

ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр" на тему:

Обґрунтування параметрів та режимів роботи діагностичного комплексу для дизельних двигунів

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-3-23
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____ Зайцев Антон Сергійович

Керівник: _____ Пугач Андрій Миколайович

Рецензент: _____

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: «Магістр»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

ТСГМ

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

ініціали

(прізвище,

« » _____ 2023 р.

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

Зайцеву Антону Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування параметрів та режимів роботи діагностичного комплексу для дизельних двигунів

керівник роботи Пугач Андрій Миколайович, д.н. держ. упр., к.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«12» листопада 2024 року № 3784

2. Строк подання студентом роботи 13.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Огляд стану питання в галузі машинобудування та існуючих машин. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан питання і завдання досліджень 2. Теоретичні дослідження 3. Програма і методика досліджень 3. Результати досліджень 4. Охорона праці та захист в надзвичайних ситуаціях 5. Охорона праці та захист в надзвичайних ситуаціях 6. Економічна ефективність. Загальні висновки. Список використаних джерел.

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. 2. Аналіз літературних і патентних джерел. 3. Теоретичні дослідження. 4. Програма і методика досліджень 5. Результати досліджень. 6. Економічні показники. 7. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Пугач А.М., професор		
2	Пугач А.М., професор		
3	Пугач А.М., професор		
4	Пугач А.М., професор		
5	Пугач А.М., професор		
6	Пугач А.М., професор		
нормоконтроль	Теслюк Г.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 18.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 19.04.2024 р.	Виконав
2	Теоретичний	до 21.06.2024 р.	Виконав
3	Експериментальний	до 13.09.2024 р.	Виконав
4	Охорона праці	до 08.11.2024 р.	Виконав
5	Економічний	до 15.11.2024 р.	Виконав
6	Демонстраційна частина	до 14.12.2024 р.	Виконав

Студент

_____ .
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ .
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Зайцев А.С. Обґрунтуванням параметрів та режимів роботи діагностичного комплексу для дизельних двигунів / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» - ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

У першому розділі представлено аналіз сучасних технологічних процесів.

У другому розділі проведено теоретичні дослідження.

У третьому розділі представлено програму, методику експериментальних досліджень та результати досліджень

У четвертому розділі приведено результати експериментальних досліджень

У п'ятому розділі приведено аналіз стану охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях

У шостому розділі приведено оцінку економічної ефективності від впровадження

Ключові слова: діагностичний комплекс, енергетичні затрати, дизельний двигун, експлуатаційні показники, метод програмний.

Zaitsev A. Diagnostic expert systems for diagnosing internal combustion engines / A. Zaitsev // The 4th International scientific and practical conference «Science and technology: challenges, prospects and innovations» (28-30,2024), Tsuka, Japan

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	10
1.1 Прогресивна система технічного сервісу і роль діагностики в ній.....	10
1.2 Діагностичні експертні системи.....	15
1.3 Огляд сучасних методів технічної діагностики дизелів.....	21
Висновки.....	29
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМНОЇ ДІАГНОСТИКИ.....	31
2.1 Трирівнева система пошуку несправностей в рамках системної діагностики.....	33
2.2 Ієрархічне представлення технічного об'єкту.....	35
2.3 Аспекти роботи діагностичних експертних систем.....	41
2.4 Розробка експертної системи розпізнавання несправностей.....	44
Висновки.....	56
3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	57
3.1 Формування баз даних експертної системи.....	57
3.2 Методика вибору алгоритму розпізнавання індикаторних показників експертною системою.....	60
3.3 Визначення інформативності індикаторних показників.....	61
Висновки.....	69
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	70
Висновки.....	76
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	77
Висновки.....	80
6 ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКОНОМІЧНА	82
Висновки.....	85
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	88
ДОДАТКИ.....	94

ВСТУП

Дизельні двигуни є важливим елементом сучасного машинобудування, зокрема в транспортній, сільськогосподарській та промисловій галузях. Їх ефективність та надійність безпосередньо залежать від стану вузлів і систем, які з часом зазнають зношення та можуть втрачати свою функціональність. Тому особливу увагу слід приділяти діагностиці дизельних двигунів, яка дає змогу вчасно виявляти несправності, оцінювати технічний стан та оптимізувати експлуатаційні характеристики.

Для забезпечення точності та інформативності діагностики необхідно обґрунтувати параметри та режими роботи діагностичних комплексів. Вони мають відповідати специфіці конструкції дизельних двигунів, умовам їх експлуатації та можливим сценаріям несправностей.

Метою дослідження є розробка методології обґрунтування параметрів і режимів роботи діагностичного комплексу, який дозволяє підвищити ефективність технічного обслуговування дизельних двигунів. Завданнями є аналіз сучасних методів діагностики, вибір оптимальних показників контролю, розробка алгоритмів для обробки даних та створення рекомендацій щодо застосування діагностичного обладнання.

Запропонований підхід сприятиме покращенню економічних та експлуатаційних показників дизельних двигунів, зниженню витрат на ремонт та простої техніки, а також підвищенню її надійності.

Діагностичні комплекси для дизельних двигунів повинні враховувати специфіку різних типів несправностей, таких як зношення поршневої групи, несправності паливної системи, некоректна робота турбонаддуву тощо. Для цього важливо визначити ключові діагностичні параметри, серед яких можуть бути тиск і температура в камері згоряння, продуктивність паливної системи, рівень викидів шкідливих речовин, а також віброакустичні характеристики.

