

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно–технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ” 2025 р.
Зав. кафедри професор
(науковий ступінь, вчене звання)
В.В.Дідур
(підпис) (ініціали, прізвище)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломної роботи
магістр
(освітній рівень)

**тема роботи: «Дослідження технології діагностування технічного стану
автотракторних двигунів з обґрунтуванням параметрів віброакустичного
методу»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м–ім
освітньої програми магістр
спеціальності Н7
«Агроінженерія»
Атаманчук
(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент, Петриченко Є.А.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно–технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ магістр _____
Спеціальність _____ Н7 «Агроінженерія» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____
_____ **В.В. Дідур**
“ ____ ” _____ **2025 р.**

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

студенту _____ **Атаманчуку Анатолію Анатолійовичу** _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження технології діагностування технічного стану
автотракторних двигунів з обґрунтуванням параметрів віброакустичного методу»
керівник роботи _____ **доцент Петриченко Є.А.** _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
«14» листопада 2025 р. № 01–06/261 _____

2. Строк подання студентом роботи _____ **25.11.2025 р.** _____

3. Вихідні дані до роботи: способи зниження коливань машинно–тракторних
агрегатів; літературні джерела; шляхи підвищення тягово–зчіпних показників
колісних тракторів.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

- узагальнити наявні підходи до діагностики та обґрунтовано найбільш результативні з них;
- виконати теоретичні та експериментальні дослідження коливальних процесів, що виникають у двигуні внаслідок зношування або розрегулювання;
- визначити інформативні вібраційні ознаки таких відхилень

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи: мета і завдання дослідження; конструктивне рішення встановлення здвоєних коліс на тракторі ХТЗ–242К; показники економічної ефективності;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		
Техніко–економічне обґрунтування	Петриченко Є.А., доцент		

7. Дата видачі завдання 23 квітня 2025 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При– мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	30.04.2025 р.	
2.	Розділ 1.	14.05.2025 р.	
3.	Розділ 2.	28.05.2025 р.	
4.	Розділ 3.	11.06.2025 р.	
5.	Розділ 4.	25.06.2025 р.	
6.	Розділ 5.	24.09.2025 р.	
7.	Виконання ілюстративної частини роботи	23.10.2025 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	25.11.2025 р.	

Студент

(підпис)

Атаманчук А.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Петриченко Є.А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота присвячена впровадженню віброакустичного моніторингу для діагностування технічного стану механізмів і деталей дизельних двигунів. Узагальнено наявні підходи до діагностики та обґрунтовано найбільш результативні з них. Виконано теоретичні та експериментальні дослідження коливальних процесів, що виникають у двигуні внаслідок зношування або розрегулювання, і визначено інформативні вібраційні ознаки таких відхилень. Структура роботи охоплює пояснювальну записку обсягом 69 сторінок та ілюстративний матеріал у форматі 12 презентаційних слайдів.

Ключові слова: ресурсоощадність; технічна діагностика; організація ТО і ремонту; вібрації; віброакустичний моніторинг; дизельний двигун; колювання; знос; розрегулювання; система технічного обслуговування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1. Коротка характеристика підприємства.....	9
1.2. Аналіз методів та способів діагностування	12
1.3. Обґрунтування ефективних методів діагностування агрегатів мобільних сільськогосподарських машин	23
1.4. Об'єкт дослідження та його характеристика.....	26
1.5. Висновок та задачі досліджень	29
2. ТЕОРИТИЧНА ЧАСТИНА	31
2.1. Аналіз надійності двигунів та кількісна оцінка дефектів і відмов нових і відремонтованих автотракторних двигунів	31
2.2. Динаміка двигуна та формування вібрацій в зоні циліндрів	39
3. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	44
3.1. Обладнання та методика проведення досліджень.....	44
3.2. Дослідження спектру сигналу від довжини реалізації.....	46
3.3. Визначення діагностичних ознак кривих віброприскорення в залежності від роз регулювань паливної апаратури.....	48
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	51
4.1. Огляд служби охорони праці підприємстві	51
4.2. Дослідження виробничого травматизму	52
4.3. Заходи поліпшення умов праці на підприємстві	53
5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	56
ВИСНОВОК.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63

ВСТУП

У сільськогосподарському виробництві питання підвищення надійності машин та агрегатів і забезпечення їхньої працездатності має винятково важливе значення. Це зумовлено тим, що трактори, комбайни та інші сільськогосподарські машини функціонують у живому, динамічному середовищі, параметри якого постійно змінюються. Відтак вузли й механізми безперервно реагують на ці зміни, що прискорює зношування деталей, спричиняє відмови та поломки агрегатів у цілому.

Попри те, що сучасні машини характеризуються підвищеним рівнем надійності (особливо зарубіжного виробництва), відмови все ж трапляються доволі часто. Більшість імпортованих тракторів і комбайнів уже мають у середньому близько 12 років напрацювання, тож вони ламаються, зокрема й у післяремонтний період [1, 2]. Додатково, Україна нині забезпечена зернозбиральними комбайнами приблизно на 50 %, унаслідок чого наявні машини змушені виконувати подвоєні обсяги робіт, що також негативно впливає на їхню надійність [3].

На жаль, в Україні майже відсутні підприємства з повним циклом капітального ремонту машин; наявні виробництва переважно виконують відновлення окремих агрегатів. Вартість повнокомплектного капітального ремонту є високою, тож більшість власників свідомо обмежуються ремонтом лише того вузла, який відмовив. Такий підхід знижує загальну надійність, адже вона визначається надійністю «найслабшого» елемента.

Виявлення несправностей і локалізація ненадійного елемента належать до завдань технічної діагностики.

Діагностування машин за вібраціями охоплює кілька напрямів, що розвиваються неоднаковими темпами. Частина методів спирається на аналіз коливань агрегату або його вузлів у неробочому стані. Для збудження коливань застосовують спеціальні джерела з відомими характеристиками; об'єктом дослідження й джерелом діагностичної інформації слугують властивості коливальної системи. До таких підходів належать: акустична дефектоскопія, що використовує ультразвукові збудники та аналізує поширення і поглинання хвиль у простих металевих конструкціях; а також модальний аналіз – дослідження форм і швидкості загасання

коливань на різних, переважно резонансних, частотах.

Водночас більшість сучасних методів ґрунтується на аналізі вібрацій працюючих машин –це основа функціональної (робочої) діагностики. Вона враховує широкий спектр режимів: сталих (номінальних або спеціальних) і перехідних, зокрема пускових та імпульсних. У цьому підході інформацію «знімають» одночасно з характеристик збуджувальних сил та параметрів коливальної системи. Оскільки до початку аналізу зазвичай відсутні точні дані і про збуджувальні сили, і про саму систему, найвищу результативність забезпечують більш складні алгоритми, здатні одночасно оцінювати параметри сил і властивості системи.

Багаторічні дослідження вібрацій різного обладнання показують, що структура збуджувальних сил є складною; описувати її лише лінійними моделями зазвичай недостатньо. Навпаки, врахування нелінійних механізмів формування коливань суттєво підвищує інформативність щодо стану вузлів –джерел цих сил. Саме тому часто постає потреба розробляти вузькоспеціалізовані методики та алгоритми оброблення сигналів вібрації для пошуку конкретних дефектів у конкретних типах машин.

Вібрація, виміряна в контрольних точках працюючої машини, є сумарним результатом дії коливальних сил у різних вузлах на механічну систему з різними передавальними характеристиками від кожного джерела до кожної точки контролю. У загальному випадку збуджувальні сили складаються з періодичних, випадкових і ударних компонент, а передавальні характеристики описуються амплітудно- та фазо-частотними функціями. Максимально повну діагностичну інформацію можна отримати, якщо розділити сигнал на ці складові й аналізувати кожну окремо з урахуванням передавальних властивостей системи. На практиці це завдання настільки складне, що зазвичай розглядають окремі типові випадки.

Найбільше невирішених питань виникає у середньочастотній області, де співмірний внесок вносять періодичні, випадкові та ударні складові, а коливальна система має численні резонанси з високою добротністю. Це особливо характерно для поршневих машин, у яких ударні сили максимальні. Складність аналізу середніх частот ускладнює діагностику компактних високотомущностних агрегатів

(наприклад, авіадвигунів), де через недоступність ключових вузлів, передусім підшипників, неможливо безпосередньо виміряти високочастотні вібрації й своєчасно виявити зародження низки дефектів.

Попри зазначені труднощі, розвиток вібраційної діагностики таких машин цілком реальний. Для збільшення обсягу діагностичної інформації зі складних сигналів необхідно опановувати більш досконалі методи аналізу. На користь цього шляху свідчить і багаторічна практика: досвідчені діагности у звуковому діапазоні нерідко залучають слух для якісного розрізнення навіть слабких ударних складових на тлі інтенсивних стаціонарних компонент.

Отже, прогрес у вібраційній діагностиці значною мірою визначається коректним вибором комплексу методів і засобів оброблення сигналів, адаптованих до конкретного класу машин та умов їхньої роботи. У зв'язку з цим доцільно надавати стислий, але змістовний огляд методів аналізу, що застосовуються у вібраційній діагностиці, та сфер їх ефективного використання.

1. ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Коротка характеристика підприємства

Підприємство виконує широкий спектр робіт для агровиробників: зводимо елеватори, ангари, овочесховища та інші об'єкти.

Надаємо такі загальнобудівельні послуги:

- земляні роботи (розробка ґрунту, розбивка та планування території, геодезичний супровід);
- монолітні бетонні й залізобетонні роботи (влаштування фундаментів, каркасів будь-якої складності, монолітних стін, обв'язувальних поясів, перекриттів, промислових майданчиків і доріг);
- пальові роботи (буроін'єкційні палі);
- мурування стін і перегородок;
- покрівельні роботи;
- фасадні роботи.

Окрім використання власного парку на об'єктах, компанія надає будівельну спецтехніку в оренду. Під час передачі техніки в оренду ЮВСК:

- забезпечує орендаря кваліфікованим персоналом на весь строк роботи;
- виконує сервісне обслуговування техніки;
- надає проектний супровід;
- готує необхідну дозвільну документацію.

Рухомий склад підприємства включає 58 автомобілів та 25 одиниць тракторної й спеціалізованої техніки (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1- Рухомий склад підприємства

№	Марка	Кількість, шт
1	МАЗ 6429	6
2	КамАЗ 6520	14
3	КрАЗ 65055-060-02	12
4	ГАЗель 3302	15

5	ГАЗ 53	4
6	ЗИЛ 130	4
7	Автокран Zoomlion QY30V 32 т	3
8	Komatsu D355	5
9	MTЗ-82	6
10	Навантажувач Hyundai HSL 850-7	5
11	Екскаватор Hyundai R110-7	5
12	Бурова установка SANY SR250M	4

Компанія володіє значною земельною ділянкою площею 12 000 м², на якій розміщені виробничі будівлі та автопарк. Геометричні розміри ділянки становлять 100 × 120 м.

Окрім будівельно-монтажної діяльності, підприємство здійснює реалізацію електроприладів –від кабельно-провідникової продукції до потужних електродвигунів для ліфтів та іншого промислового обладнання.

У структурі компанії функціонує підсобне господарство як відокремлений підрозділ підприємства. Підприємство розташоване у східній частині Павлоградського району Дніпропетровської області. Центральна садиба міститься в селі Нова Дача, за 40 км від районного центру та за 15 км від найближчої залізничної станції м. Тернівка.

Другий виробничий напрям спеціалізується на вирощуванні зернових і технічних культур: пшениці, ячменю, кукурудзи та соняшнику.

Матеріально-технічна база господарства.

Автотракторний парк налічує 17 тракторів, 5 зернозбиральних комбайнів, 13 вантажних автомобілів і повний комплект необхідних сільськогосподарських знарядь. Зведений перелік марок і моделей машинно-тракторного парку наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Склад машинно-тракторного парку підприємства

Марка машини	Кількість, шт.
ТРАКТОРИ	
К-700	1
Т-150 (1 трактор з двигуном Камінз)	2
МТЗ-80/82/892	3/8/2
Atles-946	1
КОМБАЙНИ	
ДОН-1500	1
CLAAS mega 360	2
CLAAS medion 310	2
АВТОМОБІЛІ	
КамАЗ	2
ГАЗ-53	9
КрАЗ	2
ВАЗ (НІВА)	1
УАЗ	1
ПЛУГИ	
ПЛН-8-35	1
ПЛН-5-35	8
ПЛН-3-35	6

КУЛЬТИВАТОРИ	
КПС-4	7
КРН-5,6	4
БОРОНИ	
БДТ-7	2
БЗСС-1	25
СІВАЛКИ	
СЗ-3,6	7
УПС-8	2
СУПН-8	4
МАШИНИ ДЛЯ ЗАХИСТУ РОСЛИН	
ОП-2000	1
Оприскувач PRIMUS 25/28	1

Аналіз машинно-тракторного парку свідчить, що господарство робить ставку на вітчизняну техніку віком понад 10 років. Такий вибір зумовлений порівняно низькою вартістю придбання, однак він потребує підвищеної уваги до системи технічного обслуговування та своєчасного ремонту наявних машин.

Разом із тим власних потужностей бракує, особливо у пікові періоди жнив. Тому для забезпечення ритмічності робіт підприємство додатково залучає автомобільний транспорт Дніпромехбудтрансу.

1.2. Аналіз методів та способів діагностування

До ключових експлуатаційних показників двигунів внутрішнього згоряння належать потужність, крутний момент і паливна економічність. У процесі роботи з часом змінюються регульовальні параметри, виникають несправності, що зазвичай проявляються падінням потужності та зростанням витрати палива [4–8].

Базовою причиною відмов елементів ДВЗ є зношування: порушується геометрія деталей, збільшуються зазори в трибосполученнях. Інтенсивність зношування визначається низкою чинників: манерою керування, умовами експлуатації, несвоєчасним або некваліфікованим техобслуговуванням, низькою якістю пально-

мастильних матеріалів, роботою з детонацією чи калильним запалюванням, а також дефектами систем мащення та охолодження тощо [9, 10]. У підсумку зростають експлуатаційні витрати і погіршується робота агрегату. Тривала експлуатація зношеного двигуна веде до прогресуючих ушкоджень, а їх усунення потребує значних капіталовкладень.

Для своєчасного виявлення дефектів необхідне проведення діагностики. Важливо дотримуватися принципу «від простого до складного», послідовно перевіряючи потенційні причини – це скорочує час пошуку, витрати й мінімізує ризик помилок.

Існує широкий набір безрозбірних методів діагностування ДВЗ [3]. Зокрема:

1. Тепловий контроль. Метод ґрунтується на вимірюванні, моніторингу й аналізі температурних полів контрольованих об'єктів. Процеси тепловіддачі та теплообміну зумовлюють відхилення температури об'єкта від температури довкілля; просторовий розподіл температур на поверхні містить відомості про інтенсивність теплопередачі, особливості внутрішньої структури та приховані дефекти. Для отримання детальних термограм працюючих агрегатів застосовують мобільні тепловізійні камери (рис. 1.1).

