

Таблиця 2.8 – Загальна характеристика пусків двигуна в умовах низьких температур навколишнього повітря

Етап	Температура навколишнього повітря, $^{\circ}\text{C}$	Кількість пусків	Використання способів полегшення пуску
1	- 10	6	Без використання
	- 22	6	З використанням ЕФУ
2	- 10	20	Без використання
	- 22	14	З використанням ЕФУ

Динаміку зміни вмісту основних хімічних елементів (Fe, Cu, Ti, Pb, Zn, Mg, Ni, Mo) у досліджуваних мастильних матеріалах залежно від напрацювання двигуна наведено на рисунку 2.7. Показник концентрації, ppm

(parts per million), відображає кількість певної речовини у міліграмах на одну тонну масла.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Pb – відповідно 42,2 і 11,3 ppm (зниження на 73 %), Cu – 9,1 і 6,5 ppm (менше на 29 %).

Для перевірки результатів спектрально-феррографічної діагностики проводили додатковий контроль шляхом розбирання двигунів та мікрометричних вимірювань деталей до і після випробувань. Отримані величини зносу подано в таблицях 2.9 і 2.10. У дужках зазначено відсоткове зменшення зношування при застосуванні дослідного масла порівняно зі штатним. Дані таблиць підтверджують висновки спектрального аналізу щодо зниження інтенсивності зносу деталей при використанні модифікованого мастила.

Таблиця 2.9 – Середні зноси деталей циліндро-поршневої групи двигуна

Найменування деталі	Місце виміру		Значення зносу, мкм			
			Максимальне		Середнє	
			базове	дослідне	базове	дослідне
Гільзи циліндрів	Внутрішній діаметр на відстані Н, мм від верхнього торця	Н = 28	+ 13,2	+7,2(46%)	+ 14,0	+12,0(14%)
		Н = 68	+ 9,8	+6,5(34%)	+ 11,0	+9,0(19%)
Поршневі кільця	Радіальна товщина	Перше кільце	3,4	2,6(-24%)	3,8	3,60(5%)
		Друге кільце	1,6	0,2(-87%)	2,2	0,50(-77%)

Феррографічне дослідження масел виявило наступне (рис. 2.8) [11]:

1. У свіжому маслі (у заводському стані) трапляються частинки піску до 5 мкм, оксиди заліза (іржа) до 5 мкм і сферичні включення Fe до 2 мкм, що виникають під час зберігання у металевій тарі. Наявність таких домішок допустима.

2. Після 6 пусків виявлено частинки коксу до 250 мкм, включення мідного сплаву до 110 мкм, ознаки корозійного зносу та поодинокі частки механічного зношування до 15 мкм.

3. Після 12 пусків переважають сталеві частинки розміром до 10 мкм, а також окремі включення, характерні для періоду припрацювання, до 45 мкм. Основна маса складається з продуктів корозійного зносу; слідів втомного викришування, задирів чи мікрорізання не зафіксовано.

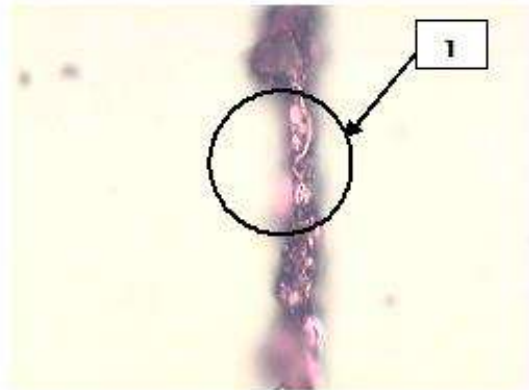
4. На 22-му пуску спостерігаються частинки відшарування до 20 мкм та продукти мікрорізання за наявності абразиву до 40 мкм. У зразку після 32 пусків з'являються поодинокі частинки мікрорізання (до 20 мкм), що утворюються внаслідок взаємного впровадження мікронерівностей, а також значна кількість коксових частинок до 10 мкм.

5 – У зразку масла після 42-го запуску зафіксовано наявність частинок мікрорізання у присутності абразивних домішок розміром до 30 мкм, а також сферичних включень до 4 мкм, що зазвичай утворюються при виникненні втомних мікротріщин на поверхнях тертя. У даному випадку їх поява може бути пов'язана з роботою двигуна під час пуску за умов підвищеного навантаження. Крім того, у пробі спостерігаються частинки відшаровувального зносу до 15 мкм, коксові відкладення та уламки неметалевого покриття до 100 мкм з вкрапленнями продуктів відшарування розміром 1–3 мкм.

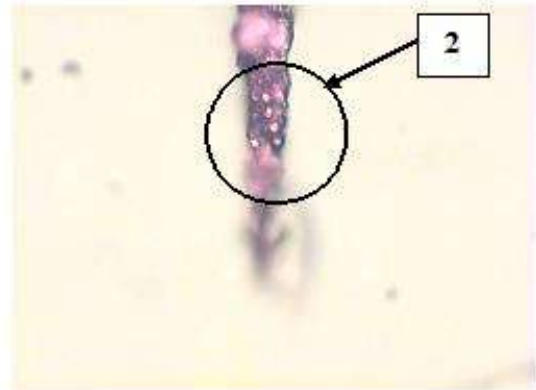
6 – У маслі, відібраному після 46-го пуску, виявлено частинки відшаровувального зносу розміром до 15 мкм, коксові включення та частинки нагару.

7 – У пробі, взятій із корпусу фільтра грубого очищення, переважають частинки, характерні для процесу припрацювання, а також частки нагару. Ознак втомного викришування, задирів чи мікрорізання у даній пробі не виявлено.

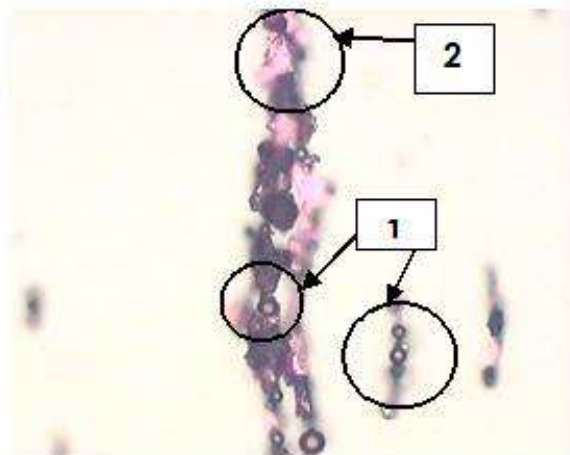
					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



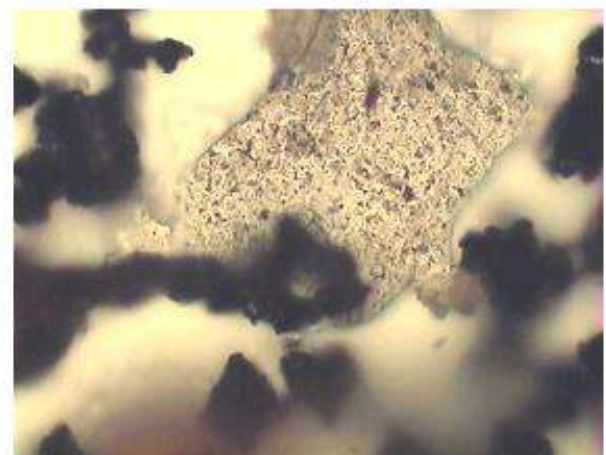
Частка мікро різання (1) в присутності абразиву розміром 30 мкм. збільшення x500



Сферичні частинки (2) розміром до 4 мкм. збільшення x500



Сферичні частинки (1) розміром до 5 мкм, частинки нормального зносу відшаруванням (2) розміром до 15 мкм. Збільшення x500.