Ще однією важливою складовою є вибір режимів роботи діагностичного обладнання, які мають забезпечувати високу точність вимірювань навіть в умовах змінного навантаження двигуна. Це включає тестування при різних обертах колінчастого вала, різних температурах та рівнях навантаження. Розробка таких режимів передбачає комплексний підхід, що поєднує теоретичні дослідження з практичними експериментами.

Особливу увагу слід приділити оптимізації процесу збору та обробки даних. Сучасні діагностичні комплекси мають бути оснащені засобами автоматизованого аналізу, що дозволяє в реальному часі оцінювати стан двигуна. Використання сучасних інформаційних технологій, таких як програмні алгоритми прогнозування несправностей, сприяє підвищенню оперативності та точності діагностики.

Таким чином, обґрунтування параметрів і режимів роботи діагностичних комплексів є необхідною умовою для забезпечення надійної та ефективної експлуатації дизельних двигунів. Результати таких досліджень знайдуть застосування у створенні нових технічних рішень, що відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності, екологічності та економічності експлуатації двигунів.

Показники надійності сільськогосподарської техніки, особливо - енергонасиченої, такої, як трактори і комбайни, безпосередньо залежать від якості технічного обслуговування і ремонту (ТОР).

В свою чергу, одним з факторів, що впливають на експлуатацію та ТОР, є своєчасність і правильність застосування технічної діагностики.

Якість технічної діагностики, її інформативність, широта спектру застосовуваних методів і засобів є одними з головних показників, що визначають надійність машин агропромислового комплексу і суміжних галузей економіки.

В технічній і науково-дослідницькій літературі представлена значна кількість методів і засобів технічної діагностики двигунів внутрішнього

згоряння (ДВЗ). Однак дане різноманіття не є цілісною системою, а розрізнене на безліч елементів.

Крім того, деякі методи недостатньо ефективні для отримання достовірної інформації або взагалі не досліджені стосовно дизелів.

Мета дослідження. Розробка алгоритмів системної діагностики машин, що включають перспективні апаратні і програмні методи та засоби діагностики дизелів.

Завдання дослідження:

- огляд літератури з метою виявлення потенційно корисних, але не достатньо вивчених для дизелів методів і засобів технічної діагностики;

- розробка експертної системи розпізнавання несправностей технічних об'єктів, що відповідає вимогам, які висуває агроінженерія;

- експериментальні дослідження розглянутих в ході огляду літератури методів і засобів діагностики ДВЗ в частині їх модернізації, в тому числі з переходом до цифрових технологій.

Об'єкт дослідження. Системна діагностика дизелів, як синтез методологічної та апаратної основ.

Предмет дослідження. Методи і засоби технічної діагностики дизелів, придатні для використання в розглянутих умовах; їх дійсний потенціал, взаємозв'язок і можливості модернізації.

Наукова новизна роботи полягає в синтезі методологічної та апаратної основ системної технічної діагностики, вперше розглянутої для тракторів і комбайнів, на основі експертної системи

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Прогресивна система технічного сервісу і роль діагностики в ній

Важливими чинниками підвищення надійності мобільних енергетичних установок агропромислового комплексу є їх своєчасне технічне обслуговування і ремонт.

Історичний шлях розвитку стратегій технічного сервісу (раніше відомих як концепції технічного обслуговування і ремонту) сільськогосподарської техніки (головним чином тракторів), привів до послідовної появи трьох різних стратегій.

Найпершою стратегією ТОР прийнято вважати заявочну, що зародилась одночасно з появою перших тракторів. В її рамках ТО і ремонт проводилися за фактом відмови працівниками, як правило, уповноваженими заводом-виробником. Очевидно, що в таких умовах про будь-яке планування і прогнозування ресурсу техніки не могло бути й мови.

Складні економічні та політичні умови 1920-х років привели до появи машинно-тракторних станцій (МТС), першою з яких вважається заснована в 1928 році Шевченківська МТС на території нинішньої Одеської області. Концепція МТС дозволила вперше систематизувати ТОР тракторів, значно підвищивши їх надійність.

Одним з результатів даного нововведення стала поява регламентної стратегії технічного обслуговування і ремонту, при якій їх періодичність визначається напрацюванням (в мотогодинах, га умовної оранки, кг витраченого палива, пробігом в кілометрах) трактора, комбайна, автомобіля тощо після чергового ТО або ремонту. Принцип суворої періодичності обслуговування і сервісу застосовується для технічних засобів АПК протягом всього терміну їх служби.

Дана стратегія в значній мірі реалізує підтримку та / або відновлення експлуатаційних характеристик тракторів, їх вузлів і складових елементів.

Структура ремонтного циклу (стосовно тракторів) є наступною: періодичне технічне обслуговування (ТО) №2 після трьох обслуговувань №1, ТО-3 після трьох ТО-2, поточний ремонт (ТР) після одного ТО-3, капітальний ремонт (КР) після двох поточних ремонтів трактора. Також на початку зміни проводиться ЩТО - щозмінне технічне обслуговування.

Ієрархічна схема регламентної стратегії ТОР приведена на рис. 1.1. Діаграма періодичності технічного обслуговування і ремонтів показана на рис. 1.2.