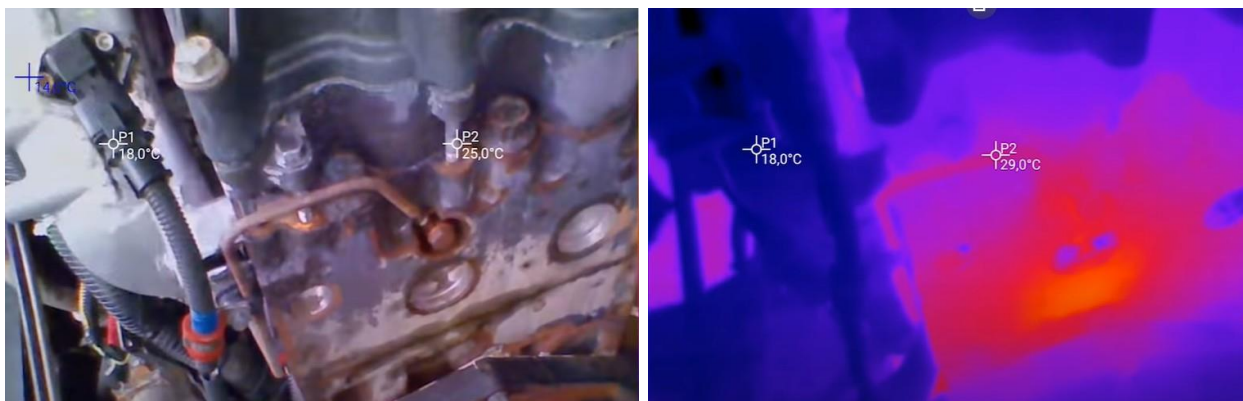


Рисунок 1.1 – Тепловізійна діагностика

2. Комп'ютерна діагностика. Передбачає під'єднання зовнішнього ПК (мотор-тестера/сканера) до електронного блока керування. За допомогою діагностичного інтерфейсу зчитують коди несправностей, а також поточні значення сигналів від датчиків і параметри, що опрацьовує контролер керування [4] (рис. 1.2).



Рисуно 1.2 – Комп'ютерна діагностика тракторного двигуна

3. Аналіз складу та об'єму відпрацьованих газів (ВГ). Дас змогу оцінити характер і умови перебігу процесу згоряння. За показниками компонентного складу та значенням коефіцієнта надлишку повітря роблять висновки щодо налаштування паливної апаратури, герметичності впуску/випуску та гранично допустимого зношування елементів ЦПГ. Отримані дані слугують індикатором втрат потужності й паливної економічності, а також ранніх дефектів у системах живлення та запалювання (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Аналіз відпрацьованих газів

4. Технічне ендоскопіювання. Використання ендоскопа для візуальної оцінки стану вузлів і деталей із утрудненим доступом без розбирання агрегату. Дає змогу оглядати камеру згоряння, клапани, поршень і стінки циліндра через сервісні отвори (зокрема, через гнізда свічок/форсунок), фіксувати нагар, задири, тріщини, ознаки перегріву та порушення герметичності [11] (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Ендоскопічний огляд циліндрів двигуна

5. Компресійна перевірка. Застосовується для контролю тиску наприкінці такту стиснення у бензинових ДВЗ легкових авто, вантажівок і мотоциклів. Вимірювання виконують на повністю прогрітому двигуні, встановлюючи компресометр у свічкові гнізда замість свічок запалювання. Отримані значення дають змогу оцінити герметичність ЦПГ і виявити відхилення між циліндрами (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Елементний аналіз зразків

6. Аналіз хімічних елементів. Методика спрямована на встановлення елементного складу твердих, порошкоподібних і рідких зразків, а також нашарувань на поверхнях і відкладень, зібраних на фільтрах. Для цього застосовують спектральні, рентгенофлуоресцентні та ICP-OES/ICP-MS методи. У контексті діагностики ДВЗ елементний аналіз дає можливість виявляти продукти зношування (Fe, Cu, Pb, Al тощо), забруднення пально-мастильних матеріалів, потрапляння охолоджувальної рідини та інші сторонні домішки, що слугують індикаторами стану агрегатів (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Віброакустична діагностика вузлів ДВЗ

7. Віброакустичний метод. Полягає у вимірюванні та подальшій обробці параметрів вібрації, що генеруються під час роботи контрольованого вузла/агрегату. Використовують акселерометри (часто з магнітними або різьбовими базами), датчики швидкості/переміщення та мікрофони для акустичних складових. Сигнал оцифровують із потрібною частотою дискретизації, після чого застосовують алгоритми аналізу: спектральний (FFT), огибаючу (envelope) для виявлення ударних компонент, трасування порядків (order tracking) на змінних обертах, кепстральний аналіз, спектрограму (STFT), оцінки пік-фактора/екцесу (kurtosis) тощо. Метод дозволяє ідентифікувати дефекти підшипників кочення, дисбаланс/розцентрування, знос зубчастих передач (сіткова частота та її бічні смуги), порушення фазування ГРМ, детонацію/пропуски займання, несправності форсунок і нерівномірність роботи циліндрів.

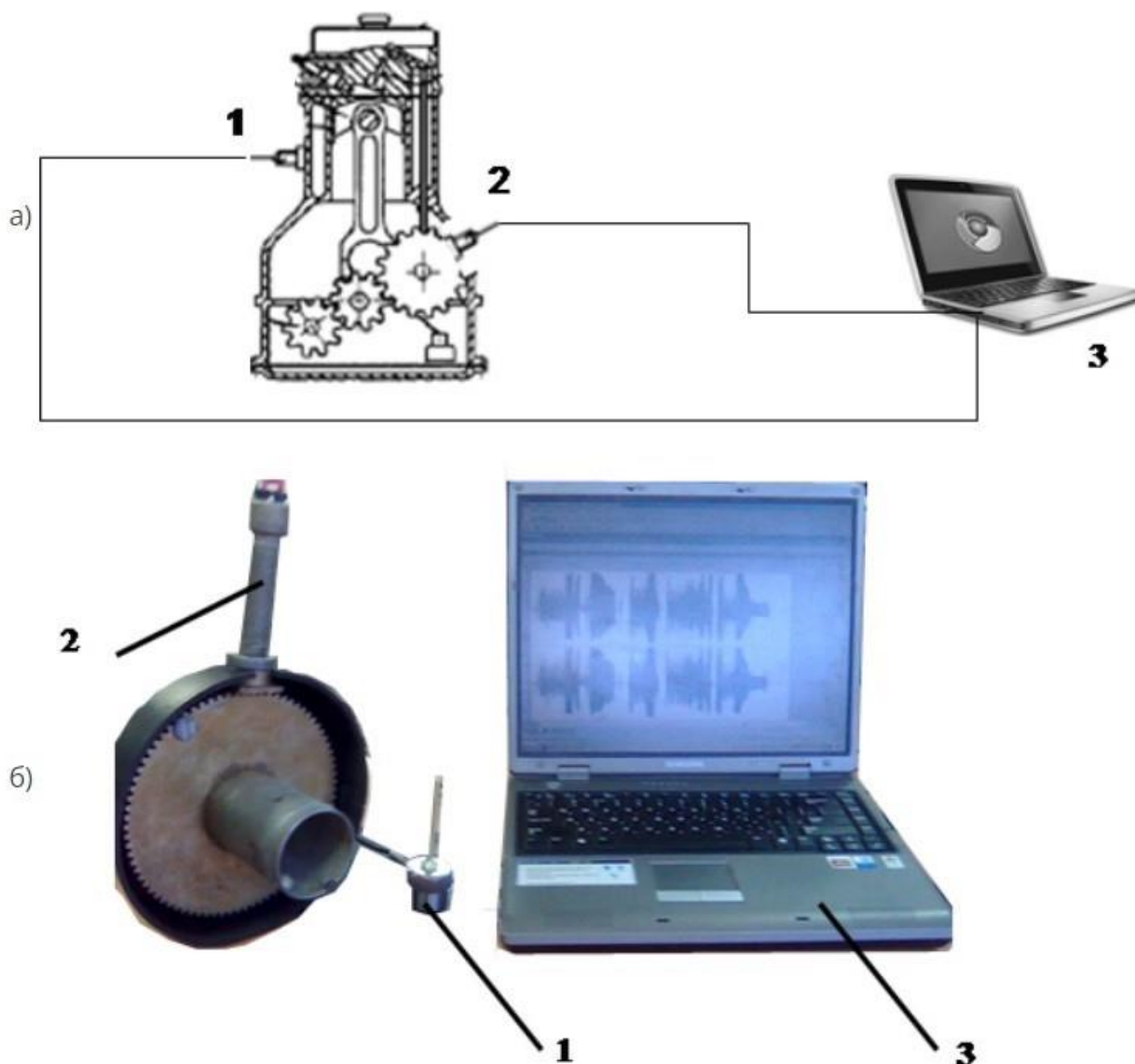


Рисунок 1.7 – Віброакустична діагностика

1 – датчик вібрації; 2 – датчик частоти обертання та положення поршня відносно ВМТ;
3 – ПЕОМ (портативна ЕОМ/реєстратор).

Безрозбірні методи технічної діагностики зарекомендували себе як універсальні й оперативні засоби комплексної оцінки стану ДВЗ. Порівняльні характеристики основних методів наведено нижче.

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз безрозбірних методів діагностування ДВЗ

Метод параметри	Тепловий контроль	Комп'ютерна діагностика	Аналіз ВГ	Технічне ендоскопіювання	Контроль компресії	Аналіз хімічних елементів	Віброакустичний
Вартість послуг, грн.	від 200 до 3500						
Устаткування вартість, грн.	Тепловізор від 13300	Сканер (Мотор-тестер) від 10000 (49750)	Газо-аналізатор від 12900	Відеоендоскоп від 1500	Компресіометр від 300	Спектрограф від 30000	Віброметри від 16000
Тривалість процедури ¹ , хв	від 10 - 30						
Інформативність	Висока	Висока	Середня	Висока	Мінімальна	Середня	Висока
Вимоги до персоналу	Середнє	Середнє	Мінімальні	Мінімальні	Мінімальні	Високі	Середнє

Проведений аналіз дає підстави сформулювати такі висновки щодо розглянутих методів:

1. Теплова діагностика. Метод є перспективним завдяки високій інформативності: сучасні тепловізійні засоби дають змогу безпосередньо виявляти

дефекти та навіть прогнозувати їх розвиток у процесі перевірки двигуна. Розвинені алгоритми оброблення ІЧ-зображень дозволяють ідентифікувати конкретні несправності. Недолік: для повної, еталонної перевірки часто потрібне зняття двигуна з ТЗ і випробування на стенді.

2. Комп'ютерна діагностика. Дозволяє за лічені хвилини отримати перелік виявлених відмов і визначити зони ризику, що можуть спричинити втрату експлуатаційних властивостей у майбутньому [8]. Висока точність знижує ймовірність помилок під час ремонту та мінімізує строки його виконання.

3. Аналіз відпрацьованих газів. Для однозначних результатів необхідні суворе дотримання методики та високоточні засоби вимірювання токсичних компонентів. Похибка у 0,2% за об'ємом може спричинити 15–20% помилку при визначенні маси компонента за їздовий цикл, тому апаратура має забезпечувати високу точність, швидкодію та безперервність аналізу.

4. Технічне ендоскопіювання. Дає високий рівень локальної інформативності; застосовані засоби контролю добре зарекомендували себе в експлуатаційних умовах, забезпечуючи наочне підтвердження дефектів.

5. Контроль компресії. Проводиться за наявності ознак відповідних відмов: знос або руйнування деталей ЦПГ, негерметичність клапанів, прогар прокладки ГБЦ тощо. Вимір компресії дозволяє підтвердити або спростувати попередні підозри щодо неполадок.

6. Елементний аналіз. Застосування обмежується потребою у спеціалізованому (хімічному) обладнанні та підготовці зразків/двигуна. Метод переважно відслідковує зношування певної деталі (чи групи), а роздільне одночасне визначення зносу кількох вузлів є складним.

7. Віброакустичний метод. Спирається на загальні принципи діагностики за непрямыми ознаками. Застосування обмежують умови доступу до вузлів, а також недосконалість вимірювальних засобів і моделей, що пов'язують структурні параметри з діагностичними індикаторами. Втім у низці випадків можливе кількісне оцінювання запасу працездатності вузлів за результатами аналізу віброакустичних сигналів, з прогнозуванням залишкового ресурсу.

Узагальнюючи, більшість розглянутих методів поодиноці мають обмежену інформативність: за окремими параметрами складно встановити точну першопричину дефекту. Різноманіття підходів пояснюється тим, що жоден метод не забезпечує 100% достовірності та повноти діагнозу –кожен несе специфічну, різноцінну інформацію. Комбінування кількох методів дає глибший контроль, але зазвичай потребує спеціальних умов і додаткового часу.

Для діагностики ДВЗ доцільно добирати параметри з максимальною інформативністю, які взаємно доповнюють і уточнюють один одного. Оцінювання їхнього інформаційного потенціалу нині є актуальним завданням.

Методи діагностування наведено на рис. 1.1.