Частка (імовірно) не металевого покриття розміром 100 мкм з включеннями частинок зносу відшаруванням розміром 1-3 мкм. Збільшення x500.

Рисунок 2.8 – Феррографічний аналіз (масло Mannol M.O. SAE20W відібране при -22 °C після перших 10 пусків).

Проведені випробування підтверджують, що використання спектрально-феррографічного аналізу дає можливість оцінювати інтенсивність зношування деталей двигуна залежно від напрацювання, визначати локалізацію зон зносу та, що особливо важливо, встановлювати його характер. Це підкреслює практичну цінність методу як у діагностиці технічного стану двигунів, так і в наукових дослідженнях, пов'язаних з вивченням ефективності присадок і триботехнічних матеріалів. Водночас слід наголосити, що попри високу інформативність та відносну простоту застосування спектрально-феррографічних методів, необхідно продовжувати їх удосконалення для вирішення завдань кількісної оцінки зносу деталей і прогнозування залишкового ресурсу двигуна.

Таблиця 2.10 – Середній знос деталей кривошипно-шатунного механізму двигуна

Найменування деталі	Місце вимірювання	Значення зносу, мкм			
		Максимальне		Середнє	
		базове	дослідне	базове	дослідне
Колінчастий вал	Діаметр корінної шийки	2,6	2,1(-19%)	3,6	2,5(-31%)
	Діаметр шатунної шийки	2,2	1,5(-32%)	3,4	2,6(-24%)
Вкладиші корінних підшипників	Товщина верхнього вкладиша	4,5	3,9(-14%)	6,4	4,2 (-35%)
	Товщина нижнього вкладиша	5,4	4,6(-15%)	6,1	5,4 (-13%)
Вкладиші шатунних підшипників	Товщина верхнього вкладиша	3,2	3,9(+21%)	6,5	4,1 (-37%)
	Товщина нижнього вкладиша	4,2	3,9(-7%)	5,7	4,1 (-29%)

### 3. ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

На сучасному етапі методики діагностування дизелів без демонтажу ще не набули достатнього розвитку. Тому під час планового технічного обслуговування часто доводиться проводити розбирання двигунів, навіть коли їхній фактичний стан цього не потребує. Це зумовлює зростання інтересу до методів безрозбірного контролю, зокрема до феррографії, яка ґрунтується на аналізі мастильного матеріалу з метою визначення вмісту в ньому частинок продуктів зношування.

У межах цього дослідження були змодельовані умови, характерні для найбільш поширених аварійних ситуацій у роботі дизелів: поява задирів на контактних поверхнях і перегрів вище допустимих температур. У процесі роботи проводився кількісний і якісний аналіз частинок металу в маслі для встановлення можливості оцінювання рівня зношування, виявлення пошкоджень та визначення доцільності подальшої експлуатації двигуна до наступного ремонту чи технічного огляду.

Дослідження виконувалися на чотирьох справних дизельних двигунах типу DMH 17H. Це чотиритактні восьмициліндрові агрегати з горизонтально-рядним розташуванням циліндрів, форкамерами, ступенем стиску 16, системою водяного охолодження та потужністю 132 кВт при номінальній швидкості обертання 1500 об/хв. Двигуни були змонтовані на випробувальному стенді та працювали в умовах підвищених навантажень. Проби масла відбиралися через контрольний отвір кожні 5 хвилин, підігрівалися до 65 °С, збовтувалися і після цього аналізувалися.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.1 Характерні ознаки металевих частинок продуктів зносу при виникненні задирів у двигуні.

Для визначення характерних ознак металевих частинок, що утворюються в процесі задирів, дослідження проводилися в умовах прискореного зношування. З цією метою в першому двигуні було штучно зменшено зазори у парах тертя (шийки колінчастого вала – вкладиші шатунних підшипників), що призвело до ускладнення умов тертя та посилення процесів схоплювання. У другому двигуні мастильні канали були перекриті, щоб припинити подачу масла в зону контакту колінчастого вала з підшипниками, що дало змогу посилити прояви задирів і простежити залежність між інтенсивністю зносу та властивостями металу.

Частинки, які з'являлися в мастилі під час роботи двигунів, досліджувалися під мікроскопом. Спочатку було зафіксовано значну кількість темно-сірих округлих частинок кольорових металів діаметром менше 10 мкм. Згодом у мастилі почали з'являтися чорні овалоподібні частинки розміром 10–20 мкм. Дослідження вкладишів показало, що на цьому етапі зруйнувалася помітна частина шару білого металу (верхнє антифрикційне покриття), у результаті чого відкрився другий шар – кельмет, хоча процес ще не досяг стадії повного задиру.

Подальше ускладнення умов роботи (зменшення мастилоподачі, підвищення навантаження та частоти обертання) призвело до появи у маслі жовто-червоних частинок розміром близько 10 мкм, що, ймовірно, утворилися з перегрітого кельмету. Після цього двигуни продовжували працювати аж до виникнення задирів. У цей момент шар білого металу був повністю зруйнований, а кельмет повністю відкрився, набувши чорного відтінку та грубої поверхневої структури, що є характерною ознакою задиру.

Аналіз отриманих даних свідчить: поки пошкодження обмежуються шаром білого металу, двигун може функціонувати далі. Однак руйнування

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шару кельмету в умовах підвищених навантажень становить реальну загрозу подальшій роботі двигуна.

Узагальнення результатів дало змогу виділити типовий порядок появи частинок різного кольору та розмірів у мастилі [5,14]:

1. Темно-сірі округлі частинки металу кольорового, більше 10 мкм (верхній шар підігрітого свинцю).

2. Темні овалоподібні частинки 10–20 мкм (розплавлений білий метал).

3. Білі частинки неправильної форми, більше 10 мкм (фрагменти металу, що потрапили в зону тертя й були зруйновані).

4. Жовто-червоні частинки близько 10 мкм (шар кельмету, що зазнав зношування).

5. Темно-червоні частинки близько 10 мкм (перегрітий і зруйнований кельмет).

6. Стадія утворення задиру.