В даний час ефективність регламентної стратегії відкрито ставиться під сумнів, оскільки використовуваний в ній алгоритм управління надійністю побудований на загальностатистичних показниках і не є конкретизованим, тобто не має прив'язки до конкретного технічного об'єкту.

Тези про неспроможність описуваної стратегії висувалися вже в класичній літературі кінця 70-х років. Основною вразливою частиною даного алгоритму обслуговування і ремонту є те, що періодичність операцій ремонтного циклу заздалегідь запропонована системою і незмінна (за винятком деяких випадків) для всього парку обраної моделі, незалежно від поточного ресурсу, умов експлуатації та обслуговування об'єкта.

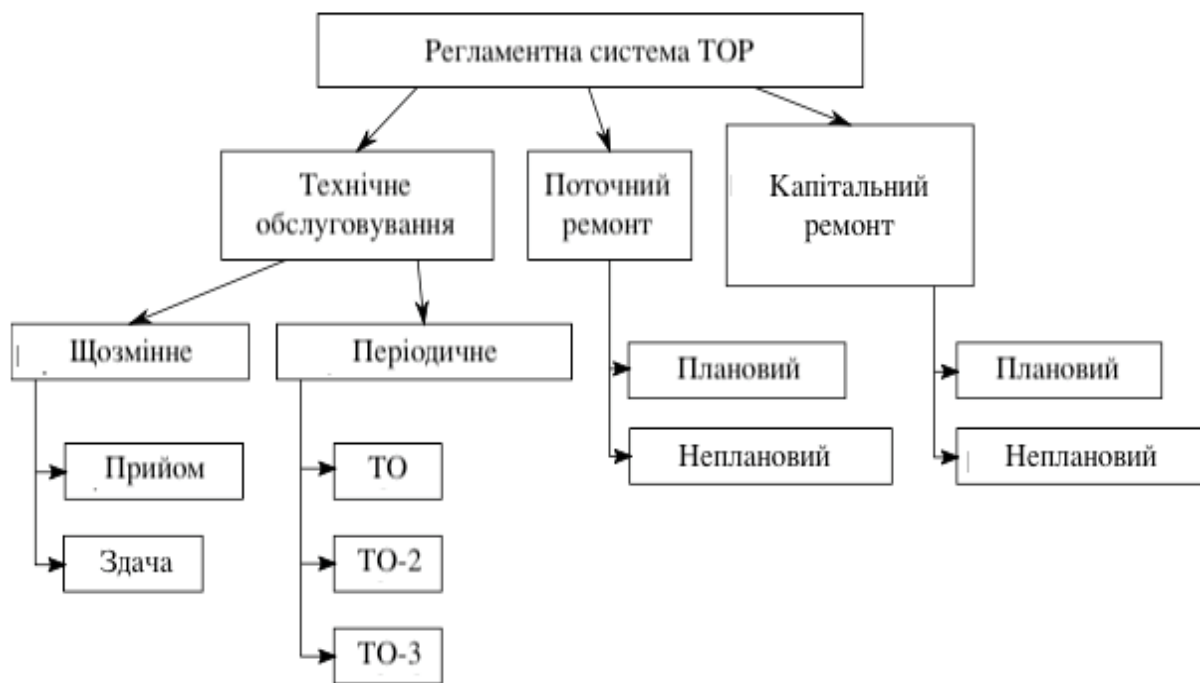


Рисунок 1.1 – Ієрархічна схема регламентної стратегії ТОР

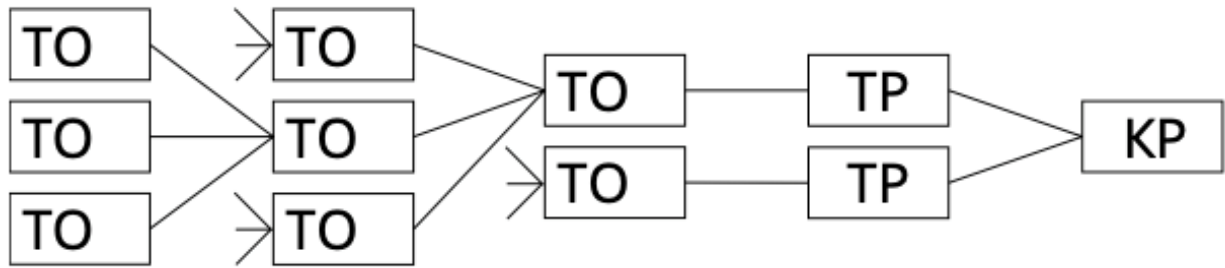


Рисунок 1.2 – Діаграма періодичності ТО і ремонту

Регламентна стратегія ТОР побудована на припущенні про стабільну залежність потреби машинно-тракторного парку в ремонтно-обслуговуючих заходах від напрацювання. Прийняті похибки періодичності ТО і ремонту в розмірі $\pm 10\%$ не готові відобразити дійсні відхилення ресурсу технічних об'єктів і їх елементів від середніх значень даного показника. Це викликає значне погіршення стану машинно-тракторного парку (МТП), зниження коефіцієнта готовності, технологічної та експлуатаційної ефективності технічних засобів.