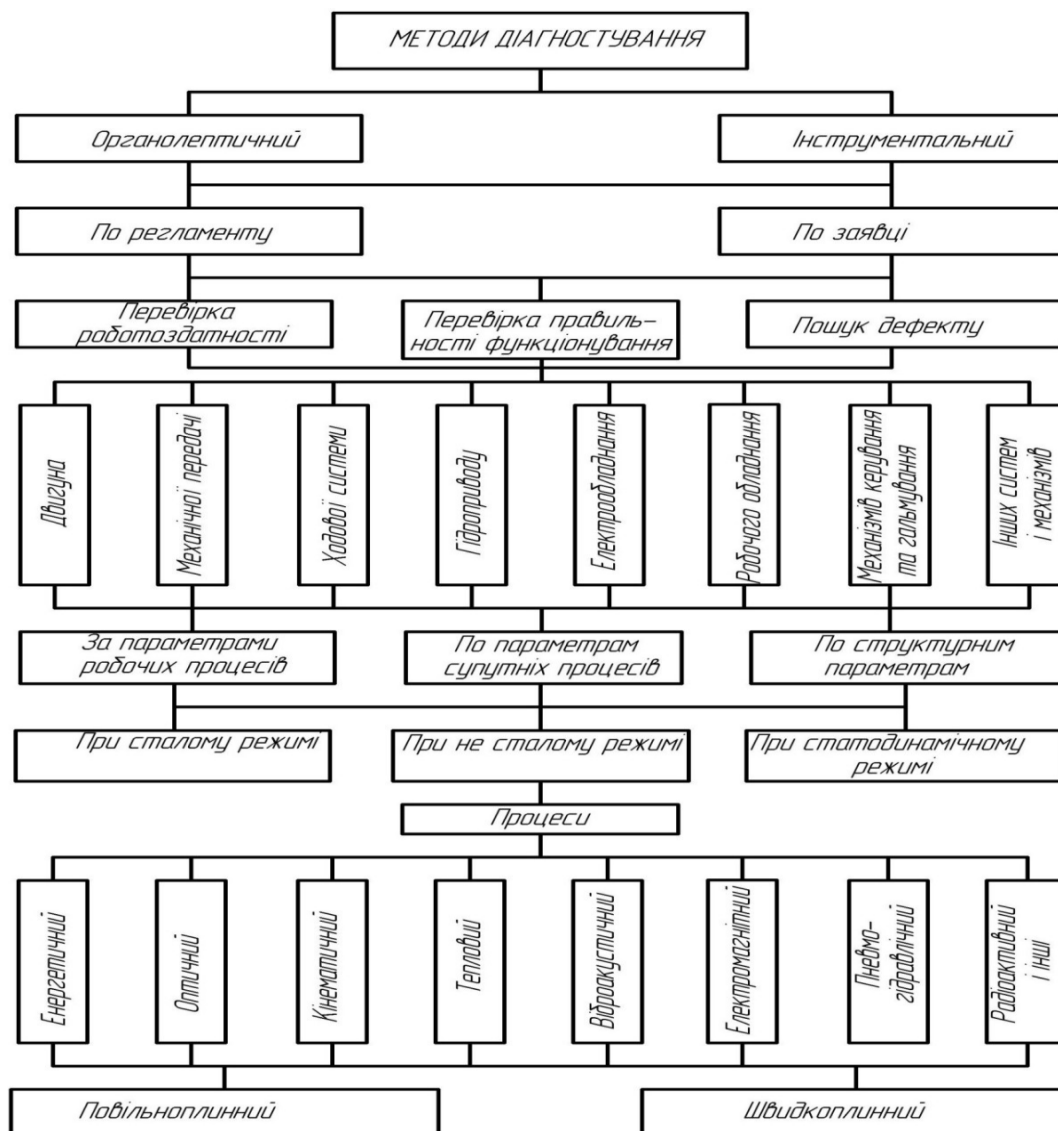


Рисунок 1.1 – Класифікація методів діагностування

Таблиця 1.4 – Класифікація діагностичних параметрів

Класи параметрів	Підкласи параметрів	Класифікаційні ознаки	Назва груп параметрів
1	2	3	4
Функціональні	-	За проявленням наслідків відхилень параметра від номінального значення За взаємозв'язком з роботоздатністю складових частин	СПОЖИВЧІ Внутрішньомашинні Узагальнені (багатопрічинні) Однопрічинні
Технічні	Прямі (структурні) Не прямі, не конструктивних складових частин Не прямі, конструктивних складових частин	За типом контролюючого параметру За типом контролюючого параметру По оцінюючий властивості механізму або системи За можливими наслідками відхилення параметра від ном. значення	Параметри робочих поверхонь. Зазори в спраженнях. Пружність, герметичність. Затягування, регулювання, рівні робочих рідин. Параметри герметичності робочих об'ємів, робочих процесів, вібрації та шуму Параметри безпеки, техніко-

			економічні параметри
--	--	--	-------------------------

Розглянемо засоби функціональної діагностики.

Відомий тип вологоміра працює за принципом реєстрації зміни тиску парів води в герметичній посудині з пробєю оливи під час її нагрівання. Основний недолік такого приладу – конструктивна й методична складність.

У Великій Британії запропоновано компактний датчик із джерелом світла та детектором, оптично екранованими один від одного. Датчик вводять через отвір для щупа рівня. Промінь, що проходить крізь синій світлофільтр, інтенсивно поглинається оливою, але відбивається від води; за рівнем відбитого сигналу, який реєструє детектор, роблять висновок про наявність води. Такі оптичні методи, як правило, забезпечують високу точність.

У цивільній авіації серійно застосовують прилад ПОЗ-Т для контролю чистоти авіаційного пального. Паливо пропускають через високопористий фільтрувальний матеріал, що затримує частинки розміром $\geq 2-3$ мкм. Для виявлення води фільтр попередньо обробляють високочутливими солями-індикаторами, які змінюють колір при контакті з водою. Аналогічні підходи нині адаптують і для контролю стану мастил.

Усі фізичні процеси в механізмах і системах машин супроводжуються коливаннями. У поршневому ДВЗ вібрації формуються як конструктивними елементами (кривошипно-шатунним і газорозподільним механізмами, системою живлення, вузлами впуску/випуску, процесом згоряння, допоміжними агрегатами), так і перебігом робочих процесів у них. Через неврівноваженість відцентрових та інерційних сил мас, що здійснюють поступальний і обертальний рух, двигун коливається відносно остова з частотами, кратними частоті обертання колінчастого вала. Найбільше діагностичне значення у віброакустичному аналізі мають пружні коливання, зумовлені ударними взаємодіями сполучених деталей [1, 14].

1.3. Обґрунтування ефективних методів діагностування агрегатів мобільних сільськогосподарських машин

У сільськогосподарському виробництві забезпечення надійності машин і агрегатів та підтримання їхньої працездатності має першорядне значення. Причина очевидна: трактори, комбайни й інші агромашини працюють у «живому» середовищі, параметри якого постійно змінюються. Вузли та механізми змушені безперервно адаптуватися до цих коливань, що прискорює зношування деталей і підвищує імовірність відмов та поломок агрегатів у цілому.

Попри загалом високий рівень надійності сучасних машин (зокрема іноземного виробництва), відмов уникнути не вдається. На полях імпорتنі трактори й комбайни вже давно не рідкість, однак середній вік такої техніки сягає 10...15 років, а отже, природне падіння надійності з часом неминуче, особливо у післяремонтний період [15, 16]. Додатковим чинником є недостатня забезпеченість країни зернозбиральними комбайнами (приблизно 50 %), через що наявні машини вимушені виконувати подвоєні обсяги робіт, що також негативно позначається на їхній надійності [17].

Окремою проблемою є майже повна відсутність в Україні підприємств, здатних виконувати капітальний ремонт повного циклу; наявні виробничі бази зазвичай відновлюють лише окремі агрегати. Висока вартість капітального ремонту повнокомплектної машини спонукає власників обмежуватися заміною/ремонтom лише вузла, що відмовив. Такий підхід знижує загальну надійність системи, оскільки вона визначається «найслабшою ланкою».

За результатами наших досліджень, у доремонтний період близько 70...75 % відмов пов'язано з людським фактором – діями власника або оператора (див. рис. 1.5) [18]. У післяремонтний період відбувається певний перерозподіл між експлуатаційними та технологічними відмовами, що пояснюється недостатньою культурою ремонту та якістю виконаних робіт.

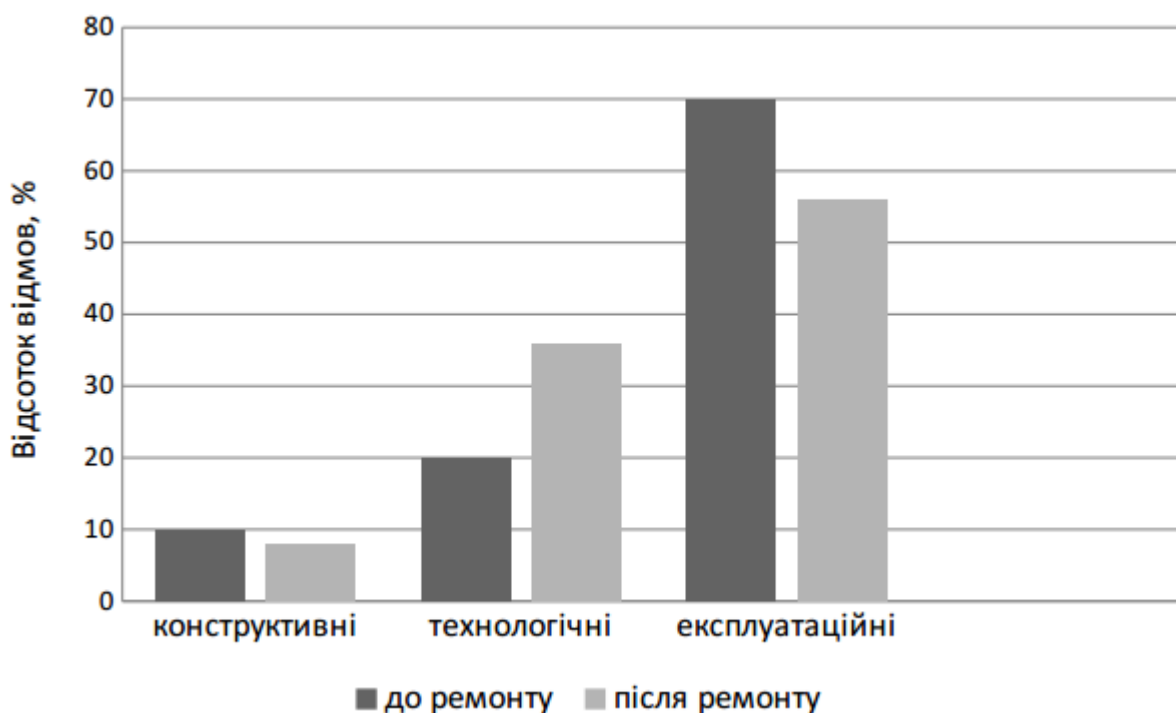


Рисунок 1.5 – Відмови машин

Усунення причин низької післяремонтної надійності в реальних умовах експлуатації можливе завдяки якісному та своєчасному виконанню робіт, передбачених планово-попереджуваною системою технічного обслуговування і ремонту [19]. Контроль належного виконання цих операцій покладається на систему діагностування агрегатів мобільних машин, головне завдання якої – оперативний пошук і локалізація несправностей.

За ресурсного та заявочного підходів діагностування визначають технічний стан ключових спряжень агрегатів, що насамперед зумовлюють втрату працездатності, а також оцінюють їх залишковий ресурс.

Проблематику діагностики машин і окремих вузлів висвітлено у працях І.А. Біргера, В.М. Михліна, Т.М. Башти, А.А. Камарова, Р.А. Макарова, Т.А. Сиріцина, А.М. Харазова, А.М. Шолама, П.М. Черейського та ін. Отримані результати залишаються актуальними й суттєвими для подальших досліджень. Водночас комплексна діагностика сільськогосподарської техніки, особливо з урахуванням сучасних технологій і вимірювальних засобів, розглянута недостатньо – це зумовлює потребу в продовженні досліджень.

Отже, питання діагностування агрегатів сільськогосподарських машин з

урахуванням загальних вимог і сучасних інструментів потребує подальшого опрацювання.

У практиці діагностики машин та їх елементів застосовують такі методи: візуально-вимірний контроль, віброакустичний аналіз, термодинамічні підходи, методи на основі аналізу гідродинамічних і перехідних процесів, а також вимірювання втрат і забрудненості робочої рідини, оцінку гідравлічної та механічної потужностей, пульсацій подачі тощо.

Віброакустичний метод діагностування

Віброакустична діагностика –це сукупність теорії та практичних методів організації розпізнавання технічних станів машин за інформацією, що міститься у віброакустичному сигналі. Під віброакустичним сигналом розуміють фізичні величини, які описують механічні коливання, що супроводжують роботу об'єкта. Параметри сигналу, пов'язані зі структурними характеристиками стану, виступають діагностичними індикаторами.

Порівняно з багатьма іншими підходами віброакустика вирізняється універсальністю та чутливістю до навіть незначних змін у системах і механізмах. Широкий частотний діапазон та різноманіття джерел коливань забезпечують високу інформативність щодо енергетичних параметрів роботи агрегатів, стану підшипників кочення, зубчастих передач, циліндро-поршневої групи; метод дозволяє контролювати якість виготовлення, ремонту, обкатування машин і попереджати руйнування на ранніх стадіях зародження дефекту.

Одним із найрезультативніших підходів до оцінювання вібраційних процесів у механічних системах є моделювання. Під час побудови моделей виділяють ключові зв'язки між елементами й притаманні об'єкту закономірності, відсіваючи другорядні чинники. Найбільш зручними для формування методик діагностування є математичні моделі.

Методи і засоби вібраційної діагностики

Коливання системи під дією зовнішніх збурювальних сил називають вимушеними; коливання, що тривають після припинення збурення, –це вільні

коливання, зумовлені внутрішніми пружними силами та перетоком накопичених кінетичної й потенціальної енергій.

Головна мета вібраційної діагностики –розпізнати технічний стан системи в умовах експлуатації, коли отримання повної інформації ускладнене. Часто однозначний висновок зробити неможливо, тож застосовують статистичні підходи [5].

Принцип діагностування полягає у віднесенні об'єкта до одного з наперед визначених (еталонних) станів на основі обраних параметрів і вирішальних правил. Для цього формують набір безрозмірних діагностичних показників, що характеризують стан об'єкта, та будують правила ухвалення рішень.

Узагальнений показник дефекту

Узагальнений показник дефекту формують за допомогою логіко-алгебраїчних композицій (метод головного критерію/визначального параметра або регресійні моделі). Комбінування кількох діагностичних ознак виконують логічними операціями типу «І» (обидва параметри суттєві для діагнозу) та «АБО» (враховується параметр з найбільшим внеском або вводяться вагові коефіцієнти). Базу знань і правила прийняття рішень наповнюють шляхом акумуляції та узагальнення експериментальних даних, накопичених у процесі експлуатації.

Інші методи діагностики мають низку обмежень, що звужують сфери їх ефективного застосування, тому їх доцільно використовувати у поєднанні з віброакустикою для підвищення достовірності та деталізації висновків.

1.4. Об'єкт дослідження та його характеристика

Об'єктом дослідження є базовий дизельний двигун Д-240 та зумовлені зношуванням процеси, що відбуваються в його вузлах і спряженнях. Чотирициліндрові чотиритактні дизелі сімейства Д-240 призначені для встановлення на трактори тягового класу 14–20 кН, а також на різні сільськогосподарські, лісові та промислові машини.

Модель Д-240 виступає базовою версією. У процесі розвитку лінійки двигунів і тракторів МТЗ-80/82 було створено низку модифікацій, що відрізняються

налаштуваннями за потужністю й крутним моментом, складом комплектуючих, системою пуску та конструкцією окремих деталей. Залежно від призначення дизелі цього сімейства могли комплектуватися додатковими агрегатами: пневмокомпресором, шестеренним насосом підсилювача рульового керування з приводом, комплектом дисків зчеплення тощо.

Пуск двигунів Д-240 здійснюється або електростартером, або від пускового двигуна. Позначення моделі з пусковим двигуном має літеру «Л»: Д-240 – електростартер; Д-240Л –пусковий двигун.

Конструктивно Д-240 складається з блока та головки циліндрів, кривошипно-шатунного механізму, газорозподільного механізму, а також вузлів і систем живлення, мащення, охолодження, пуску та електрообладнання.

Таблиця 1.4 – Двигун Д-240: технічні характеристики

Параметр	Показники
Силовий агрегат, кількість тактів	4
Суміш палива й повітря	Камера в поршні
Тиск упорскування пального (кгс·см ³)	175-180
Циліндри, разом (шт.)	«4»
Положення циліндрів	вертикально, ряд
Об'єм агрегату (л.)	4,75
Порядок роботи	«1» + «3» + «4» + «2»
Циліндр, діаметр (мм.)	110
Поршень, хід (мм.)	125
Відношення повного об'єму до об'єму камери згоряння	16
Потужність (к.с.)	80
Імпульс (кгс·м)	28
Вага двигуна Д 240 (кг.)	430
Ресурс (км.)	500000

Змащення	Система змащення (нагнітання + пари масла)
Моторне масло, об'єм (л.)	15
Масло	Літнє: М10Г, М10В; Зимове: М8Г, М8В, ДС-8
Охолодження	Рідиною, замкнене, вентиляція
Об'єм антифризу (л.)	19

Завдяки тому, що агрегат демонструє достойні показники потужності та прийомистості, Д-240 часто обирають для переобладнання автомобілів сімейств ЗІЛ і ГАЗ.