Крім того, проведено математичну обробку результатів феррографічного аналізу частинок зносу, що відбиралися з мастила під час експериментів. Вона засвідчила, що, попри наявність пошкоджень металу, суттєвих змін у значеннях основних феррографічних параметрів – показника концентрації частинок зносу (WPC) та коефіцієнта інтенсивності зношування ( $I_s$ ) – не виявлено. Це пояснюється тим, що зношування шийок колінчастого вала (виготовленого з чорного металу) залишалось на початковій стадії, тоді як антифрикційні вкладиші з кольорових металів зазнали одностороннього руйнування.

### 3.2 Характерні риси частинок зносу при перегріванні ДВЗ.

Щоб визначити характерні риси частинок зносу, які утворюються під час перегріву дизеля, було проведено експеримент із прискореним відтворенням умов підвищеної небезпеки. На першому двигуні подачу

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

охолоджувальної води поступово зменшували до повного припинення, у результаті чого агрегат зупинився внаслідок заклинювання, викликаного перегрівом циліндрових втулок. Другий двигун відразу працював у режимі без охолодження. Спочатку його зупиняли при появі слідів заїдання, після чого цикл «зупинка – охолодження – повторний запуск» неодноразово повторювали. Це дозволило довести ступінь пошкоджень до того рівня, коли пуск став неможливим через повне заклинювання механізму.

Розбір двигунів після випробувань показав:

- на більшості вкладишів верхній шар білого металу був знятий, а підлеглий шар кельмету оголився, почорнів і став грубозернистим;
- внутрішні поверхні циліндрів мали сліди зміни кольору, підвищену шорсткість і задири, а також відкладення алюмінію;
- на бічних поверхнях поршнів утворилися численні глибокі ушкодження, що виникли внаслідок задирів та інтенсивної абразивної дії.

Мікроскопічний аналіз частинок зносу в маслі показав таку послідовність їх появи:

- 1 на початковій стадії нагріву фіксувалися дрібні частинки чорного металу, що утворилися під час первинного притирання;
- 2 з підвищенням температури з'явилися поодинокі білі частинки кольорового металу невизначеної форми (10–20 мкм) та чорні округлі частки кольорового металу діаметром до 10 мкм;
- 3 перед першою зупинкою через заїдання у мастилi спостерігали чорні частинки окисленого чорного металу (понад 10 мкм) і білі уламки кольорового металу з розмірами понад 20 мкм;
- 4 після охолодження та повторного запуску ці типи частинок знову почали активно випадати в масло, а їх концентрація значно зросла;
- 5 безпосередньо перед остаточним заклинюванням у зразках з'явилися потемнілі частинки кольорового металу розміром близько 10 мкм, що, ймовірно, є фрагментами перегрітого шару кельмету.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Це пояснюється тим, що при перегріванні в циліндро-поршневій групі, виготовленій із чорних металів, відбувається активна абразивна взаємодія між стінками циліндрів та кільцями, що суттєво прискорює знос.

Крім того, встановлено, що після повторного запуску двигуна, який встиг охолонути, значення коефіцієнта  $I_s$  різко збільшується. Причина цього полягає в тому, що при зупинці перегрітого двигуна між поршнями та циліндрами зберігаються сліди часткового схоплювання. Під час наступного запуску ці прихоплені ділянки руйнуються, відриваючи фрагменти поверхні, які, у свою чергу, викликають прискорене руйнування контактних зон і провокують різке зростання локального зносу.

Аналізуючи особливості частинок зношування, можна зробити висновок, що при розвитку процесу задиру в дизельному двигуні відбувається така послідовність явищ: спершу на контактних поверхнях підшипників зношується білий метал, при цьому утворюються оплавлені частинки розміром понад 10 мкм. Далі пошкодження поступово поширюються на нижній шар кельмету, що також руйнується з появою частинок аналогічних розмірів. У результаті цей процес завершується повним заклинюванням вузла.

Таким чином, кількість частинок кольорового металу діаметром понад 10 мкм, а також їхній відтінок, визначений методом ферографії, можуть слугувати надійними показниками для прогнозування ймовірності виникнення задиру з подальшим заклинюванням двигуна. Іншими словами, якщо у зразку мастила об'ємом 1 мл, відібраному для ферографічного дослідження, виявляється більше 10 таких частинок, це може свідчити про перехід зношування в критичну стадію. Швидкість розвитку процесу визначається співвідношенням кількості виявлених частинок кельмету до загальної кількості продуктів зносу кольорового металу.

У випадку перегріву двигуна механізм формування дефекту відбувається інакше. Спочатку у зразках мастила з'являється невелика

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

кількість білих частинок кольорового металу невизначеної форми (10–20 мкм) та чорних округлих частинок діаметром до 10 мкм, що виникають при контакті розширених від температури поршнів і втулок циліндрів. З розвитком процесу утворюються більші чорні частинки окисненого чорного металу (>10 мкм) та білі частинки кольорового металу неправильної форми й більшої товщини (>20 мкм). Поява цих елементів у значних кількостях є передвісником швидкої зупинки двигуна.

Отже, без розбирання агрегата можна оцінити ймовірність небезпечного зношування циліндро-поршневої групи внаслідок перегріву, орієнтуючись на кількість та розміри білих частинок кольорового металу в мастилі.

Застосування фєрографії для діагностики дизельних двигунів може бути поширене й на інші напрями контролю їх технічного стану. Зокрема, методика діагностування за спектральним аналізом моторного масла ґрунтується на моделюванні процесів зношування окремих деталей, відстеженні накопичення продуктів зносу в мастильному середовищі та алгоритмі розподілу цих продуктів за групами контрольованих елементів двигуна.

### 3.3 Моделі зношування ЦПГ і КШМ дизельного ДВЗ.

Найбільш уразливими елементами дизельного двигуна є деталі циліндро-поршневої групи (ЦПГ) та кривошипно-шатунного механізму (КШМ).

Як відомо, саме надійність цих вузлів визначає періодичність проведення капітальних ремонтів, що відзначаються високою трудомісткістю та значними витратами. Велика варіативність показників безвідмовності елементів ЦПГ і КШМ свідчить про те, що чимало двигунів знімаються з

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатації для ремонту ще до повного вичерпання ресурсу їх основних складових, які фактично обмежують загальну довговічність агрегата.

Для періодичного контролю ступеня зношування деталей ЦПГ і КШМ без розбирання двигуна застосовується методика, заснована на відстеженні поточних значень концентрації продуктів зносу з контрольованих поверхонь у моторному маслі.

Відповідно до ДСТУ 9049:2020 «Технічна діагностика. Діагностування та контролювання технічного стану посудин і трубопроводів під впливом агресивного робочого середовища. Загальні вимоги» та ДСТУ 9118:2021 «Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій. Загальні вимоги», як основа діагностики використовується імовірнісний алгоритм. Його робота ґрунтується на побудові діагностичної матриці для конкретної серії дизелів, що формується за результатами експлуатаційних спостережень на визначеному полігоні.