З наведених причин, крім іншого, значно знижується ефективність використання ресурсу об'єктів. Наприклад, на автомобільному транспорті недовикористання ресурсу деталей і вузлів ДВЗ становить 35-45%. Даний показник був би прийнятним, тільки якщо б при ньому досягалося значне підвищення надійності, чого, як правило, не спостерігається.

Дана уразливість була частково усунена за допомогою впровадження планово-попереджувальної стратегії, в рамках якої при проведенні ТО-3 і ремонту застосовувалися і застосовуються елементи технічної діагностики.

Подальшим розвитком планово-попереджувальної стратегії є стратегія управління надійністю за технічним станом, що зазнала поширення вже в 80-і роки. В даний час пропонується коригування інтервалу ремонтних робіт за результатами діагностики, проведеної при технічному обслуговуванні, а також в процесі експлуатації. Дане удосконалення засноване на аналізі залежності

технічного стану об'єкта експлуатації від часу з використанням різних методів математичної статистики і теорії надійності.

Діагностування в рамках описуваної системи може здійснюватися (в залежності від суті і трудомісткості методу) на всіх видах ТО і ремонту, починаючи від нижчих (ЩТО, ТО-1). Так досягається поліпшення показників надійності шляхом управління технічним станом об'єкта в експлуатації.

Перші дослідження в цьому напрямі проводилися ще в середині-кінці 1960-х років. Основним же підтвердженням потенціалу стратегії ремонту за станом був так званий «Богодухівський експеримент» по передремонтному діагностуванню тракторних дизелів, проведений ГОСНИТИ спільно з Сільгосптехнікою Богодухівського району Харківської області в 1970-1971 рр. Незважаючи на вкрай обмежений набір діагностичних засобів і їх високу трудомісткість, вдалося на 30-35% знизити обсяг капремонтів, в тому числі перевести частину з них в розряд поточних ремонтів. Нажаль, даний експеримент із зазначених причин (а також через неможливість зміни існуючої в той час загальної регламентної системи) широкого поширення не отримав.

Основний принцип стратегії сервісу за станом - зниження потреби у втручанні в роботу справного обладнання і, навпаки, своєчасне виявлення передвідказних станів. Досягається це за рахунок своєчасного, оперативного та повноцінного діагностування. Основною відмінністю планово-запобіжної стратегії від сервісу за станом є те, що в першому випадку діагностування проводиться головним чином в ході ТО-3.

У зв'язку з цим перший крок до даної системи може полягати в реорганізації методів діагностики. Навіть при існуючій методології ТО і ремонту пріоритет в діагностиці повинен віддаватися тим методам, які мають мінімальну тривалість і не вимагають додаткового інструментального забезпечення.

На жаль, умови, що склалися на даний момент призвели до того, що в АПК спостерігається значний дефіцит коштів діагностики, а також іншого обладнання, що робить можливим практичне застосування описаної системи

технічного сервісу. Крім того, впровадження якісної діагностики перешкоджає незацікавленість в ній на підприємствах технічного сервісу. Як правило, на подібних підприємствах існує строгий регламент ремонту та обслуговування об'єктів, що не допускає використання діагностики для визначення предмета і обсягу ремонту.

Слід відповісти, методологічна основа технічного сервісу в АПК і суміжних галузях, заснована на розробках 70-х і 80-х років ХХ століття, є слабкою і застарілою, що, в свою чергу, гальмує застосування прогресивних технологій технічного сервісу. Одним із завдань цієї роботи є формування сучасного підходу до методології діагностики в цілому і діагностування як окремого, що представляють собою відповідно методологію і процес, спрямовані на ліквідацію невизначеності знань про стан об'єкта. Дане визначення може бути застосоване як до технічних, так і до біологічних об'єктів. Навіть в економічному середовищі існують методи, звані діагностичними.

В основу оптимізації алгоритмів пошуку при діагностиці закладається принцип оптимального співвідношення трудомісткості даного процесу і якості одержуваної в ході нього інформації.

Як вже було зазначено, в сучасних умовах все більшого значення набуває оперативне розпізнавання несправностей за основними показниками технічного стану об'єкта. Подібний підхід дозволяє шляхом вчасного виявлення несправностей і розрегулювань в значній мірі скоротити простої техніки і в ряді випадків уникнути невиправданих ремонтів.

Концепція ефективного використання сільськогосподарської техніки в ринкових умовах, крім іншого, задає курс на більш широке впровадження засобів технічної діагностики. Більш того, в пунктах 3.3 та 3.4 ДСТУ 4973:2008 безпосереднім чином вказується на необхідність врахування даних діагностики при визначенні обсягів ТО, поточних і капітальних ремонтів. Те ж пропонується і ДСТУ 7322:2013.

Технології пошуку несправностей, що існують в регламентній стратегії сервісу, засновані головним чином на методах глибокого інструментального контролю і реалізуються жорстко закріпленим алгоритмом послідовних перевірок з мінімальним застосуванням діагностичних тестів і аналітичних висновків. Сукупність операцій діагностування в даній методології обумовлює розпізнавання лише відмов, що найбільш часто зустрічаються. Внаслідок цього розвиваються ситуації, при яких фактичний потік відмов значно перевищує ті, що діагностуються.

Важливо відзначити, що саме інструментальний контроль технічного стану об'єкта в багатьох випадках пов'язаний з демонтажем контрольованих вузлів, що негативно позначається на роботі обладнання, що не потребує ремонту.