Переваги двигуна Д-240 (рис. 1.8):



Рисунок 1.8 – Двигун Д-240

Масовий випуск цієї моделі свідчить про стійкий попит: виробник заклав низку ефективних систем і достатній запас потужності для роботи на тракторах МТЗ. Ключові переваги силової установки:

Переваги:

- Висока питома потужність і хороша прийомистість.
- Тривалий ресурс за умови належного догляду та своєчасного ТО.
- Стійкі та довговічні корінні підшипники колінчастого вала.
- Гідромуфта приводу вентилятора охолодження (зниження шуму й навантаження на привід).
- Низька схильність головки блока циліндрів до утворення тріщин.

Недоліки:

- Складність виконання ремонтних операцій.
- Капітальний ремонт потребує значного переліку запчастин.
- Висока сумарна вартість комплектуючих для капремонту.
- Підвищена витрата палива порівняно з сучаснішими аналогами.

1.5. Висновок та задачі досліджень

Огляд наявних підходів до діагностики ДВЗ показує, що для безрозбірного визначення технічного стану агрегатів доцільно застосовувати статопараметричні та термодинамічні методи, а для підшипникових вузлів тракторних і комбайнових двигунів – віброакустичний аналіз. Їх використання на ранніх етапах експлуатації дає змогу оцінити стан без демонтажу, скоротивши трудомісткість діагностичних робіт орієнтовно на 10–15 %.

Мета роботи – удосконалити систему технічного обслуговування машин і створити надійну в експлуатації автоматизовану діагностичну установку для оцінювання стану агрегатів за віброакустичними ознаками.

Завдання дослідження:

- Провести детальний аналіз сучасних методів і засобів діагностування енергетичних засобів аграрної техніки з метою відбору найраціональніших технічних рішень для реалізації на об'єкті дослідження.
- Виконати аналітичне дослідження надійності двигунів МТП та надати рекомендації щодо підвищення їх працездатності.

- Розробити математичну модель, що встановлює зв'язок між коливаннями блок-картера двигуна та розрегулюваннями паливної апаратури.
- Провести експериментальні дослідження залежності віброприскорення від параметрів розрегулювання паливної системи.
- Розробити комплекс заходів з охорони праці.
- Здійснити економічну оцінку ефективності отриманих результатів.

2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Аналіз надійності двигунів та кількісна оцінка дефектів і відмов нових і відремонтованих автотракторних двигунів

Основні техніко-економічні характеристики вітчизняних ДВЗ загалом відповідають рівню провідних іноземних аналогів [20, 21]. Паспортний ресурс до першого капітального ремонту, установлений заводом-виробником, становить 8000...9000 мотогодин; отже, за середньорічного напруження близько 1000 мотогодин двигун має відпрацювати без капремонту 8...9 років –строк, що практично збігається з амортизаційним терміном служби машин і нормативами їх надійності [22].

Водночас у реальних умовах експлуатації часто фіксується помітне погіршення потужнісних і паливно-економічних показників. До чинників ризику належать: некоректна обкатка нових і відремонтованих двигунів, порушення режимів роботи, недотримання періодичності та повноти регламентних операцій ТО, а також використання пального й мастильних матеріалів сумнівної якості. Усе це прискорює старіння вузлів, підвищує витрати на підтримання працездатності машин та їх систем.

Статистика відмов у гарантійний період засвідчує підвищену інтенсивність на ранньому етапі експлуатації. За спостереженнями [22], після зростання кількості відмов на інтервалі 100...300 мотогодин, надалі спостерігається спад (рис. 2.1). Зокрема, у реальній практиці середній напружений ресурс до складної відмови (II та III групи складності) для нового двигуна майже вдвічі менший, ніж за «нормальних» умов, тоді як для відремонтованих агрегатів цей показник зазвичай вищий, але характеризується значним розсіюванням, що зумовлене не лише культурою експлуатації, а й насамперед якістю виконаного ремонту.

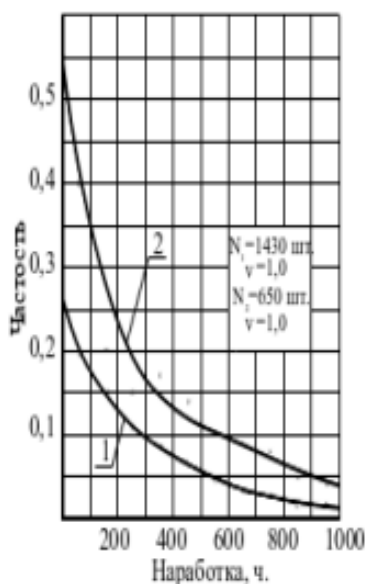


Рисунок 2.1 – Розподіл відмов двигунів Д-240 і Д-242 у гарантійний період:

1 –нові; 2 –відремонтовані.

Застосування неякісних матеріалів, недостатня точність відновлення робочих поверхонь, а також помилки під час складання вузлів і агрегатів при ремонті та обкатці призводять до різкого прискорення зношування навіть конструктивно надійних двигунів.

Отримані результати свідчать: за умов дотримання заводської інструкції під час експлуатації напрацювання до відмови суттєво зростає. Найбільша кількість відмов припадає на системи, що потребують підвищеної уваги під час заводського та експлуатаційного обкатування, а саме: систему паливоподачі, систему повітропостачання, а також вузли «блок циліндрів –головка блока». Розподіл відмов за системами показано на рис. 2.2.

Таблиця 2.1 – Аналіз відмов двигунів за походженням

	За даними		
	ОФ НАТИ	НИКТИД	ХНАДУ
Якість виготовлення й складання	48%	61%	55%
Конструктивна недосконалість	15%	3%	10%

Порушення правил експлуатації	37%	36%	35%
-------------------------------	-----	-----	-----

Очевидно, значну частину відмов нових і відремонтованих двигунів можна було б запобігти підвищенням культури виготовлення та експлуатації, а також вжиттям профілактичних заходів на етапі введення техніки в роботу. Добре відомо, що третіві поверхні деталей та вузлів мають бути підготовлені до навантажень шляхом коректної обкатки. Під час обкатування відбувається взаємна приробітка мікронерівностей до раціональної шорсткості, а також часткове усунення відхилень макроеометрії, що зменшує ризик раннього зношування та підвищує надійність агрегату [15, 23].

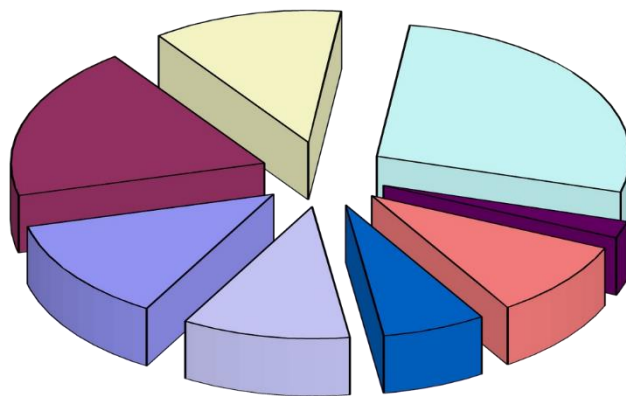


Рисунок 2.2 – Розподіл відмов за системами двигуна:

1 – головка циліндрів; 2 – блок циліндрів; 3 – система повітропостачання; 4 – паливоподача; 5 – мащення; 6 – пуск; 7 – охолодження; 8 – муфта зчеплення.

Експериментальні спостереження свідчать, що серед найтипівіших дефектів дизельних ДВЗ домінують задири та абразивне зношування корінних і шатунних вкладишів. Приблизно половина таких відмов припадає на ранній інтервал напрацювання – близько 100–200 мото-годин.

Ключові чинники появи зазначених дефектів: недостатня «санітарна» підготовка деталей під час виготовлення (чистота, дегазація, промивання), порушення технології складання й неточності під час випробувань (див. рис. 2.3).

Значну частку відмов у реальній експлуатації становлять також задири та оплавлення поршнів, що нерідко проявляються на початковому етапі роботи двигуна.

Серед причин –порушення правил обкатування, технологічні огріхи виготовлення/складання, а також тривала робота з несправними форсунками, яка призводить до локального перегріву й оплавлення днища поршня.



Рисунок 2.3 – Розподіл відмов двигунів Д-240

Найтипівіші збої паливних насосів –заїдання плунжерів секцій високого тиску та підкачувальних помп, що здебільшого пов’язані з наявністю води в паливі. Поширений також дефект –порушення регулювань паливного насоса (кут упорскування, нерівномірність подачі).

Ознаками тріщин і раковин у корпусних деталях є: потрапляння охолодної рідини в оливу (і навпаки), зовнішні підтікання, перетікання робочих середовищ у сусідні порожнини, порушення центрування двигуна та підвищення рівня вібрацій.

Для головки блока циліндрів характерні: випадання сідла клапана, руйнування прямої втулки, тріщини ГБЦ –зазвичай проявляються на напрацюванні до 100 мотогодин і мають виробниче походження. Обрив тарілки клапана трапляється в експлуатації внаслідок збільшених зазорів у клапанному механізмі.

Аналіз причин відмов Д-245 у гарантійний період показує: частина дефектів є прихованими (тріщини, раковини тощо) або виявляється за непрямими ознаками (підвищений шум, стукіт, вібрація), інші –фіксуються візуально. Помітну частку відмов (І група –11,3 %, ІІ –30 %, ІІІ –6,5 %), що виникають на різних етапах напрацювання, можна виявити та усунути під час вхідного контролю комплектності,

коли машина ще не введена в експлуатацію. Типові причини –порушення технології виготовлення/збирання і транспортні пошкодження.

Близько 10 % відмов двигунів Д-240/Д-245, що працювали без попереднього припрацювання (ПП), як-от: не включається муфта зчеплення, стукіт, «жорстка» робота, вібрації –можна попередити регульовальними роботами (муфта зчеплення, клапанний механізм, ТНВД, форсунки тощо) під час ТО після експлуатаційної обкатки. Водночас значну частку відмов (І група –78,7 %, ІІ –60 %, ІІІ –83,5 %), що дають найбільші втрати споживачу в гарантійний період, можна відсунути за рахунок належної експлуатаційної обкатки як на холостому ході, так і під навантаженням.

Для відмов І групи типовими є підтікання пального, оливи, охолодної рідини. Якщо їх не усунути на етапі ПП, це може призвести до складніших наслідків: задирів вкладишів, перегріву, займання тощо. Для ІІ групи характерні втрати працездатності вузлів (турбокомпресор, пусковий двигун, водяний/масляний/паливний насоси), запобігти яким можна завдяки додатковим контрольно-регульовальним операціям ПП. Для ІІІ групи (трудомісткі й дорогі усунення) –вібрація двигуна, непаралельність кільця віджимних важелів із натискним підшипником, провертання вкладишів, обриви поршнів, задир гільз тощо; без ПП часто виникають на 300...500+ мотогод. Повністю їх не завжди вдається попередити, але завдяки профілактиці ключових систем можна зсунути момент появи за межі гарантійного ресурсу ($t_{\Gamma} = 2000$ м-г).

Загалом сучасне мотороремонтне виробництво ще не повністю відповідає вимогам до якості капремонту дизелів: показники безвідмовності та ресурсу після капремонту становлять лише 50–60 % від рівня нових двигунів. За підсумками аналізу великої вибірки відмов після ремонту [14, 16, 17], понад третину випадків спричинені некоректною експлуатацією: дефіцит мащення, несвоєчасне очищення центрифуги й повітроочисників, робота з наявними несправностями, що форсують знос; додатково негативно впливають неякісні нафтопродукти.

Дослідження безвідмовності засвідчили: у міжремонтний період кількість відмов ІІІ групи протягом першої тисячі м-г на 1,35 раза більша, ніж у доремонтний, а загалом у середньому –в 1,5 раза менша (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Розподіл кількості відмов відремонтованих двигунів за групами складності.

Показники	Марка дизеля	Значення показника			
		По дизелю	I групи складності	II групи складності	III групи складності
Середнє число відмов за 1000 м-г	ЯМЗ-240Б	4,41	1,57	2,18	0,66
	ЯМЗ-238НБ	4,37	1,55	2,34	0,48
	Д-240	3,62	1,22	1,75	0,65
	А-41	4,69	2,43	1,56	0,7
Відношення фактично досягнутого значення параметра до нормативного	ЯМЗ-240Б	1,39	0,8	1,53	4,31
	ЯМЗ-238НБ	1,25	0,57	1,59	3,75
	Д-240	1,37	0,84	1,75	5,2
	А-41	1,25	0,96	1,62	1,86

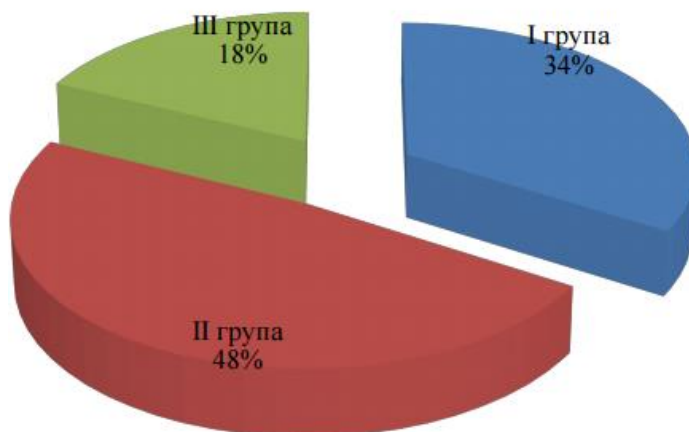


Рисунок 2.4 – Розподіл відмов відремонтованих двигунів Д-240 за групами складності на 1000 мото-год напрацювання

У міжремонтний період «ресурсні» відмови фіксуються вже на перших 0–500 м-г, тоді як у доремонтному – лише після ≈ 2000 м-г. Порівняння фактичної

безвідмовності капітально відремонтованих Д-242 з нормативами за першу тисячу мото-год показує: кількість відмов І групи в реальності істотно менша за норматив. Це пояснюється труднощами повного обліку таких відмов, навіть під час випробувань на машиновипробувальних станціях (облік ведеться у бортових журналах, але дрібні відмови легко «розчиняються» у записах). Натомість показники безвідмовності для II та III груп у відремонтованих дизелів гірші за норматив приблизно на 10 % і 8 % відповідно.

Для дизелів Д-240, А-41, ЯМЗ-240Б, ЯМЗ-238НБ загальний рівень безвідмовності після капремонту в середньому на 25–40 % нижчий за нормативний, а за II–III групами –у 1,5–2,0 раза гірший. Найбільше розсіювання спостерігалось у вибірках ЯМЗ-240Б та ЯМЗ-238НБ: кількість відмов III групи у 7–8 разів перевищувала норматив.

Типова відмова І групи –руйнування паса вентилятора. Більшість відмов І та II груп пов’язані з розгерметизацією двигуна:

- прогар і руйнування прокладок головок циліндрів;
- підтікання оливи, охолодної рідини та палива через тріщини трубопроводів і корпусних деталей;
- втрата еластичності, знос або руйнування сальників, ущільнювальних кілець і прокладок.