Після аналізу технічного стану вузлів і параметрів їхньої експлуатації та ремонту розраховується діагностичний коефіцієнт. Його значення порівнюють із граничним, і за результатами цього порівняння визначають можливість подальшої роботи двигуна та його деталей. Технічний стан класифікується за чотирма рівнями: нормальна робота, відмова першого рівня, відмова другого рівня та відмова третього рівня.

Попри наявні переваги, алгоритм із ДСТУ 9118:2021 має низку суттєвих недоліків:

- наявні критерії не дають змоги чітко визначити момент, коли потрібен ремонт або заміна деталей;
- побудова діагностичної матриці для кожної серії двигунів вимагає великих витрат часу, ресурсів і коштів;
- імовірнісні алгоритми завжди містять похибки першого та другого роду, величина яких залежить від достовірності й актуальності даних у діагностичній матриці.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З огляду на ці обмеження запропоновано альтернативний алгоритм оцінювання технічного стану без розбирання двигуна. Перед початком експлуатації або після ремонту, що супроводжується повним розбиранням, у спеціальні карти заносяться фактичні розміри контрольованих деталей. Надалі, під час експлуатації, зазвичай перед проведенням технічного обслуговування рівня ТО-3, здійснюється відбір проб моторного масла та визначення концентрації продуктів зносу. Для правильної реалізації методики необхідно враховувати напрацювання від попереднього планового ремонту до моменту контролю, обсяг доливань масла у систему, а також кількість його замін за контрольний період.

Під час розрахунку величини зносу деталей, за контрольованим поясам та площинами, приймають геометричну форму зносу, що визначається періодичністю діючих, у вузлах двигуна за робочий цикл сил. Послідовність рішення такої задачі представлена на рис 3.2.

У результаті застосування запропонованого алгоритму можна визначити величину радіального зносу, а також параметри конусності та овальності деталей. Це забезпечує більш обґрунтоване прийняття рішень щодо їхнього ремонту або заміни.

Разом з тим під час реалізації представленої на рис. 3.3 методики контролю виникають дві ключові проблеми:

- створення математичних моделей, що відображають залежність між концентрацією продуктів зношування в моторному маслі дизеля та геометричними параметрами зносу контрольованих деталей;

- розробка моделі, яка описує процес накопичення продуктів зносу у картерному маслі під час експлуатації двигуна.

Ці завдання є досить складними з методичної точки зору і вимагають використання обчислювальної техніки з достатньою швидкістю та обсягом пам'яті, а також відповідного програмного забезпечення.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

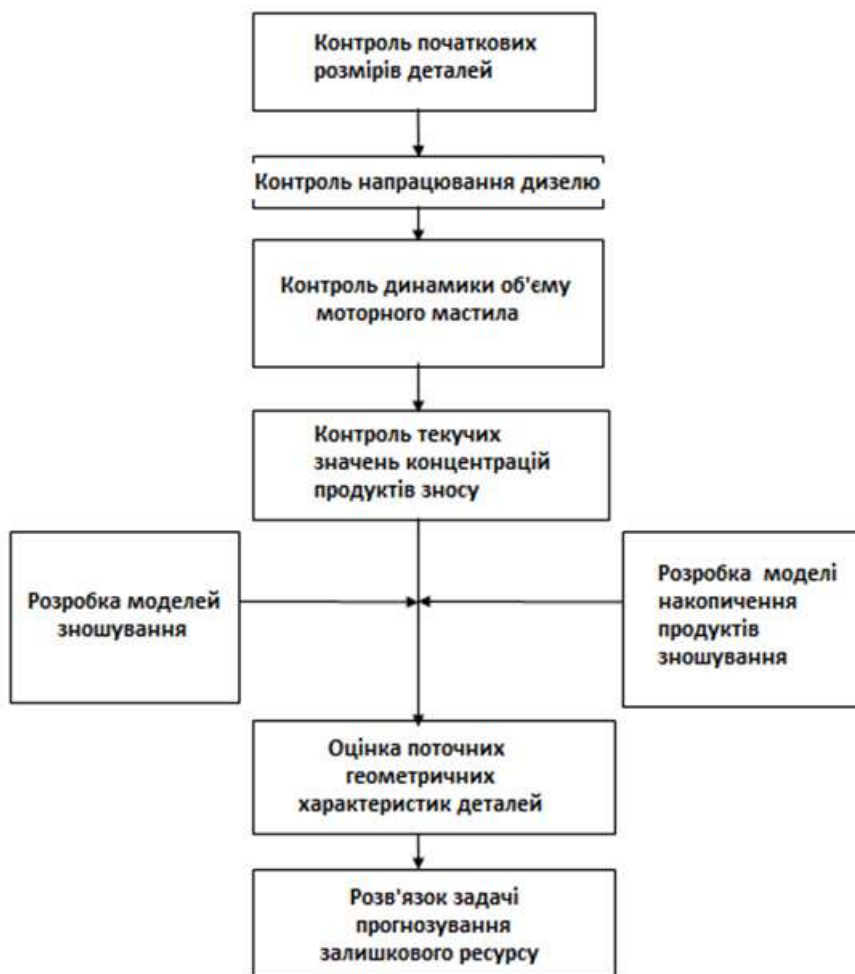


Рисунок 3.2 – Структура рішення задачі

### 3.4 Оцінка особливостей зношування деталей КШМ та ЦПГ.

#### 3.4.1 Оцінка зношування шийок колінчастого валу.

Для оцінки особливостей зношування поверхонь деталей дизельних двигунів використовуються діаграми зносу, які будуються на основі векторних діаграм сил. Такі діаграми відображають траєкторії кінців векторів повних тисків і дозволяють візуалізувати ділянки з максимальними та мінімальними навантаженнями в зонах тертя [14].

Форма зносу контрольованих елементів може бути визначена двома шляхами: шляхом аналізу фактичних вимірювань, виконаних у процесі ремонтних робіт, або теоретично – за допомогою побудови векторних діаграм сил, що діють на деталі в експлуатації. На рис. 3.3 подано приклад діаграми, яка відображає характер зношування шатунної шийки колінчастого вала дизеля типу 38D 8-1/8.

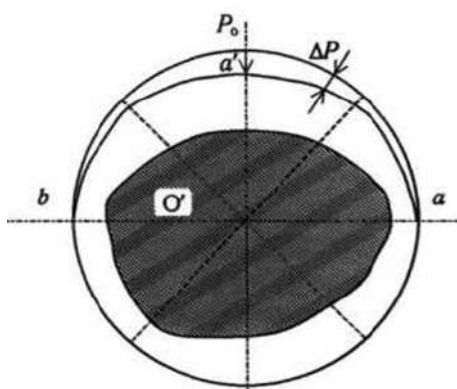


Рисунок 3.3 – Приклад діаграми зношування шийки вала.