Таким чином, можна стверджувати, що існуючі методи і засоби діагностики по ряду причин не здатні повноцінно забезпечити необхідну точність пошуку несправностей і постановки діагнозу, тим більше в процесі рядової експлуатації і при нижчих видах технічного обслуговування. У зв'язку з цим назріває необхідність реорганізації існуючих або розробки нових, більш універсальних, систем і алгоритмів пошуку несправностей, заснованих не тільки на можливостях сучасних інструментальних методів діагностики, а й на особливостях зміни технічного стану в процесі експлуатації і в ході ремонтів, а також ознаках (симптомах), супутніх цим змінам.

Для подальшої роботи розглянемо методи і засоби технічної діагностики.

1.2 Діагностичні експертні системи

Поряд з плановим діагностуванням існують ситуації, в яких необхідно позапланове виявлення несправності (головним чином, при появленні ознак (симптомів), не характерних для штатної експлуатації). У даній ситуації, на відміну від планового діагностування, необхідна участь досвідченого фахівця, здатного визначити можливі несправності, вказати стратегії їх виявлення і

подальші дії при виявленні тієї чи іншої несправності. Досвідчені діагности пізньорадянського періоду виявляли до 70% несправностей, але до поточного часу фахівці подібного рівня обчислюються одиницями, а посада діагноста, як така, на підприємствах АПК фактично відсутня.

Однак, не у всіх випадках існує можливість надання подібного роду допомоги - наприклад, в польових умовах необхідно найшвидшим чином виявити несправність і шляхи її усунення з метою уточнення наступних дій, які можуть варіюватися від простих маніпуляцій з обладнанням до евакуації пошкодженої техніки на ремонтну базу.

У подібних умовах функції досвідченого фахівця можуть в тій чи іншій мірі виконувати так звані експертні системи, що забезпечують підтримку прийняття рішень в умовах нестачі даних.

Експертні системи є однією із ступенів розвитку штучного інтелекту і застосовуються для управління складними процесами, що мають значну кількість параметрів і показників. Своєю назвою цей тип обчислювальних систем зобов'язаний тому, що моделює роботу експертів в заданій області інтелектуальної діяльності, полегшуючи рішення задач управління і прогнозування. Також для експертних систем характерно накопичення інформації в міру роботи для реалізації алгоритмів самонавчання в тій чи іншій мірі.

Експертні системи почали свій розвиток від таблиць і блок-схем для виявлення несправностей. Подібний лінійний формат при використанні з ЕОМ давав деяке підвищення продуктивності в порівнянні з використанням таблиць. Подальша еволюція експертних систем намітила у них тенденції до самонавчання.

Сучасні експертні системи стали розроблятися дослідниками штучного інтелекту в 1970-х роках, а в 1980-х отримали комерційне підкріплення. Технологія експертних систем істотно розширює коло розв'язуваних комп'ютерами практичних завдань, в тому числі і тих, вирішення яких

приносить значний економічний ефект. В даний час ЕС пропонуються і впроваджуються в багатьох сферах людської діяльності.

В інформатиці експертні системи розглядаються спільно з базами знань як моделі поведінки експертів в певній галузі з використанням процедур логічного висновку і прийняття рішень, а самі бази знань - як сукупність фактів і правил логічного висновку в обраній предметній області діяльності.

Типовий алгоритм роботи експертної системи наведено на рис. 1.3.