Серед ресурсних відмов домінують: інтенсивний знос і руйнування елементів ЦПГ, а також виплавлення антифрикційного шару корінних/шатунних вкладишів колінчастого вала (див. табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Кількісна оцінка ресурсних відмов дизелів (шаблон для заповнення)

Найменування	Кількість, %				
	Д-242	ЯМЗ-238НБ	ЯМЗ-240Б	Д-240	А-41
Зношування ЦПГ	14	20	35	44	20

Виплавлення корінних вкладишів колінчатого вала	50	45	35	15	50
Виплавлення шатунних вкладишів колінчатого вала	15			10	
Злам колінчатого вала	2	10	10	15	8
Обрив поршня	14	15	15	10	5
Обрив шатуна і його болтів	1	10	5	6	12
Обрив болтів кріплення маховика					5

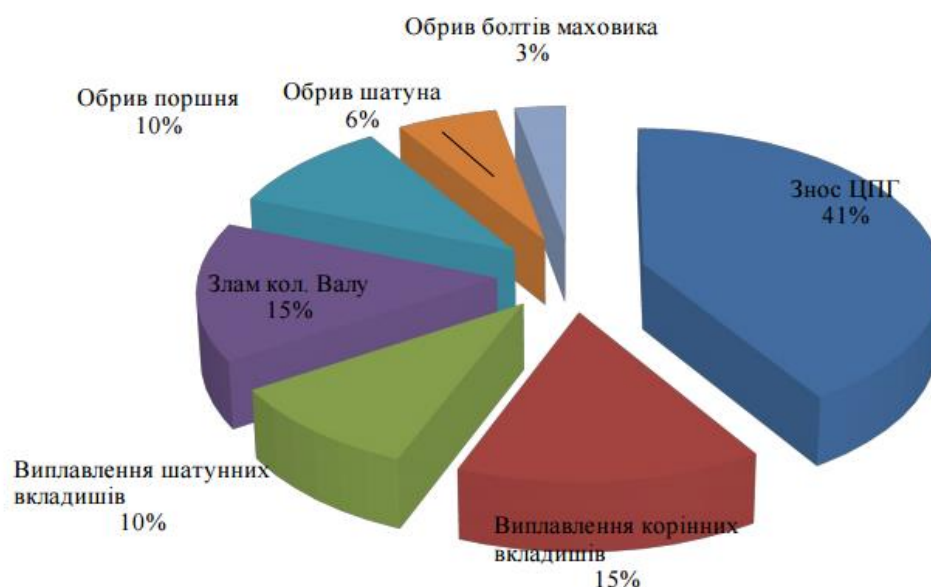


Рисунок 2.5 – Кількісна оцінка ресурсних відмов дизелів Д-240

За результатами спостережень, міжремонтний ресурс дизелів Д-242, ЯМЗ-240Б, ЯМЗ-238НБ, Д-240 та А-41 становить 0,42–0,65 від доремонтного та 0,22–0,55 від нормативного значення (див. табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Співвідношення ресурсу нових і відремонтованих дизелів

Показники	Значення показника				
	Д-242	Д-240	А-41	ЯМЗ-238НБ	ЯМЗ-240Б

80% гамма-ресурс відремонтованих двигунів, м-г	1000	2200	950	1000	1000	П ричин и «ресур сних» відмов розпо діляю
Відношення досягнутого значення параметра до нормативного	0,25	0,55	0,24	0,25	0,23	
Відношення досягнутого значення параметра до значення доремонтного	0,58	0,65	0,48	0,54	0,46	

ться так. Вихід з ладу вкладишів підшипників зумовлюють: забруднення моторної оливи –50 %; дефіцит оливи –25 %; застосування невідповідних (не регламентованих інструкцією) сортів олив –15 %; неспіввісність і площинні відхилення вкладишів, а також занижена твердість кривошипної головки шатуна –10 %. Передчасний знос елементів ЦПГ переважно пов'язаний із відмовами систем забору та очищення повітря: засмічення фільтрів –60 %, розгерметизація впускних каналів –40 %.

Динаміка зміни зазорів свідчить, що найінтенсивніше зростає зазор у сполученні «поршневе кільце –верхня канавка поршня»: граничний стан настає орієнтовно при ≈ 3000 м-г і більше в міжремонтний період та близько ≈ 4500 м-г у доремонтний. Порівняння швидкості зношування показує: у дизелів після капремонту вона в 1,64–2,0 рази вища, ніж у доремонтних агрегатів.

Окрема причина прискореного зносу –зниження твердості шийок колінчастого вала після їх шліфування під час капремонту, що неминуче веде до інтенсивнішого спрацювання шийок і пар тертя [24].

2.2. Динаміка двигуна та формування вібрацій в зоні циліндрів

Під час роботи або прокручування ДВЗ поршень здійснює «перекладку» – швидке перекидання зіткнення зі стінкою гільзи з одного боку на інший у межах бічного зазору. Ударні імпульси при такій зміні напрямку спричиняють пружні коливання стінок циліндра [19]. Найінтенсивніші удари спостерігаються поблизу

ВМТ, оскільки в цій зоні бокова (нормальна) сила має максимальну величину; напрямок удару при цьому протилежний напрямку обертання колінчастого вала.

Осьова сила, що діє на поршень уздовж циліндра, формується як різниця газової складової та інерційних/тертьових опорів і в узагальненому вигляді може бути записана як функція кута повороту колінчастого вала визначається за формулою 2.1:

де: P_g —сила від тиску газів у циліндрі, P_j —сила інерції зворотно-поступальних мас. Тертьовими силами на контакті «поршень—гільза» та власною масою поршня знехтуємо. Врахуємо лише осьове тертя поршневих кілець про гільзу.

За рівняннями рівноваги поршня та шатуна бокова сила, що притискає поршень до стінки гільзи, розраховується за формулою 2.2:

де: β —кут відхилення шатуна від осі циліндра під час «перекладки» поршня;

$P_{m.k.}$ —сила тертя в парі «поршень—кільця», що протидіє поперечному зміщенню поршня в боковому зазорі.

В свою чергу: ці величини враховують кінематичне положення шатунно-кривошипного механізму та опір ковзання кілець у момент контакту та розраховуються за формулою 2.3:

де: p_g, p'_g, p_g^H —тиск газів у поршневих канавках відповідно під першим, другим і третім кільцями;

F_k —радіальна площа кільця;

μ —коефіцієнт тертя.

Під час обертання колінчастого вала інерційні сили у кривошипно-шатунному механізмі протягом циклу неодноразово змінюють знак, унаслідок чого поршневе кільце почергово прилягає то до однієї, то до протилежної стінки своєї канавки. Розглянемо формування ударного імпульсу в момент «перекладки» поршня в боковому зазорі, що збуджує вібрації гільзи та блока. Потужність коливань у зоні удару визначається інтенсивністю процесу, яку зручно характеризувати імпульсом сили.

Імпульс бокової сили під час удару поршня об стінку гільзи можна подати у

вигляді формули 2.4:

де: m – маса поршня та приєднаної частини шатуна;

mv_n – імпульс кількості руху (доударний);

k – коефіцієнт відновлення ($k = \frac{v_k}{v_n}$);

v_k, v_n – поперечні швидкості поршня відповідно до та після удару.

З урахуванням тертя поршня об кільця рівняння ударної взаємодії можна записати як:

$$R = \int_t^{t+\tau} P dt - \int_t^{t+\tau} P_{\text{Т.К.}} dt = mv_n(1 + k) - P_{\text{Т.К.}} t_{\Pi}$$

де t_{Π} – тривалість «перекладки» поршня в боковому зазорі під час його поперечного переміщення.

Оскільки перекладка відбувається в невеликому кутовому інтервалі повороту колінчастого вала (орієнтовно $12 - 20^\circ$ від ВМТ до моменту удару), припустимо, що швидкість наростання бокової сили є сталою в часі. Тоді приймаємо лінійний закон зростання:

$$\frac{dN}{dt} = \dot{N} = \text{const}$$

Диференціальне рівняння, що описує поперечний рух поршня, можна подати у формулі 2.5:

де s – боковий зазор між поршнем і гільзою циліндра.

Інтегруючи рівняння поперечного руху та застосувавши початкові умови $t = 0, s(0) = 0, \dot{s}(0) = 0$, дістанемо узагальнений розв'язок у вигляді згортки:

$$m\dot{s} = \frac{\dot{N}t_{\Pi}^2}{2}$$

Звідси:

$$s = \frac{\dot{N}t_{\Pi}^2}{6m}$$

Оскільки $\ddot{s} = \frac{dv}{dt}$, то швидкість поперечного руху визначається за формулою 2.6.

Для $v_0 = 0$ (у ВМТ) зі співвідношення 2.6 швидкість у момент удару визначається за формулою 2.7.

Подальше інтегрування швидкості дає рівняння шляху поперечного зміщення поршня, за формулою 2.8.

Із виразу 2.8 для лінійного наростання бокової сили отримуємо тривалість перекладки поршня в зазорі по формулі 2.9.

Приймаючи наближення $tg\beta = \sin\beta = \lambda_k \cdot \sin\phi$, одержуємо рівняння 2.10 для бокової сили.

Здійснивши диференціювання виразу 2.10, отримуємо залежність 2.11.

У зоні ВМТ $\phi_{\Pi} = 12 - 20^\circ$ та $\cos\phi_{\Pi} = 0,98$, де, можна вважати:

$$t_{\Pi} = 2,15 \sqrt[3]{\frac{6sm}{\omega P_{\Gamma j} \lambda_k \cos\phi_{\Pi}}} = 8,3 \sqrt[3]{\frac{sm}{n\lambda_k P_{\Gamma j}}}$$

Підставивши t_{Π} у 2.8 та вираз для швидкості, дістаємо поперечну швидкість поршня в момент удару:

$$v_{\Pi} = 0,76 \sqrt[3]{\frac{0,98s^2\omega P_{\Gamma j}\lambda_k}{m}} = 0,36 \sqrt[3]{\frac{s^2nP_{\Gamma j}\lambda_k}{m}}$$

Якщо у вираз 2.4 підставити v_{Π} і знехтувати тертям поршня об кільця ($\mu = 0$), то швидкість поперечного руху в момент удару набуває вигляду формули 2.12.

А з урахуванням сил тертя поршень–кільця (ефективний множник $1 - \mu$) швидкість у момент удару, розраховується за формулою 2.13.

Для фіксованого типорозміру двигуна та певного режиму роботи (коли m, μ, N_{max} сталі) рівняння 2.12 зручно записати у параметризованому вигляді:

$$R = A \cdot s^{\frac{2}{3}}$$

З наведених співвідношень випливає, що за фіксованого режиму роботи (оберти, навантаження) на різних стадіях спрацювання двигуна поперечна швидкість поршня v_{Π} та інтенсивність удару R змінюються разом із боковим зазором s . Раніше

розглянута схема поодинокого удару припускала перекладку поршня за умови паралельності твірної до осі циліндра. У автотракторних ДВЗ центр мас поршня та поздовжня рівнодійна сили тертя кілець розташовані вище осі поршневого пальця, через що під час перекладки виникає ще й обертальний рух. У результаті під дією бокової сили N (з урахуванням поперечного тертя) перекладка відбувається у дві фази з двома ударами: спочатку б'є нижня частина юбки, далі поршень повертається навколо цієї опори й формується другий, зазвичай сильніший удар (після ВМТ на такті розширення).

Аналіз показує, що енергія вібрацій, збуджених ударами ЦПГ, орієнтовно дорівнює кінетичній енергії поршня у момент контакту. Середня потужність цих вібрацій (усереднена за часом) від ударів усіх циліндрів може бути подана як формула 2.14:

де j – кількість ударів за один робочий цикл.

Беручи інформативним імпульс перекладки поршня поблизу ВМТ та виділяючи його для одного циліндра, підставимо у 2.14 вираз поперечної швидкості, одержимо середню потужність вібрації за формулою 2.15.

Висновок

Аналіз зміни бокових зазорів показує, що найшвидше зростає зазор у сполученні «поршневе кільце – верхня канавка поршня». Граничного стану воно досягає орієнтовно при ≈ 3000 мото-год у міжремонтний період і близько 4500 мото-год у доремонтний. Порівняльна оцінка темпів спрацювання свідчить: після капремонту швидкість зношування перевищує доремонтну приблизно у 1,64–2,0 рази.

Під час капітального ремонту шліфування шийок колінчастого вала знижує їхню твердість, що, у свою чергу, прискорює подальше спрацювання підшипникових поверхонь. У кривошипно-шатунному механізмі сили інерції протягом одного циклу кілька разів змінюють знак, через що кільце почергово притискається до різних стінок своєї канавки. В момент «перекладки» поршня в боковому зазорі формується ударний імпульс, який збуджує вібрації гільзи та блока. Локальна потужність цих вібрацій у зоні удару визначається інтенсивністю процесу.

3. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

3.1. Обладнання та методика проведення досліджень

Схему виконання вібраційної діагностики подано на рис. 3.1 [25–27].