На рис. 3.4 наведено векторну діаграму сил, що впливають на поршневий палець. Використання подібних діаграм спрощує побудову діаграм зносу, завдяки чому можна більш точно визначати зони підведення мастила та виявляти ділянки поверхонь, які зазнають найбільш інтенсивного зношування. Для визначення характеру зносу деталей дизеля було виконано динамічні розрахунки, складено векторні діаграми діючих сил та побудовано діаграми зносу.

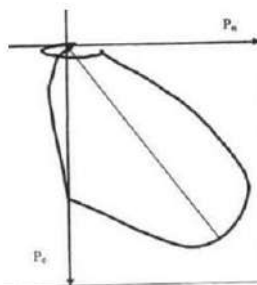


Рисунок 3.4 – Приклад векторної діаграми сил.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

У підсумку, як на основі статистичних даних, так і в результаті теоретичних розрахунків інтенсивності зношування деталей, доцільно отримати залежності, які встановлюють взаємозв'язок між зміною концентрацій металів у картерному маслі, геометричними параметрами контрольованих деталей та величиною їх напрацювання від моменту встановлення (або заміни) до чергового контролю.

Наприклад [14], для корінних шийок колінчастих валів дизеля 38D 8-1/8 цей зв'язок можна виразити наступним чином:

- для верхніх шийок:

$$V_{\text{ск}} = 304 \cdot \left[ \begin{array}{l} 2,355(D_{\text{ч}}^{(\text{ск})})^2 - 0,785(D_{\text{ч}}^{(\text{ск})} - 0,187L + 8,45 \cdot 10^{-4})^2 - \\ -0,785(D_{\text{ч}}^{(\text{ск})} - 0,189L + 3,45 \cdot 10^{-4})^2 - 0,785(D_{\text{ч}}^{(\text{ск})} - 0,186L + 8,55 \cdot 10^{-4})^2 \end{array} \right] \quad 3.1$$

Для нижніх шийок:

$$V_{\text{нк}} = 304 \cdot \left[ \begin{array}{l} 2,355(D_{\text{ч}}^{(\text{нк})})^2 - 0,785(D_{\text{ч}}^{(\text{нк})} - 0,217L - 9,65 \cdot 10^{-4})^2 - \\ -0,785(D_{\text{ч}}^{(\text{нк})} - 0,219L - 9,65 \cdot 10^{-4})^2 - 0,785(D_{\text{ч}}^{(\text{нк})} - 0,219L - 6,35 \cdot 10^{-4})^2 \end{array} \right] \quad 3.2$$

де  $L$  – напрацювання дизельного двигуна від моменту проведення капітального ремонту (або встановлення нової деталі) до часу контролю, км,

$D_{\text{ч}}$  (нк, ск) – початковий (креслярський) розмір шийки вала, мм;

Аналіз побудованих схем зносу елементів ЦПГ свідчить, що циклічність навантажень, які діють на них у процесі роботи, формує характерну для кожного типу деталей картину зношування. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення моделей зношування окремих елементів, які б враховували як детерміновані, так і випадкові (стохастичні) фактори, що впливають під час їх експлуатації.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для поршневого пальця дизеля 38D 8-1/8 плаваючого типу, за умови рівномірного зносу по всій робочій поверхні, обсяг втраченого металу (заліза) у залежності від величини зносу можна визначити за формулою (3.3), мм<sup>3</sup>:

$$V_{\text{ПП}} = \left( \frac{\pi d_{\text{ПП}}^2}{4} - \frac{\pi (d_{\text{ПП}} - \Delta_{\text{ПП}})^2}{4} \right) \cdot l \quad (3.3)$$

де:  $d_{\text{ПП}}$  – зовнішній початковий діаметр пальця поршневого, мм;

$\Delta_{\text{ПП}}$  – знос пальця діаметральний, мм;

$l$  – довжина пальця, мм.

Для підшипників поршневого пальця (бронзових втулок у верхній головці шатуна та у вставці поршня) об'єм металу, що зносився при заданому значенні зносу, визначають за формулою (3.4):

$$V_{\text{ПТ}} = \left( \left( \frac{\pi (d_{\text{ВТ}} + \Delta_{\text{ВТ}})^2}{4} - \frac{\pi d_{\text{ВТ}}^2}{4} \right) - 32 \frac{\Delta_{\text{ВТ}}}{2} \right) 36,5 \quad (3.4)$$

де:  $d_{\text{ВТ}}$  – початковий внутрішній діаметр бронзової втулки, мм.

Для побудови емпіричних залежностей, які відображають взаємозв'язок між величиною зносу, напрацюванням двигуна та концентрацією продуктів зношування однотипних деталей у мастилі, необхідно попередньо оцінити порівняльну інтенсивність зношування кожного елемента. При цьому задається базовий розмір, що використовується для розрахунку інших геометричних параметрів контрольованих деталей та визначення обсягів зношеного металу.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.4.2 Оцінка зношування кілець компресійних.

Для прикладу, у дизельному двигуні 38D 8-1/8 на кожен поршень монтується чотири компресійні кільця. Вони виготовлені з чавуну і мають бронзову вставку. При проведенні ремонтних робіт вимірювання зносу здійснюють у п'яти контрольних зонах по колу кільця. За базову величину прийнято розмір у третій зоні, розташованій навпроти замка (рис. 3.5).

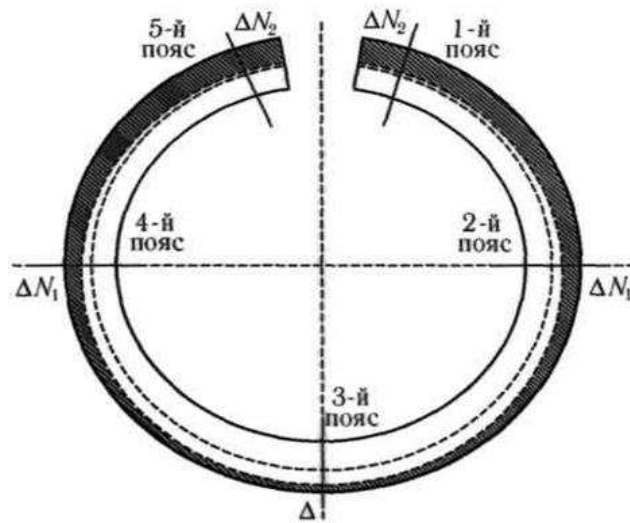


Рисунок 3.5 – Схема геометрії зношування кільця компресійного.

Співвідношення між ремонтними параметрами в інших поясах поршневих кілець визначають за допомогою коефіцієнтів:

$$N_1 = \frac{\Delta^{(2,4)}}{\Delta^{(3)}}, \quad (3.5)$$

$$N_2 = \frac{\Delta^{(1,5)}}{\Delta^{(3)}}, \quad (3.6)$$

де  $\Delta_{(i)}$  – величина зносу поршневого кільця у відповідному і-му поясі.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нерівномірність зношування кілець компресійних залежно від їх розташування на поршні оцінюється коефіцієнтами  $X_1 - X_3$  (рис. 3.6):

$$X_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta_4}, \quad X_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_4}, \quad X_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_4}, \quad (3.7)$$

де  $\Delta_1 \dots \Delta_4$  – відповідно величина зносу першого, другого, третього та четвертого кілець у вибраних місцях вимірювання.