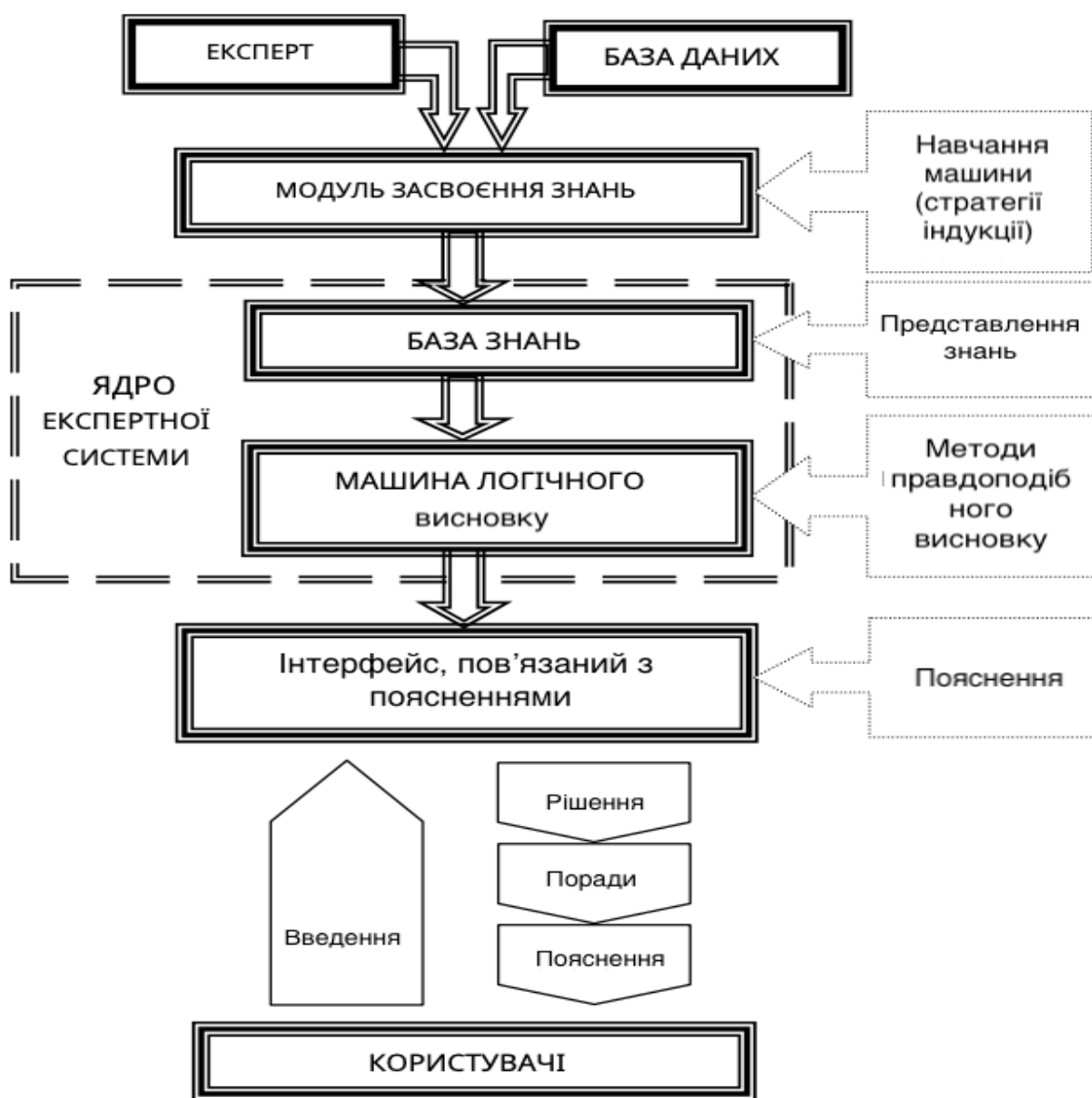


Рисунок 1.3 – Типовий алгоритм роботи експертної системи

Головним елементом експертної системи є база знань, що включає в себе інформацію, отриману як при проектуванні системи, так і в ході її

самонавчання. База знань є логічною стрункою системою, елементи якої об'єднані один з одним і з вхідними параметрами за допомогою математичних і / або логічних зв'язків. Типовій експертній системі притаманні два режими роботи:

1. Режим введення знань: в цьому режимі експерт за допомогою редактора бази даних вводить відомі йому відомості про предметну область у пам'ять ЕС.

2. Режим консультації: користувач веде діалог з експертною системою, повідомляючи їй відомості про поточне завдання і отримуючи рекомендації ЕС. Наприклад, на основі відомостей про амплітудно-частотну характеристику вібрацій ЕС ставить діагноз у вигляді переліку несправностей, найбільш ймовірних при заданих показниках.

Ефективність роботи експертної системи визначається якістю змісту в правилах знань і адекватністю механізму логічного висновку. У зв'язку з цим рекомендується основну увагу приділяти збору та аналізу експертних знань (бази даних) і розробці алгоритму пошуку несправностей технічних об'єктів.

Експертні системи застосовуються в багатьох галузях знань. Наприклад, програмний комплекс ONCOCIN, початок розробки якого датується 1980 роком, призначений для управління протоколами медичних обстежень і підтримки прийняття рішень по хіміотерапії онкологічних захворювань. Дана система є нащадком ЕС MYCIN, розробленої на початку 1970-х років для медичного бактеріологічного аналізу. Подальше використання експертних систем в медицині застопорилося з етичних міркувань, не дивлячись на той факт, що точність постановки діагнозу і лікування системою MYCIN (69%) була вищою, ніж у експертів з інфекційних хвороб.

Тенденції до використання експертних систем існують також і в освітньому середовищі. Це питання розробки і застосування експертних систем, головним чином на базі математичного апарату нечіткої логіки, для використання з метою контролю та стимуляції росту якості знань. До завдань подібних ЕС відносяться:

- оцінка якості знань і підготовки студентів і викладачів;
- професійна орієнтація учнів, в тому числі вибір університету для подальшого навчання;
- розробка і коригування індивідуальних завдань різного ступеня складності;
- структурування навчальної інформації та створення індивідуальних початкових планів.

Використання експертних систем у сфері освіти також пов'язано з проблемами етики, як, втім, і у всіх інших галузях, об'єктом яких є людина.

Для вирішення ж технічно орієнтованих проблем експертні системи застосовні в повній мірі, оскільки робота з технікою не вимагає дотримання етичних норм, а інженерні процеси піддаються тенденції до автоматизації.

Одним з факторів, які визначають необхідність застосування експертної системи для експрес-діагностики технічних засобів АПК, є, як було зазначено вище, необхідність оперативного реагування на виникаючі несправності.

Отже, першою визначальною властивістю подібної ЕС є її швидкодія.

Дана властивість може бути реалізовано двома шляхами:

1. Використання оптимізованого алгоритму аналізу даних на основі нескладних математичних рівнянь, відсутність необхідності обробки великого обсягу даних, тим більше, не чисельних, а, наприклад, графічних.