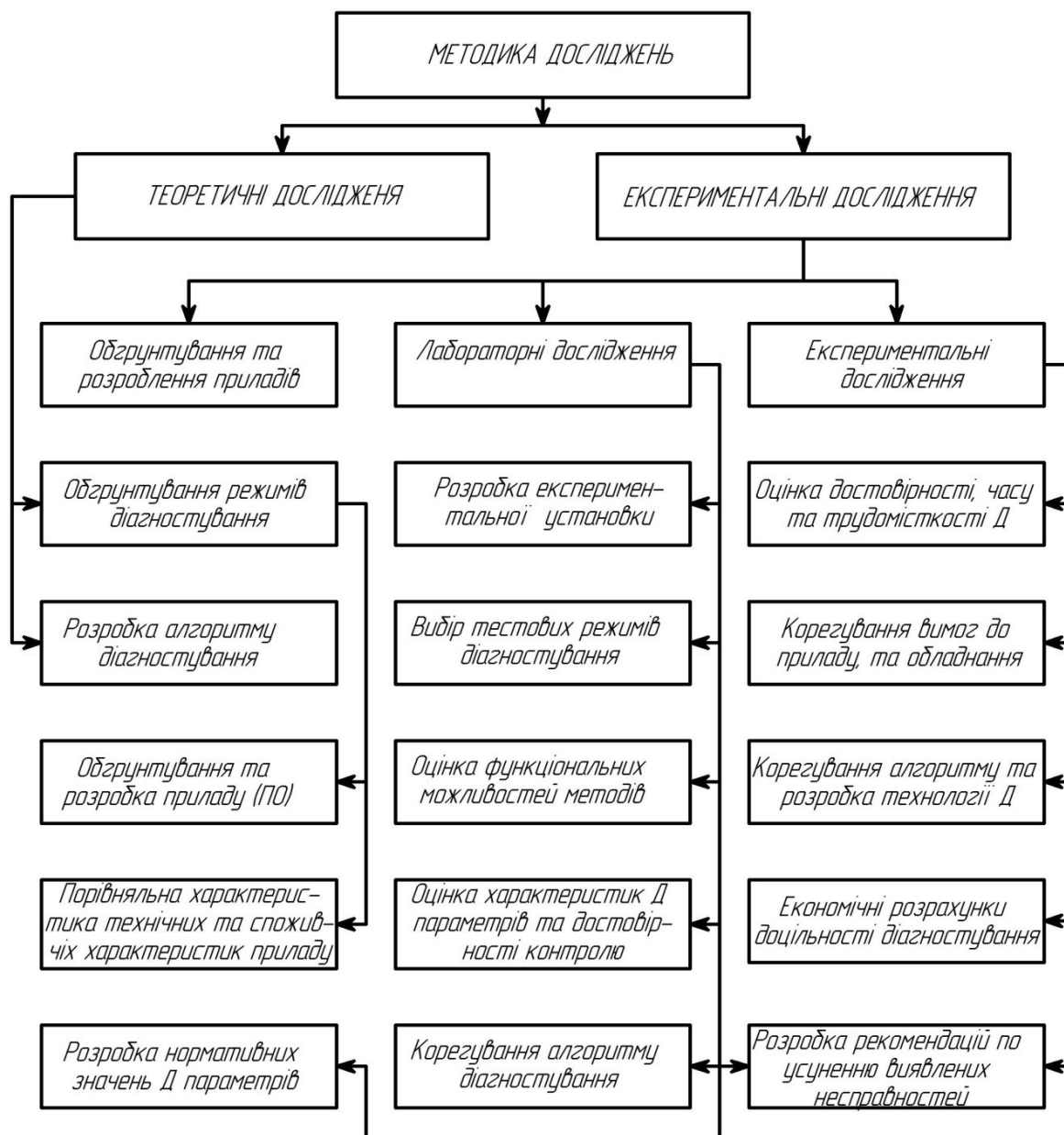


Рисунок 3.1 – Алгоритм проведення досліджень (вібродіагностика)

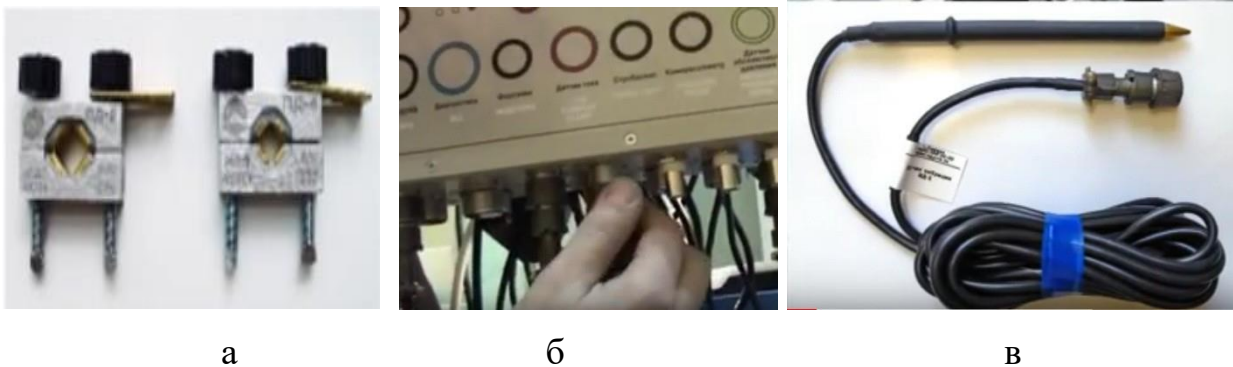


Рисунок 3.2 – Комплект вібротестера МТ-10Д

а –п'єзодатчик упорскування; б –під'єднання датчиків до блока керування; в – вібродатчик (акселерометр).



Рисунок 3.3 – Процедура вимірювання компресії



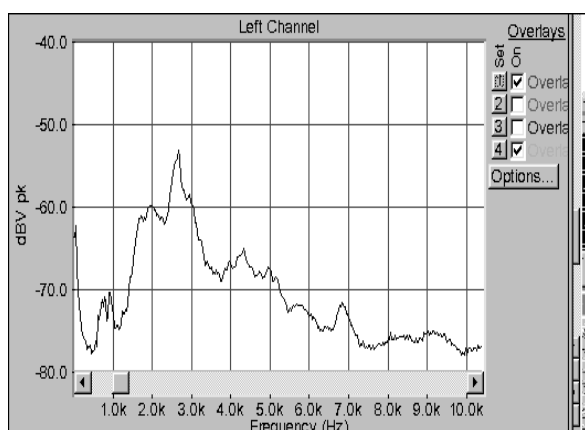
Рисунок 3.4 – Налаштування клапанного механізму двигуна



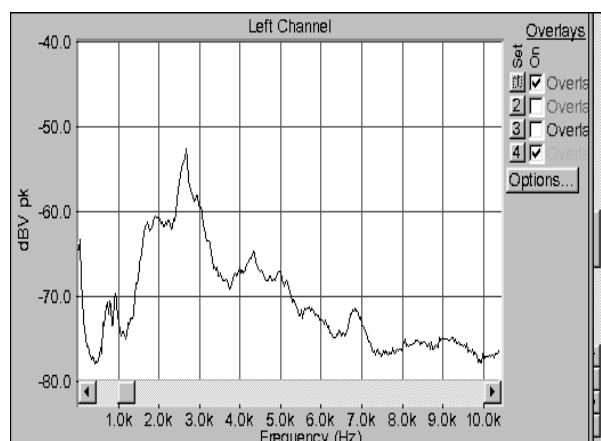
Рисунок 3.5 – Монтаж п'єзодатчика упорскування і вимір вібрацій ГБЦ в зоні 1-го циліндра

3.2. Дослідження спектру сигналу від довжини реалізації

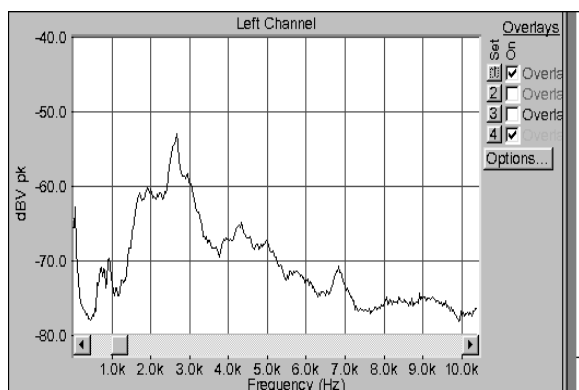
Розглянемо, як довжина реалізації впливає на спектр сигналу. На рис. 3.6 подано спектральні оцінки для різних тривалостей відліку. Початкова тривалість вібросигналу, знятого з картера, становить 60 с. Далі поетапно зменшуватимемо інтервал аналізу, паралельно порівнюючи усереднений спектр сигналу для кожної скороченої реалізації [27].



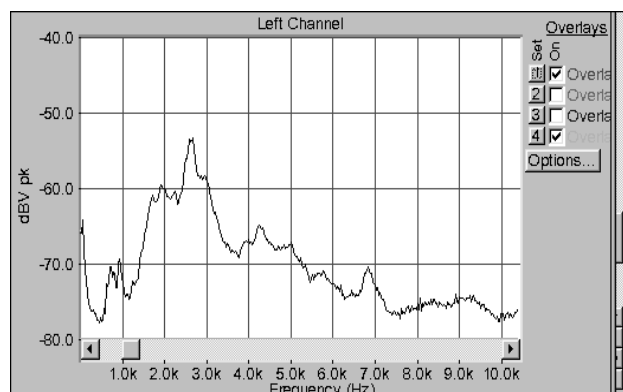
60 сек



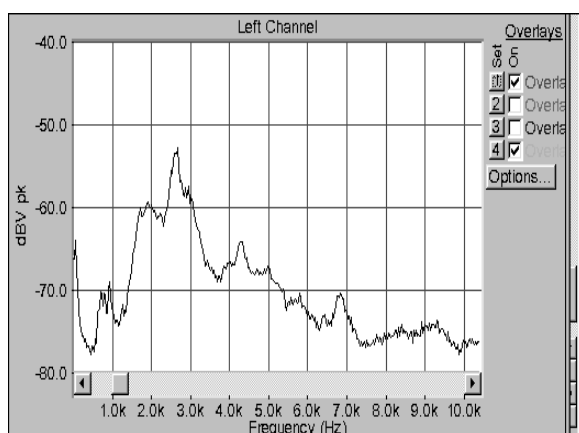
50 сек



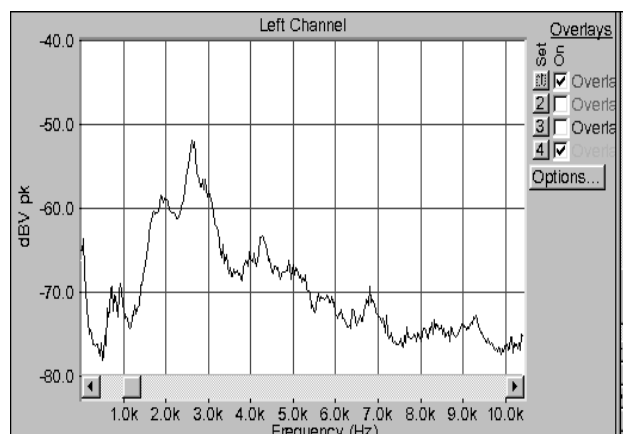
40 сек



30 сек



20 сек



10 сек

Рисунок 3.6 – Графічна залежність спектра вібросигналу від довжини реалізації

Як видно з рис. 3.6, усереднений спектр майже не залежить від тривалості реалізації. Причина в тому, що він формується з масиву близько 32 000 точок, тож навіть за ~ 5 секунд реєстрації спектральне представлення вже достатньо інформативне.

Запис хвилинного вібросигналу містить орієнтовно 1,5 млн відліків – це надмірно й не є необхідним. Достатньо знімати сигнал після ~ 5 секунд роботи двигуна: це потребує менше пам'яті, пришвидшує обробку та, відповідно, скорочує загальний час діагностики.

3.3. Визначення діагностичних ознак кривих віброприскорення в залежності від роз регулювань паливної апаратури

Щоб підвищити інформативність сигналу та точність діагнозу, доцільно аналізувати вібраційні характеристики двигуна одразу у двох осях –х та у. Надалі ми працюватимемо саме з такими двокомпонентними сигналами та виконуватимемо їх оброблення. Окремий інтерес становить перевірка впливу розрегулювання паливної апаратури на вібраційні параметри блоку циліндрів.

Для порівняння з «нормою» еталонні спектри знято за умови повністю відрегульованої паливної апаратури у двох контрольних точках; їх наведено на рис.

3.7.

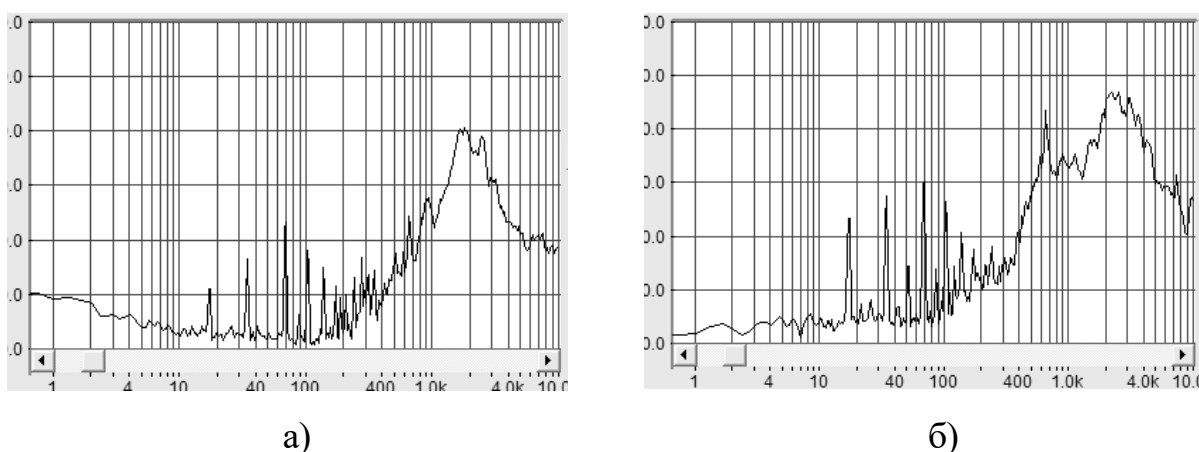


Рисунок 3.7 – Еталонні спектри вібросигналів

Після від'єднання другої форсунки зафіксовано такі спектральні картини.

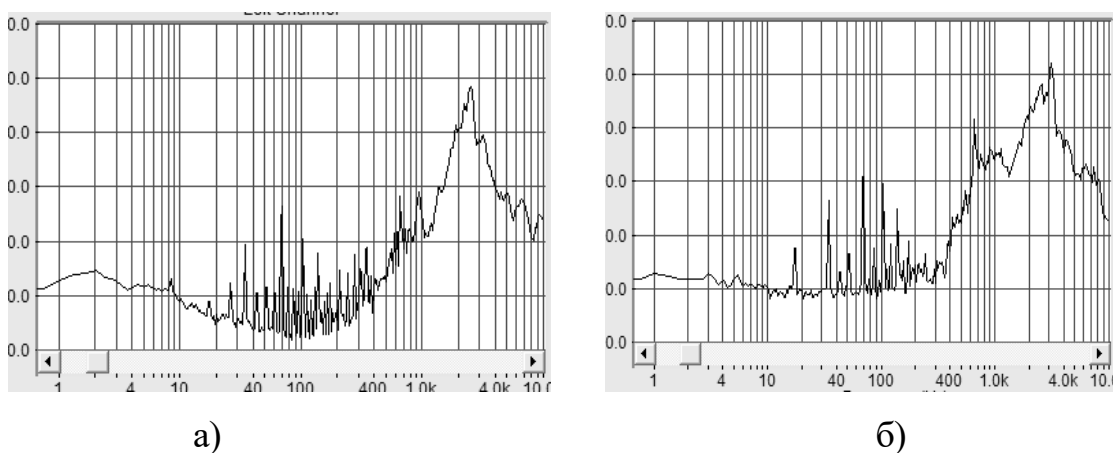
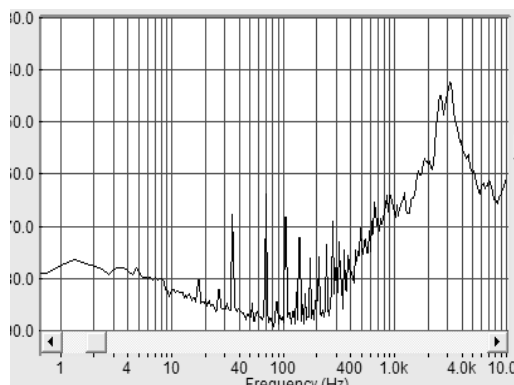
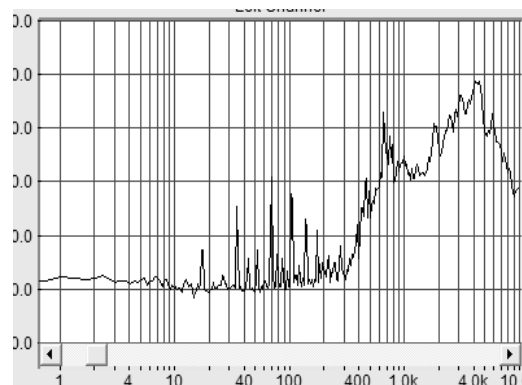


Рисунок 3.8 – Спектри переміщень вібрацій за $n = 1000$ об/хв при відключеній форсунці другого циліндра

Тиск початку впорскування форсунки –14 МПа.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Віброкриві за тиску початку впорскування 14 МПа

Тиск початку впорскування форсунки –20 МПа.