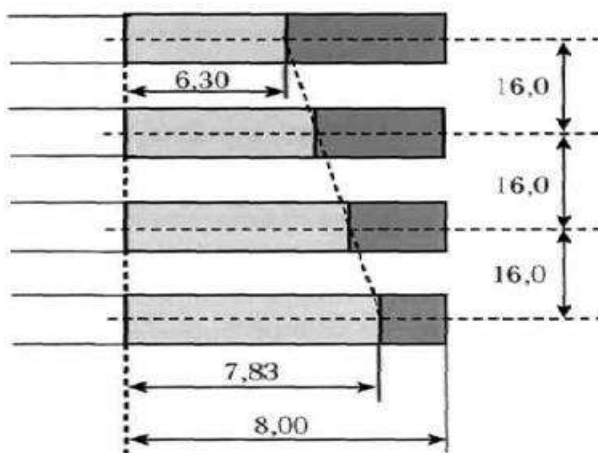


Рисунок 3.6 – Нерівномірність зношування кілець залежно від їхнього розташування на поршні.

З урахуванням геометричних параметрів, конструктивних особливостей кільця та форми його зношування можна виділити декілька характерних інтервалів втрати матеріалу. Так, об'єм бронзи, що зношується з кільця, визначається за формулою (3.8), а об'єм зношеного чавуну – за формулою (3.9):

$$V_{бр} = 2,827 \left( \Delta^{(3)} N_1 + \Delta^{(3)} \right) \cdot \left( \frac{d_k}{2} - \frac{\Delta^{(3)} + \Delta^{(3)} N_1}{4} \right) + \quad (3.8)$$

$$+ 2,827 \left( \Delta^{(3)} N_1 + \Delta^{(3)} N_2 \right) \cdot \left( \frac{d_k}{2} - \frac{\Delta^{(3)} N_1 + \Delta^{(3)} N_2}{4} \right)$$

$$V_{\text{взе}} = \frac{\Delta^{(3)}}{4\text{tg}1} (N_1^2 + N_2^2) \cdot \left( \frac{d_k}{2} - \frac{\Delta^{(3)} (N_1 + N_2)}{3} \right) \cdot 2\pi + \frac{\Delta^{(3)}}{4\text{tg}1} (N_1^2 + 1) \times$$

$$\times \left( \frac{d_k}{2} - \frac{\Delta^{(3)} (N_1 + 1)}{3} \right) \cdot 2\pi, \quad (3.9)$$

де  $\delta$  – величина зазору в замку кільця, мм;  $d$  – діаметр кільця, мм;  $D$  – діаметр калібру, мм.

Таким чином, наведені аналітичні вирази свідчать, що при оцінюванні зносу контрольованих деталей дизельного двигуна в експлуатаційних умовах можна застосовувати два підходи:

1) емпіричні залежності, які безпосередньо відображають взаємозв'язок між величиною зносу та напрацюванням (їх доцільно використовувати для елементів двигуна з високим рівнем надійності та довговічності);

2) теоретичні (модельні) залежності, що встановлюють кореляцію між концентрацією продуктів зношування в картерному маслі та фактичним зносом деталей у відповідних площинах і поясах вимірювання.

Другою ключовою задачею методики є визначення обсягів металу, втраченого деталями двигуна на основі поточних даних про концентрацію продуктів зносу. Особливість цього завдання полягає в тому, що на результат впливають не тільки процеси надходження частинок у мастило, але й їхнє вилучення внаслідок фільтрації, згорання та зміни кількості масла під час експлуатації. Це зумовлює коливання інтегральної концентрації продуктів зносу.

Для розрахунку сумарного обсягу зношеного металу за вимірними концентраціями створено математичну модель, яка враховує:

- осадження продуктів зносу на внутрішніх поверхнях картера та трубопроводів;
- кількість металу, наявного у маслі на момент контролю;
- втрати, зумовлені чадом і витіканням через нещільності;

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- частку, утриману масляними фільтрами;
- кількість металу, вилученого разом із заміною масла.

Розрахунок кожного з наведених компонентів виконується з урахуванням результатів контролю концентрацій, обсягу доливань і замін масла, а також конструктивних характеристик системи змащування дизеля. Отриманий сумарний обсяг зносу додатково розподіляється між окремими групами деталей. Алгоритм цього розподілу є одним із найбільш складних у моделі та формується індивідуально для кожного типу двигуна на основі даних про хімічний склад матеріалів деталей.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

## 4 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ.

### 4.1 Оптико-емісійний багатofункціональний спектрометр МФС-12.

У даній дипломній роботі розглядається сучасний оптико-емісійний спектрометр для елементного аналізу — МФС-12. Це один із новітніх приладів серії МФС. МФС-12 поєднує кращі технічні рішення попередніх моделей із сучасними розробками, завдяки чому вирізняється компактністю, надійністю та високою точністю [15, 16].

Основною перевагою спектрометрів даної серії є можливість роботи з великою кількістю різноманітних зразків. МФС-12 (рис. 4.1) призначений для аналізу порошків, чорних і кольорових металів різної форми, а також інших матеріалів. Прилад не потребує продування аргоном, що значно спрощує його використання.



Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд спектрометра МФС-12.

Конструкція пристрою базується на поєднанні сучасних інженерних рішень і перевірених компонентів, що забезпечує відповідність вимогам ДСТУ та іншим нормативним документам щодо точності та діапазону вимірювань. Саме тому МФС-12 є ефективним інструментом для елементного аналізу матеріалів.

Прилад офіційно внесений до Державних реєстрів засобів вимірювальної техніки України.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптична система побудована за схемою Пашена-Рунге з діаметром кола Роланда 0,5 м. Для збереження стабільності спектра всі оптичні елементи (рис. 4.2) розміщені на єдиній платформі з високою теплопровідністю.

У ролі приймачів випромінювання використовуються лінійні CCD-детектори. Оригінальна конструкція їх розташування (рис. 4.3) без «мертвих зон» дозволяє реєструвати повний спектр у всьому робочому діапазоні. На відміну від фотопомножувачів, які фіксують окремі лінії, така система забезпечує можливість комплексного аналізу широкого спектра матеріалів на одному приладі.



Рисунок 4.2 – Оптичні елементи



Рисунок 4.3 – Детектор

Конструкція штатива спектрометра забезпечує можливість дослідження різних типів проб, зокрема:

- стрижнів;
- зразків довільної форми у вигляді шматків;
- розчинів після процедури випаровування;
- порошкоподібних матеріалів (руди, оксидів, феросплавів, шлаків).

Для зниження впливу нагрівання на точність вимірювань у приладі застосована закрыта система водяного охолодження.