2. Застосування методів віддаленого доступу з центральним комп'ютером великої продуктивності (або їх мережею) при доступі до нього з периферичних пристроїв за допомогою кабельного або мобільного (мережі Edge, 3G, 4G тощо.) з'єднання. Даний варіант незручний для сільського господарства, оскільки мобільний, а тим більше кабельне інтернет-з'єднання може бути доступно далеко не завжди.

Широкий спектр застосовуваних в АПК технічних засобів свідчить про необхідність створення експертної системи, здатної працювати з зовнішніми базами даних, що підключаються. Подібні БД можуть створюватися спеціалістами як для конкретної моделі об'єкта діагностики, так і для групи

об'єктів, що володіють подібними характеристиками. Наприклад, незважаючи на відмінності в конструкції ходової частини і трансмісії тракторів МТЗ-80 і МТЗ-82, вони обидва оснащені дизелем Д-240. Це дозволяє відмовитися від дублювання баз даних несправностей дизеля для кожного трактора, обмежившись застосуванням єдиної бази для обох моделей.

Крім технічного стану тракторів і машин, значний вплив на їх ефективність надають умови експлуатації.

Тому третьою обов'язковою вимогою до експертної системи для потреб технічної діагностики в АПК є здатність обліку даних експлуатації при визначенні можливої несправності. Зрозуміло, це може бути досягнуто тільки при сумлінній і ретельній реєстрації несправностей, що виникають, і відповідних їм кількісних і якісних показників. Подібне ускладнення методології технічного сервісу спроможне надалі компенсувати (за рахунок прискорення процесу діагностування) трудовитрати на створення баз знань.

Експертні системи технічної діагностики можуть бути віднесені до двох категорій: пасивні (призначені для моніторингу робочого процесу) і активні (виявляють несправності за параметрами робочого процесу або за зовнішніми ознаками). Розглянемо ці категорії докладніше.

Елементи експертних систем також використовуються в програмах вібродіагностики Аврора-2000, Атлант-ПО (Перм, «Віброцентр»), ExpertAlert (Azima, США), Bently Nevada (General Electric, США).

Застосування експертних систем для діагностики тракторного дизеля було вперше розглянуто в 1990 році. Так система "Дизель-діагност", призначена головним чином для діагностування дизелів сімейства СМД-62.

Також існує модель експертної системи на базі нечіткої логіки для діагностики дизельних двигунів. Модель експертної системи виконана в середовищі Matlab і використовує значення тиску в циліндрі дизеля, температури відпрацьованих газів і тиску в паливопроводі високого тиску. отримані значення перетворюються в показники трізначної логіки і використовуються для наступного логічного висновку. Також в роботі

синтезована залежність ймовірності наявності несправності паливної апаратури від середнього індикаторного тиску і від максимального тиску в циліндрі.

Теоретично обґрунтовано та розроблено експертну систему підтримки прийняття рішень по виявленню несправностей автомобілів. Дана ЕС розрахована головним чином на інженерів і водіїв, що володіють невисоким рівнем знань в області автомобілів локального виробництва. Система реалізує діалоговий режим пошуку несправностей на двозначній логіці, а також при необхідності відображає списки і контактні дані сервісних центрів у великих містах країни.

Окремої згадки заслуговують системи діагностики на основі нейромережових технологій як сучасного засобу аналізу інформації. Даний метод зародився відносно недавно і швидко набирає популярність в науковому середовищі.

Пропонують комплексну систему діагностування вузлів і деталей автомобільних ДВЗ, засновану на віброакустичних показниках його роботи. Система використовує вірогідну нейронну мережу і метод конструювання шаблонів на основі дискретного вейвлет-перетворення. Отримані результати підтверджують потенціал визначення технічного стану ДВЗ за допомогою аналізу віброакустичних явищ, що виникають в процесі його роботи.

1.3 Огляд сучасних методів технічної діагностики дизелів

Найбільш примітивними і простими у виконанні є органолептичні методи, засновані на спостереженні за об'єктом діагностики, в тому числі при різних режимах його роботи, і формалізації отриманої інформації у вигляді так званих якісних ознак.

Відмінною рисою органолептичних методів є відсутність використання спеціальних інструментів.

До якісних ознак можна віднести, наступні:

- неможливість пуску дизеля. Під даною ознакою розуміється те, що при прокручуванні колінчастого валу стартером або пусковим двигуном дизель не запускається навіть при достатній частоті обертання колінчастого валу. Причинами можуть бути, наприклад, несправність системи живлення паливом, повітряна пробка в ній або банальна відсутність палива в баку;

- нестабільна робота на холостому режимі може бути викликана як неправильним регулюванням обертів холостого ходу, так і забрудненням паливних фільтрів, зносом розподільного валу або циліндро-поршневої групи. Також можливий зсув фаз газорозподілу;

- вихлоп чорного кольору однозначно характеризує неповне згоряння палива з подальшим утворенням сажі. Причинами цього можуть бути як несправності форсунок, так і недостатнє надходження свіжого заряду повітря внаслідок опору у впускному тракті.

Не зайве перерахувати й інші ознаки:

- недостатня частота обертання стартера;
- утруднений пуск дизеля;
- зупинка дизеля відразу після пуску;
- нестабільна робота на номінальному режимі;
- надмірна витрата палива;
- стук в двигуні;
- вихлоп білого кольору;
- вихлоп блакитного кольору;
- надмірна витрата масла;
- перегрів дизеля;
- тривалий прогрів дизеля;
- вихід великої кількості газів через сапун;
- вихід пара з сапуна;
- недолік потужності;
- вібрація в двигуні;
- низький тиск масла;

- високий тиск масла;
- надлишковий тиск у впускному колекторі (зворотні пульсації) тощо.