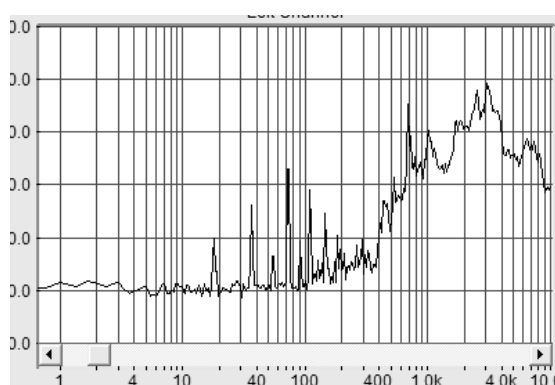
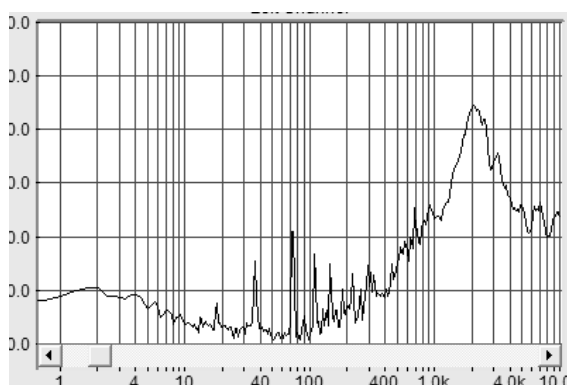


Рисунок 3.10 – Віброкриві за тиску початку впорскування 20 МПа

Як видно, налаштування паливної апаратури помітно впливає на вібраційну картину двигуна.

Отже, вібродіагностика є дієвим інструментом підтримання машин у працездатному стані. Для раннього виявлення зароджуваних несправностей доцільно оснастити трактори системою моніторингу параметрів вібрації (рис. 3.11).

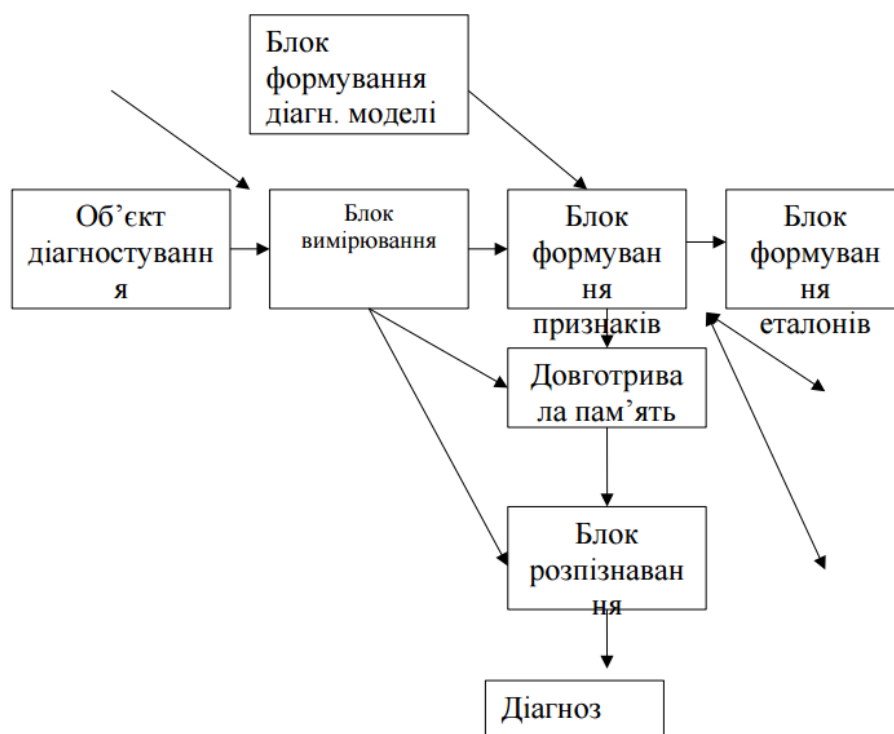


Рисунок 3.11 – Узагальнена блок-схема бортової системи вібродіагностики

Висновок

Підсумовуючи: вібраційні параметри є інформативним індикатором технічного стану агрегатів. Використання високочутливих датчиків разом із сучасним ПЗ дає змогу оцінювати не лише справність вузла в цілому, а й діагностувати стан його окремих механізмів і деталей.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Огляд служби охорони праці підприємстві

Відповідальність за стан охорони праці на підприємстві несе директор. Спеціаліста з охорони праці призначає керівник; цей фахівець готує заходи безпечної роботи, проводить вступні інструктажі та аналізує виявлені недоліки.

З огляду на розгалужену структуру (будівництво, перевезення, роздріб/послуги, ремонт автопарку, ремонт електродвигунів) у кожному підрозділі визначено відповідального за охорону праці – зазвичай це керівник підрозділу. Виняток – будівельний напрям, де, зважаючи на масштаб, працює окремий фахівець з ОП.

На підприємстві регулярно проводяться медичні огляди для підтвердження придатності працівників до роботи за станом здоров'я.

Матеріально-технічна база оновлюється (закуплено нову будтехніку), однак навчання персоналу не організовано належним чином, що призводить до порушень правил безпеки.

Є кабінет з охорони праці, проте наочно-методичні матеріали орієнтовані переважно на будівництво, тоді як підприємство також експлуатує техніку і виконує ремонтні роботи. У підрозділах відсутні куточки з ОП; інструктажі проводяться формально (обмежуються підписом у журналі). Будівельники нерідко ігнорують ЗІЗ (каска, захисне взуття), особливо влітку. Підрозділи не забезпечені вогнегасниками.

Підприємство працює за розпорядком табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Режим роботи підприємства

№	Параметр	Показник
1	Тривалість робочого тижня, днів	5
2	Тривалість робочого дня, год.	8
3	Перерва на обід	13:00...14:00
4	Вихідні	Субота, неділя

На підприємстві загалом створено прийнятні умови праці. Підвищення зарплат і закупівля нового інструменту стимулювали працівників сумлінніше ставитися до

своїх обов'язків. Дисципліну підтримує й система штрафів за порушення вимог безпеки, яка відчутно впливає на заробіток у разі проступків. Заходи з охорони праці (некапітального характеру) фінансуються за рахунок загальновиробничих витрат. У підсумку стан охорони праці на підприємстві оцінюється як задовільний.

4.2. Дослідження виробничого травматизму

На підприємстві робота служби охорони праці організована на належному рівні, тому випадки травмування поодинокі: за останні п'ять років стався один нещасний випадок (травмування кінцівки), після лікування працівник звільнився. Керівництво виплатило компенсацію і покрило витрати на лікування.

Провівши аналіз травматизму та його причин, можна сформулювати цільові заходи для поліпшення умов праці й запобігання інцидентам. Розрахунки наведемо для 2020 року (для інших років виконуються аналогічно й заносяться до табл. 4.1).

Частота травм $K_{\text{ч}}$ розраховується за формулою 4.1 [28, 29]:

$$K_{\text{ч}} = \frac{1000 \cdot 1}{236} = 4,2$$

де: Т – кількість зареєстрованих травм за період;

П – середньооблікова чисельність працівників.

Важкість травматизму $K_{\text{т}}$, розраховується за формулою 4.2:

$$K_{\text{т}} = \frac{36}{1} = 36$$

де Д – кількість днів непрацездатності.

Показник втрат $K_{\text{н}}$, розраховується за формулою 4.3:

$$K_{\text{н}} = \frac{1000 \cdot 36}{236} = 152,5$$

Таблиця 4.1 – Динаміка травматизму в господарстві за 2017–2021 рр.

№ п/п	Показники	Всього				
		2017	2018	2019	2020	2021
1.	чисельність працюючих	250	245	245	236	236

2.	Кількість травм	-	-	-	1	-
3.	Дні на лікарняному	-	-	-	36	-
4	Частота травматизму	-	-	-	4,2	-
5.	Важкість травматизму	-	-	-	36	-
6.	Коефіцієнт непрацездатності	-	-	-	152,5	-

4.3. Заходи поліпшення умов праці на підприємстві

Моделювання ситуацій, що можуть привести до травмувань

У ході виробничих процесів трапляються нещасні випадки та травми. Усі випадкові події (явища), що формують ту чи іншу аварійну чи травматичну ситуацію, пов'язані між собою причинно-наслідковими зв'язками. Кожна логічна модель виникнення небезпеки або НС складається з певного набору випадкових подій, які можуть бути статистично залежними або незалежними. Статистично корельовані події – це такі, де наступна не може статися без попередньої. Дві події в межах однієї моделі вважають незалежними, якщо кожна здатна відбутися окремо від іншої. Зазвичай у таких схемах незалежні події розміщують паралельно, а взаємопов'язані – послідовно. Виявлення прихованих виробничих небезпек спирається на точніше й ефективніше застосування наявних операційних засобів контролю та потребує їх постійного вдосконалення.

Аналізуючи перебіг формування події та можливі логічні моделі кожного конкретного випадку травмування чи НС, завжди можна виокремити ініціюючу подію, що запускає небезпечний процес і передусь шкідливому наслідку. Такі логічні моделі корисні під час визначення відповідальності осіб, причетних до аварії, а також для оцінювання ступеня вини потерпілого.

Для прикладу на рис. 4.1 наведено робочу модель пристрою, що застосовується на фрезерному верстаті.

Вид робіт	Виробнича небезпека			Можливі наслідки	Заходи запобігання небезпечним ситуаціям
	Небезпечна умова (НУ)	Небезпечна дія (НД)	Небезпечна ситуація (НС)		
Робота на фрезерному верстаті	працює без огороження (НУ1)		виліт стружки (НС1)	травма (Т)	обладнати верстат огороженням
	долти, прорізи, задирки виступають з обертаючих механізмів (НУ2)	Робота без прибирання робочого місця (НД1)	захоплення одягу або руки (НС2)	травма (Т)	зменшити задирки
	немає дерев'яного настилу (НУ3)		ковзання працівника, торкання до металевих частин під напругою (НС3)	травма (Т)	забезпечити працюючого настилом
	одірваний заземлюючий дрот (НУ4)	Розлив рідини (НД2)		травма (Т)	забезпечити заземлення
НУ1 → НД1 → НС2 → Т НУ2 → НД1 → НС1 → Т НУ3 → НД2 → НС3 → Т НУ4 → НД2 → НС3 → Т					
Вид робіт	Виробнича небезпека			Можливі наслідки	Заходи запобігання небезпечним ситуаціям
	Небезпечна умова (НУ)	Небезпечна дія (НД)	Небезпечна ситуація (НС)		
Встановлення та закріплення заготовки	деталь має гострі краї (НУ1)	працівник почав роботу без погодження з керівником (НД1)	ковзання рук працівника по деталі (НС1)	Аварія (А)	провести навчання з працівником щодо правил виконання роботи
	Надмірна вага деталі (НУ2)	Встановлення деталі вручну (НД2)	випадання деталі з рук (НС2)		провести позаплановий інструктаж з ОП
	поверхня деталі покрита мастилом (НУ3)	Деталь не підготовлена до роботи (НД3)	падіння деталі на ноги працівника (НС3)	травма (Т)	згідно норм забезпечити працівника засобами індивідуального захисту
	Відсутність засобів захисту рук працівника (НУ4)			травма (Т)	Посилити контроль з боку керівника структурного підрозділу
НУ4 → НУ1 → НД1 → НД2 → НС3 → Т НУ2 → НД1 → НД2 → НС3 → Т НУ3 → НД1 → НД2 → НС3 → Т НД3 → НС1 → НС2 → А					

Рисунок 4.1 – Логічна схема робіт на фрезерних верстатах із застосуванням спеціальних пристроїв

Висновок

Загалом діяльність служби охорони праці на підприємстві можна оцінити як добру, однак потребує посиленого фінансування та системного навчання працівників і фахівців.

За останні п'ять років зафіксовано один випадок травмування (ушкодження кінцівки), що стався з вини самого працівника. Сформовано комплекс заходів для поліпшення умов праці та підвищення рівня безпеки.

5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Рациональне налагодження систем і агрегатів тракторів та автомобілів опосередковано забезпечує оптимальні режими їхньої роботи. Оснащення рухомого складу вбудованими датчиками та засобами бортового контролю зменшує трудомісткість діагностики, підвищує її точність і забезпечує оперативний моніторинг технічного стану та режимів експлуатації машини.

Розрахунок економічної ефективності починаємо з визначення капітальних вкладень для базового K^6 і нового K^H варіантів. Зокрема:

– K^6 – сукупні інвестиції у наявну систему (без модернізації), визначається за формулою 5.1;

– K^H – загальні інвестиції у варіант з бортовими датчиками та контролем, розраховується за формулою 5.2:

де: $V_{об}^6$ і $V_{об}^H$ – вартість комплекта обладнання для базового та для нового варіантів відповідно:

$$V_{об}^6 = 276 \text{ грн}, V_{об}^H = 3000 \text{ грн}$$

V_M^6, V_M^H – вартість монтажу обладнання у базовому та новому варіантах розраховуються відповідно за формулами 5.3 та 5.4:

де: T_M – трудомісткість монтажу обладнання для базового та нового варіантів (люд·год): $T_M^6 = 1 \text{ люд·год}$, $T_M^H = 5 \text{ люд·год}$;

$V_{ГЗ}^6$ – погодинна заробітна плата діагноста: 9,15 грн/год;

$V_{ГЗ}^H$ – погодинна заробітна плата оператора-діагноста: 9,50 грн/год.

$$K^6 = 276 + 1 \cdot 9,15 \cdot 0,7 = 282,4 \text{ грн}$$

$$K^H = 3000 + 5 \cdot 9,5 \cdot 0,7 = 3033,25 \text{ грн}$$

Приведені капітало-вкладення розраховуються за формулами 5.5 та 5.6:

$$K_{пр}^6 = 0,15 \cdot 282,4 = 41,52 \text{ грн}$$

$$K_{пр}^H = 0,15 \cdot 3033,25 = 450,78 \text{ грн}$$

де K –нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень (нормативна норма прибутковості), що використовується для приведення витрат і оцінки доцільності інвестицій.

Річні експлуатаційні витрати B включають: оплату праці оператора-діагноста B_0 , витрати на поточний ремонт $B_{\text{п}}$, амортизаційні відрахування на капремонт $B_{\text{к}}$ та витрати на електроенергію $B_{\text{е}}$.

Відповідно, для базового та нового способів діагностування використовуються формули 5.7 та 5.8.