Джерело збудження спектра являє собою стабільний генератор низьковольтної іскри з цифровим регулюванням. Воно дозволяє налаштовувати амплітуду та форму струму в розряді, а також частоту та тривалість імпульсів у широкому діапазоні. Завдяки цьому забезпечується

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливість проведення елементного аналізу широкої групи металів, сплавів і неметалевих матеріалів.

Керування параметрами генератора здійснюється за допомогою комп'ютера, що дає змогу:

- автоматично встановлювати параметри генератора при виборі відповідної аналітичної програми;
- обирати оптимальні характеристики розрядного контуру та частоту імпульсів;
- додатково регулювати фронт розрядного імпульсу;
- змінювати режими роботи розряду в межах одного аналізу (до 5 режимів, включно з етапом випалу).

Завдяки цим можливостям підвищується точність вимірювань і розширюється функціональність спектрометра.

Система реєстрації відповідає за управління вузлами приладу, контроль його стану, а також збір і обробку аналітичних сигналів. Використання сучасної електронної бази дозволило суттєво зменшити габарити обладнання та знизити його енергоспоживання. Передача зареєстрованого спектра (приблизно 40 000 точок) здійснюється через високошвидкісний USB-інтерфейс практично без затримки.

Основні технічні характеристики приладу МФС-12 наступні [17]:

- 1) Штатив: універсальна конструкція для аналізу зразків різної форми та порошоків, без потреби в продуванні аргоном;
- 2) Оптична система: схема Пашена–Рунге з колом Роуланда діаметром 0,5 м, робочий спектральний діапазон – 190–425 нм;
- 3) Джерело збудження: низьковольтна іскра з цифровим керуванням.
- 4) Приймачі випромінювання: 10 лінійних CCD-детекторів по 3648 пікселів кожен;

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4.2 Програмне забезпечення приладу МФС-12.

Спектрометр функціонує під управлінням персонального комп'ютера типу IBM-сумісного. Для керування використовується зручне програмне забезпечення «Win CCD», яке забезпечує інтуїтивний інтерфейс, дає змогу виконувати калібрування приладу та отримувати результати вимірювань без попередньої спеціальної підготовки [17]. Крім основних операцій, програма має широкий набір інструментів для роботи зі спектрами. Робочий процес починається з реєстрації зразка (рис. 4.4). У базі програми збережено спектри еталонних матеріалів (рис. 4.5).



Елемент	Ср.	%	1	2	3
Основа	59.2299	0.1320	59.2934	59.1007	59.2956
5   Fe	56097	0.2569	56111	56268	55914
5   C	0.1990	1.0129	0.1973	0.2007	0.1959
5   Si	0.8616	0.2590	0.8597	0.8604	0.8648
5   Mn	0.3794	0.4472	0.3784	0.3816	0.3781
5   Cr2	17.4564	0.2457	17.4015	17.5062	17.4614
5   Ni2	9.8121	0.5922	9.8175	9.8004	9.7384
5   S	0.0066	1.6071	0.0066	0.0068	0.0065
5   P	0.0120	1.4770	0.0118	0.0119	0.0122
5   Cu1	0.2367	0.2877	0.2365	0.2376	0.2360
5   Ti	0.9384	0.5267	0.9318	0.9437	0.9396
5   Al	0.0593	0.8975	0.0592	0.0600	0.0587
5   V	0.2145	0.2672	0.2141	0.2153	0.2142
5   Mo	0.2026	0.3938	0.2019	0.2017	0.2042
5   W	0.3125	0.5576	0.3103	0.3128	0.3145

Рисунок 4.4 – Фрагмент реєстрації зразка.

Програмний пакет «Win Quant» є більш потужним засобом керування спектрометрами та обробки результатів аналізу. Він зберіг усі можливості попередніх версій і водночас отримав нові функції. Завдяки поєднанню багатофункціональності, універсальності та простоти у використанні, Win Quant виступає ефективним інструментом для створення методик аналізу та проведення досліджень.

«Win Quant» може працювати як у зв'язці з приладом, так і автономно, що дозволяє знайомитися з можливостями програми або опрацьовувати вже отримані дані без підключення спектрометра.

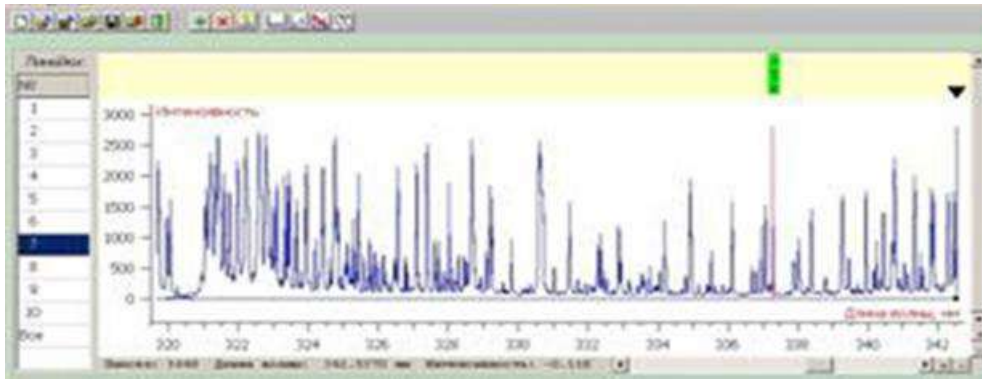


Рисунок 4.5 – Фрагмент спектру зразка еталонного (154-2) у діапазоні 320...342 нм.

Програмне забезпечення забезпечує :

- 1) автоматичне визначення марки сплаву за результатами вимірювань
- 2) автоматизоване керування та контроль технічного стану приладу;
- 3) інтерактивну роботу користувача з комп'ютером;
- 4) автоматичну обробку сигналів: усереднення даних, оцінку похибки, побудову оптимальних регресійних моделей калібрувальних кривих, врахування фону, розведення матриці та міжелементних впливів; графічне відображення калібрувальних залежностей (рис. 4.6), розрахунок похибки, автоматичну корекцію калібрування, перехід від інтенсивностей сигналу до концентрацій;
- 5) формування архівів результатів аналізів (рис. 4.7);
- 6) необмежену кількість аналітичних методик, базу сплавів, стандартних зразків і допустимих відхилень.

До основних особливостей Win Quant належать:

- можливість доповнення методики новими елементами;
- можливість визначення одного елемента за кількома спектральними лініями залежно від його концентрації з автоматичним переходом між ними;
- збереження всіх вимірювань у абсолютних значеннях, що дозволяє без повторної реєстрації добирати порівняльні лінії;

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

- різні способи коригування калібрувальних кривих для оптимізації під конкретне завдання;
- постійне вдосконалення і розширення функціоналу програми.