Загальні витрати на заробітну плату (за рік) для базового та нового варіантів визначають за формулою 5.9:

де: $B_{\text{осн}}$ –основна заробітна плата (оклад/тариф + відрядні нарахування за фактично відпрацьований час), розраховується за формулами 5.10 та 5.11:

де: $B_{\text{гз}}^{\text{б}}$ –погодинна ставка діагноста, $B_{\text{гз}}^{\text{б}} = 9,15$ грн/год;

$B_{\text{гз}}^{\text{н}}$ –погодинна ставка оператора-діагноста, $B_{\text{гз}}^{\text{н}} = 9,50$ грн/год;

$T^{\text{б}}$ –трудомісткість робіт за базовим варіантом, $T^{\text{б}} = 2$ люд·год;

T –трудомісткість робіт за новим варіантом, $T = 3$ люд·год.

$$B_{\text{осн}}^{\text{б}} = 9,15 \cdot 2 = 18,3 \text{ грн}$$

$$B_{\text{осн}}^{\text{н}} = 9,5 \cdot 0,3 = 2,85 \text{ грн}$$

$B_{\text{соц}}$ –нарахування на соціальне страхування (єдині соціальні внески та інші обов'язкові відрахування), що розраховуються як частка від фонду оплати праці за формулою 5.12:

$$B_{\text{соц}}^{\text{б}} = 18,3 \cdot 0,5 = 9,15 \text{ грн}$$

$$B_{\text{соц}}^{\text{н}} = 2,85 \cdot 0,5 = 1,43 \text{ грн}$$

$B_{\text{нв}}$ –накладні витрати (адміністративні та загальновиробничі витрати, пов'язані з організацією та забезпеченням процесу діагностування), розраховується за формулою 5.13:

$P_{\text{зв}}$ –резерв на непередбачені витрати, що приймається у межах **5–10 %** (зазвичай від суми прямих/експлуатаційних витрат):

$$B_{\text{HB}}^{\text{б}} = 18,3 \cdot \left(\frac{5}{100}\right) = 0,92 \text{ грн}$$

$$B_{\text{HB}}^{\text{н}} = 2,85 \cdot \left(\frac{5}{100}\right) = 0,14 \text{ грн}$$

Загальна зарплата на діагностування 1 двигуна складає:

$$B_{\text{заг}}^{\text{б}} = 18,3 + 9,15 + 0,92 = 28,38 \text{ грн}$$

$$B_{\text{заг}}^{\text{н}} = 2,85 + 1,43 + 0,14 = 5,42 \text{ грн}$$

Витрати на поточний ремонт для базового та нового способів визначається за формулами 5.14 та 5.15:

де K – капітальні вкладення.

Відрахування на поточний ремонт приймаємо на рівні 2,3 % (від балансової вартості/капвкладень у відповідному варіанті):

$$B_{\text{п}}^{\text{б}} = (282,4 \cdot 0,23) / 100 = 0,64 \text{ грн}$$

$$B_{\text{п}}^{\text{н}} = (3033,25 \cdot 0,23) / 100 = 6,91 \text{ грн}$$

Амортизаційні відрахування на капітальний ремонт розраховуються за формулами 5.16 та 5.17.

Амортизаційні відрахування – 10 % на рік:

$$B_{\text{к}}^{\text{б}} = (282,4 \cdot 10) / 100 = 28,2 \text{ грн}$$

$$B_{\text{к}}^{\text{н}} = (3005,25 \cdot 10) / 100 = 303,33 \text{ грн}$$

Витрати на електроенергію охоплюють:

- споживання на освітлення робочого місця (для базового й нового способів);
- споживання на роботу комп'ютера (лише для нового способу).

Розрахунок виконують на одне діагностування.

Тривалість роботи освітлення:

$$T^{\text{б}} = 2 \text{ год}, T^{\text{н}} = 0,3 \text{ год}$$

Потужність освітлення робочого місця позначимо як – береться за паспортом

світильників або з проєкту електроосвітлення. За потреби допускається використання типової оцінки для робочого поста розраховується за формулою 5.18.

Витрати електроенергії на освітлення під час діагностування розраховуються за формулами 5.19 та 5.20:

де: $N_{оп}$ – встановлена потужність споживачів електроенергії для освітлення робочого місця, кВт; для обох варіантів приймаємо $N_6 = N_n = 1,7 \text{ кВт}$.

$V_{кг}$ – тариф за 1 кВт·год електроенергії, $V_{кг} = 1,68 \text{ грн}$.

$$V_e^6 = V_{ep}^6 = 1,7 \cdot 2 \cdot 1,68 = 5,7 \text{ грн}$$

$$V_{ep}^n = 1,7 \cdot 0,3 \cdot 1,68 = 0,86 \text{ грн}$$

Додаткові витрати електроенергії ПК для нового способу розраховується за формулою 5.21:

де: $N_{кн}$ – споживана потужність (витрата електроенергії) комп'ютера; приймаємо $N_{кн} = 1,2 \text{ кВт}$:

$$V_{ек}^n = 1,2 \cdot 0,3 \cdot 1,68 = 0,6 \text{ грн}$$

Сумарні витрати електроенергії (новий спосіб, на одне діагностування) розраховується за формулою 5.22:

$$V_e^n = 0,86 + 0,6 = 1,46 \text{ грн}$$

Експлуатаційні витрати на 1 діагностування (зарплата + електроенергія):

$$V^6 = 28,38 + 0,64 + 28,2 + 5,7 = 62,92 \text{ грн}$$

$$V^n = 5,42 + 6,91 + 303,33 + 1,46 = 317,12 \text{ грн}$$

Економічний ефект від упровадження діагностичного поста формується за рахунок зменшення витрат на ТО/ремонт рухомого складу та скорочення витрат пального, розраховується за формулою 5.23:

де: $E_{то}^n$ – економія коштів завдяки зменшенню витрат на технічне обслуговування;

$E_{п}^n$ – економія коштів за рахунок зниження витрати пального.

Економія на ТО (для нового варіанта) за розрахунковою формулою 5.24:

$$E_{\text{то}}^{\text{н}} = (4000 \cdot 5 \cdot 0,9) / 100 = 180,0 \text{ грн}$$

де: $L = 4000$ мото-год –річний напруження при новому варіанті.

Економія палива розраховується за формулою 5.25:

де Q –питомі витрати пального на 1 мото-год роботи, $Q = 15$ л/мото-год;

$C_{\text{п}}$ –ціна 1 л пального, $C_{\text{п}} = 48$ грн/л.

$$E_{\text{п}}^{\text{н}} = (4000 \cdot 15 \cdot 48 \cdot 6) / 100 = 79200,0 \text{ грн}$$

$$E^{\text{н}} = 180,0 + 79200,0 = 79380,0 \text{ грн}$$

Річна економія коштів від упровадження діагностичного поста (без зарплат і електроенергії), розраховується за формулою 5.26:

$$E_{\text{р}} = 79380,0 - (450,78 + 317,12) = 78612,1 \text{ грн}$$

Строк окупності капвкладень (без урахування зарплат і електроенергії) розраховується за формулою 5.27:

$$C = 3033,25 / 78612,1 = 0,03 \text{ року}$$

Таблиця 6.1 – Оцінка економічної результативності

Показники		Програма діагностування	
		1	100
Трудовітність обслуговування, люд-год;	базова	2	200
	нова	0,3	30
	Економія	+1,7	+170
Кількість обслуговуючого персоналу, чол.	базова	1	1
	нова	1	1
Капітальні вкладення, грн.	базова	276,81	276,81
	нова	3005,3	3005,3
Експлуатаційні витрати, грн.	базова	62,92	3436,8
	нова	317,12	998,2
	Економія	-254,2	+2438,6
Витрати на заробітну плату,	базова	28,38	2838

грн.	нова	5,42	452
	Економія	+22,96	+2383
Витрати на електроенергію, грн.	базова	5,7	570
	нова	1,46	146
	Економія	+4,24	+424
Термін окупності, років		0,03	

ВИСНОВОК

1. За результатами аналітичного огляду найбільш перспективним способом діагностики технічного стану дизелів є віброакустичний метод; оснащення двигуна датчиками вібрацій із виведенням індикації в кабіну дозволяє обходитися без окремого діагноста.
2. Виділено чотири ключові вузли з часткою відмов понад 10 %: двигун –10 %, гідропривід –48 %, механічні передачі –28 %, електросистема –14 %; у більшості випадків їхній стан відображається у вібраційній картині.
3. Визначено резерви удосконалення системи ТО та запропоновано раціональні схеми обслуговування з використанням діагностики, що дає змогу підвищити ресурс машини на 6–8 %.
4. Підтверджено, що вібраційні параметри є інформативним індикатором стану агрегатів; застосування чутливих датчиків і сучасного ПЗ забезпечує оцінювання як вузла в цілому, так і окремих деталей.
5. Основним джерелом вібрацій у двигуні є циліндропоршнева група (пара «поршень–гільза»): під час проходження ВМТ відбувається «перекидання» поршня, а збільшені зазори посилюють вібрації.
6. Важливим чинником формування вібрацій є стан паливної апаратури: розрегулювання призводить до зростання вібраційних складових.
7. Розроблено комплекс заходів з охорони праці: виконано аналіз виробничого травматизму та побудовано логіко-наслідкову модель безпечної роботи на фрезерному верстаті.
8. Техніко-економічна оцінка підтверджує доцільність інтеграції діагностики в систему ТО: очікуваний економічний ефект $\approx 49\,000$ грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матеріали Держкомстату України [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
2. Осьмак В.Я. Розвиток конструкцій кормозбиральних комбайнів / В.Я. Осьмак, В.В. Погорілий // Техніка АПК, 2005. – № 5-6. – С.20-22.
3. Види сучасних комбайнів. Ремонт і обслуговування комбайнів [Електронний ресурс] / Режим доступу <http://kazar.ru/node/6577>.
4. Калганков Є. В. Особливості фрактального аналізу поверхні руйнування гумових футерівок, що працюють в умовах абразивно-втомного зносу / Є. В. Калганков. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ. – 2017. – №133. – С. 66–74.
5. Дорошенко О. В. Обґрунтування методів та параметрів діагностування паливних систем мобільних сільськогосподарських машин / О. В. Дорошенко, Є. В. Калганков. // Zbiór artykułów naukowych z Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej "Nowy sposób rozwoju Inżynieria i Technologia" Sp. z o.o. «Diamond trading tour» Warszawa. – 2017. – С. 44–50.
6. ДСТУ 9049:2020 Технічна діагностика. Діагностування та контролювання технічного стану посудин і трубопроводів під впливом агресивного робочого середовища. Загальні вимоги.
7. ДСТУ 2389-94 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення.
8. Технічне діагностування [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>.
9. Калганков Є.В. Розрахунок довговічності гумових футерівок шарових рудорозмольних мельниць з урахуванням старіння гуми / Калганков Є.В. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. Праць, Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. –

Дніпропетровськ, 2013. – No 113. С. 181–202.

10. Дирда В. І. Ремонт машин та обладнання. Підручник для вищих навчальних закладів [Текст] / В. І. Дирда, П. Т. Мельянцов, О. І. Кириленко та ін. – Днівськ, Журофонд, 2015. – 292 с.

11. Калганков Є.В. Технічне діагностування об'ємних гідроприводів трансмісії як об'єктивна необхідність / Є.В. Калганков // Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної заочної конференції «Сучасна наука: теорія і практика» (м. Запоріжжя, 28–30 листопада 2012 р.) / Всеукраїнське громадське об'єднання «Нова освіта». – Запоріжжя.: 2012. – Том II. – С. 88–90.

12. Калганков, Є.В. Обґрунтування інформативних діагностичних параметрів технічного стану об'ємного гідроприводу трансмісії ГСТ-90 / Є.В. Калганков // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2009. – № 2. – С. 71-74.

13. Калганков Є.В. Деякі проблеми гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідроприводу мобільних машин / Є.В. Калганков // Гео- технічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. –Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ. – 2013. – №108. – С. 133-142.

14. Дирда В. І. Определение долговечности упругонаследственных сред с использованием обобщенных критериев разрушения / В. И. Дирда, А. В. Толстенко, Е. В. Калганков. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №4. – С. 4–7.

15. Мельянцов П. Т. Організація використання техніки за умов дефі- циту матеріально - технічних ресурсів / П. Т. Мельянцов, Є. В. Калганков. // Zbiór raportów naukowych. „Inżynieria i technologia. Teoria. Praktyk Sp. z o.o.

«Diamond trading tou. – 2010. – С. 84–87.

16. Осьмак В. Розвиток конструкцій кормозбиральних комбайнів / Осьмак В., Погорілий В. // Техніка АПК, 2005. –№ 5 - 6. – С.20-22.

17. Види сучасних комбайнів. Ремонт і обслуговування

комбайнів [Електронний ресурс] / Режим доступу <http://kazar.ru/node/6577>.

18. Волошин Р.В. Обґрунтування ефективних методів діагностування агрегатів мобільних сільськогосподарських машин / Р.В. Волошин, Є.В. Калганков // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції "Інтеграція світових наукових процесів як основа суспільного прогресу": ГО

«Інститут інноваційної освіти»; Науково-учбовий центр прикладної інформатики НАН України. – Київ. 2018. – С. 200-205.

19. Башта Т.М. Технічна діагностика гідравлічних приводів./ Т.М. Башта, Т.В. Алексєєва, В.Д. Бабанська – К.: Машинобудування, 1989. – 264 с.

20. Калганков Є.В. Розробка технологічного процесу відновлення деталі [Методичні рекомендації] / Калганков Є.В. – Дніпро: ДДАЕУ, 2021. – 75 с.

21. Бельських В. І. Діагностування і обслуговування сільськогосподарської техніки / Бельських В. І.-К.: Колос, 1980. - 575 с.

22. Узагальнена теорія зносу пружних середовищ / О. С.Кобець, В. И. Дирда, Є. В. Калганков, І. М. Цаніди. // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2012. – №2. – С. 81– 84.

23. Нижняк Д.В. Визначення показників надійності колінчатих валів автотракторних двигунів / Нижняк Д.В., Калганков Є.В., Дирда В.І. // Inżynieria i technologia. 2014. osiągnięć, projekty hipotezę. (29.12.2014 - 30.12.2014) – Warszawa: – 2014. – С. 8-13.

24. Калганков Є. В. Особливості фрактального аналізу поверхні руйнування гумових футерівок, що працюють в умовах абразивно-втомного зносу / Є. В. Калганков. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. –Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ. – 2017. – №133. – С. 66–74.

25. Асатурян В.І. Теорія планування експерименту / Асатурян В.І.. Х.:, 1983. - 247 с.

26. Аллілуєв В.О. Дослідження віброакустичних каналів циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згоряння / Аллілуєв В.О., Солов'єв В.І.// Діагностика, підвищення ефективності, економічності і довговічності двигунів . – Нотатки ЛСХІ, т. 256, 1974, с 8-11.

27. Закон України “Про охорону праці” / Законодавство України про охорону праці. - К. Нова редакція 2002 р.

28. Закон України "Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування" [Електронний ресурс] // Відомості Верховної Ради України (ВВР). - 1999, - № 46-47, - с. 403. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14#Text>

29. Економіка ремонтного підприємства: підручник. / [Аветісян В.К., Бантковський В.А., Луценко А.П. та інші] – Харків, ХНТУСГ, 2005 – 374 с.

30. Калганков Є.В. Методичні рекомендації до виконання і оформлення дипломних проектів ОС "Бакалавр" за спеціальністю 208 "Агроінженерія" і дипломних робіт ОС "Магістр" за спеціальністю 208 "Агроінженерія"/ Калганков Є.В. – Д.: ДДАЕУ, 2021. – 36 с.