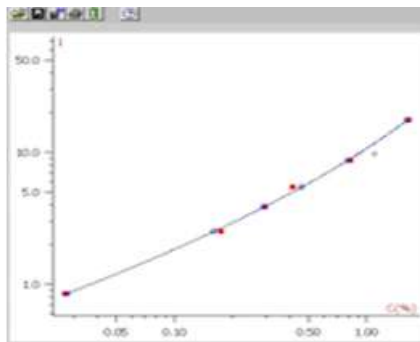


Рисунок 4.6 – Калібрувальна крива для вуглецю в низьколегованих сталях.

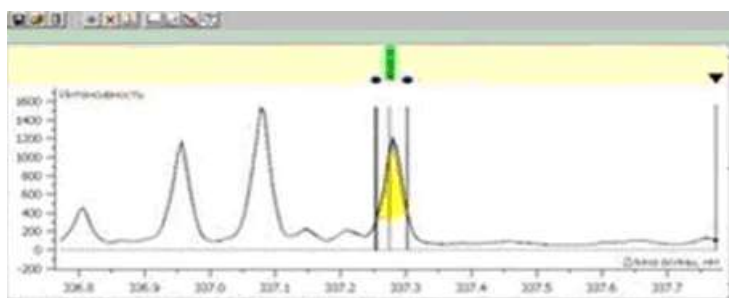


Рисунок 4.7 – Вигляд аналітичної лінії титану 327,3 нм у зразку сталі 154-2.

Програма «Win CCD» забезпечує:

- побудову калібрувальних залежностей у лінійному або логарифмічному масштабі, з урахуванням міжелементних впливів і складу основи;
- реєстрацію спектра зразка в усьому робочому діапазоні приладу, якісний аналіз невідомих матеріалів і деталізацію окремих спектральних ліній;
- корекцію результатів із урахуванням впливу фону та сусідніх ліній;
- вибір спектральних ліній для кількісного аналізу з урахуванням нормативних рекомендацій і власних досліджень;
- автоматичне визначення марки матеріалу за результатами аналізу.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

## ВИСНОВКИ

1) Діагностика сучасних дизельних двигунів, а також їхніх окремих систем, зазвичай потребує значно більше часу порівняно з бензиновими аналогами. Для точного визначення несправностей необхідне поєднання спеціалізованого обладнання та високої кваліфікації спеціаліста. Навіть за наявності такої бази нерідко доводиться застосовувати додаткові специфічні методи перевірки.

2) Серед найефективніших способів контролю стану двигуна за складом мастильного матеріалу виділяють методи спектроскопії та феррографії. Результати досліджень доводять, що їх поєднане використання дає змогу оцінювати інтенсивність зношування деталей залежно від напрацювання, визначати зону виникнення дефектів і встановлювати характер зносу. Це підкреслює практичну цінність методу як у технічній діагностиці, так і в наукових дослідженнях, зокрема при вивченні впливу присадок та триботехнічних складів.

3) Найбільш достовірні результати отримують у разі аналізу щонайменше чотирьох проб мастила. Такий підхід дозволяє відслідковувати зміни його властивостей і оцінювати залишкову працездатність. Якщо параметри змінюються поступово та закономірно, двигун вважається справним. Ознакою ж несправності є різке чи нетипове відхилення хоча б одного з показників моторного масла.

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Діагностика мехатронних систем автомобіля : підручник / Ю. М. Бороденко, О.А. Дзюбенко, О.М. Биков. Харків : ХНАДУ, 2016. – 320 с.
2. Основи мехатроніки : навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 372 с.
3. Комп'ютерна діагностика механічних систем автомобіля : навч. посіб. / Ю.М. Бороденко, О.А. Дзюбенко. LAP LAM-BERT Academic Publishing, 2018. – 321 с.
4. Сучасні електромехатронні комплекси і системи : навч. посібник / Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, О. С. Козлова, Н. П. Лукашова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 116 с.
5. Діагностика електрообладнання автомобілів : навч. посіб. / Ю. М. Бороденко, О.А. Дзюбенко, О.М. Биков. Харків : ХНАДУ, 2014. – 230 с.
5. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. – Чинний від 1996–01–01. – Київ : Держстандарт України, 1994. – 23 с.
6. Голобородько О. О. Механотронні системи автомобільного транспорту : навч. посіб. / О. О. Голобородько, В. В. Редчиць, О. М. Коробочка. – Харків : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 300 с.
7. Волков В.П. Діагностика Мехатронних систем автомобілів. / В.П. Волков, А.В. Міщенко // ВІСНИК ЖДТУ № 3 (46). – 2008. – 44-48 с.
8. Електронне та мікропроцесорне обладнання автомобілів: навч. посіб. / Ю.І. Пиндус, Р.Р. Заверуха. – Тернопіль: ТНТУ, 2016. – 209 с.
9. Roylance V. J.(2005). Ferrography-then and now. *Tribology International*, 38(10), 857–862. (<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.007>)

					КВРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

10. Grimmig, R. (2021). Analyses of used engine oils via atomic spectroscopy. *Spectroscopy Europe*, 33(1), 6–10. Retrieved from. (<https://www.spectroscopyeurope.com/>)

11. Wolak, A., Wójcik, M., Górny, M., & Węgrzyn, T.(2020). FTIR analysis and monitoring of used synthetic oils. *Materials Research Proceedings*, 15, 33–38. (<https://doi.org/10.21741/9781644901151-6>)

12. Liu, Z., Ma, Y., Zhang, Y., & Zhu, Y. (2021). A lubricating oil condition monitoring system based on wear debris detection and spectrum analysis. *Sensors*, 21(3), 756. (<https://doi.org/10.3390/s21030756>)

13. Han, W., Wang, Z., Zhao, Y., & Zhou, J. (2023). A critical review of on-line oil wear debris particle detection techniques. *Sensors*, 23(7), 3542. (<https://doi.org/10.3390/s23073542>)

14. Kholodov, A. (2021). Motor oil spectral analysis for engine life-time prediction. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 93, 63–69. (<https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.93.0.63>)

15. Корчак Б.О. Зміна складу та властивостей мінеральної моторної оливи після її експлуатації / Б. О. Корчак, О. Б. Гринишин, Т. І. Червінський // Науковий вісник НЛТУ України. - 2017. - Вип. 27(6). - С. 93-97.

16. Kohut A, Villy LP, Jönsson L, Megyeri D, Galbács G, Messing ME, Geretovszky Z. (2025). Gold–silver alloy nanoparticle formation via spark ablation: the dynamics of material mixing. *Nanoscale Advances*, *Nanoscale Adv.* 7, 3322–3330. DOI:10.1039/D4NA01076K

17. Федоряченко С. О. Застосування спектрального аналізу моторного мастила для прогнозування залишкового ресурсу двигунів / Федоряченко С. О., Зіборов К. А., Луценко І. М., Перков Є. С., Холодов А. П., Ужва Р. М. // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету : зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т ; редкол.: А. Г. Батракова (гол. ред.) та ін. – Харків, 2021. – Вип. 95. – С. 138–142.

					КВРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

ДОДАТКИ

					КвРМТВА. 21153.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84