Наведений список є лише частковим відображенням спектру можливих несправностей дизеля і їх ознак. Наприклад, в нього не включені несправності допоміжного електроустаткування і пов'язані з ним ознаки. Органолептичні методи представлені значним числом якісних ознак, в тому числі таких, які можуть бути диференційовані.

Облік подібної кількості органолептичних показників в роботі експертної системи, тим більше з урахуванням постійного розширення бази знань, може бути реалізований тільки за допомогою алгоритму, що не містить ніяких даних всередині себе, а спрямованого виключно на математичні та логічні обчислення.

Частина якісних ознак виявляються тільки при певних ситуаціях, імітація яких носить назву діагностичних тестів.

Діагностичні тести займають проміжне положення між першим і другим рівнем діагностування. Вони так само, як і діагностування за органолептичними показниками, реалізуються без застосування вимірювальних приладів, але відрізняються більш конкретизованою взаємодією з об'єктом. До прикладів тестових методів можна віднести наступні:

- прокачування палива ручним насосом підкачки палива при відкритому клапані випуску повітря. Даний тест застосовується для перевірки наявності повітря в паливній системі і в більшості випадків відразу усуває цю несправність;

- аналіз хроматограми масла докладно описаний в статті і дозволяє виявити як його забруднення твердими частинками або рідинами, так і втрату в'язкості, або, навпаки, її надмірне значення;

- контроль пульсацій в трубках від ПНВТ до форсунок навпомацки здатний вказати на несправність тієї чи іншої секції паливного насоса;

- почергове відключення форсунок шляхом від'єднання підвідних трубок застосовується при визначенні неробочого циліндра: при його відключенні частота обертання колінчастого валу залишається незмінною;

- тест швидкості відгуку на управління подачею палива здатне дати уявлення про стан зчленувань паливної рейки. При повільному переміщенні педалі або важеля керування подачею палива зчленування, що заклинили можуть залишатися в колишньому положенні;

- контроль часу вибігу ротора турбокомпресора після зупинки двигуна показує стан його підшипників, а подібний же метод для відцентрового масляного фільтра дає приблизну оцінку його забруднення.

Якщо ні аналіз органолептичних ознак, ні діагностичні тести не дали конкретних результатів, переходять до другого рівня діагностування, представленому індикаторними методами.

До індикаторних відносять методи оперативної діагностики, при реалізації яких використовуються, як правило, ті первинні перетворювачі (датчики, манометри та інші подібні пристрої), установка яких не вимагає розбірки двигуна для діагностування. Допустимої в даній концепції також є часткова розбірка, обмежена малим числом легкоз'ємних вузлів.

Пріоритет в індикаторному діагностуванні віддається більш простим в пристрої і використанні первинних перетворювачів, що дозволяє при тих же трудових і матеріальних витратах реалізувати більшу кількість індикаторних методів.

Індикаторні методи, головним чином, класифікують за характером фізичних процесів, що фіксуються первинними перетворювачами. Стосовно двигунів внутрішнього згоряння розглядають наступні групи індикаторних методів:

- теплові: наприклад, використання пірометра або тепловізора для виявлення аномальних температур вузлів двигуна і несправностей, що викликали аномалію;

- акустичні та віброакустичні: виявлення несправностей за показниками механічних коливань об'єкта діагностики;
- пневматичні: засновані на реєстрації параметрів стану повітря і газів в різних порожнинах дизеля;
- динамічні: як правило, пов'язані з вимірюванням частоти обертання колінчастого валу на перехідних режимах і подальшим аналізом динамічних показників для визначення дійсного значення ефективної потужності ДВЗ;
- гідравлічні: реєстрація фізичних процесів в масляній, паливній і водяній системах з метою визначення технічного стану окремих елементів зазначених систем.;
- електродинамічні: наприклад, запис діаграми струму стартера і її аналіз для виявлення додаткового опору в вузлах двигуна;
- комплексні методи індикаторної і поглибленої діагностики

Для повноти розуміння концепції індикаторних методів розглянемо кожну з цих груп докладніше.

Теплові методи. Двигун внутрішнього згоряння, як і будь-який технічний об'єкт, при роботі виділяє теплову енергію. Найбільшою мірою це пов'язано з тим, що теплота від робочого процесу і відпрацьованих газів в значній мірі накопичуються в елементах двигуна. Від деталей, які формують камеру згоряння, тепла енергія поширюється по всьому двигуну.

Важливим показником, що впливає на технічний стан дизеля, є температурний градієнт, що визначає різкість переходу між областями з різною температурою. Його високі значення здатні привести до значних механічних напруженням в елементах двигуна, наслідком яких можуть стати тріщини або деформація елементів ДВЗ.

Акустичні та віброакустичні методи. Крім виділення теплової енергії, робота двигунів внутрішнього згоряння супроводжується значним рівнем віброакустичної емісії. Використання вібраційних і акустичних показників, осцилограм, амплітудно частотних характеристик є одним з найбільш поширених методів діагностики внаслідок того, що зняття вібраційних

показників відмінне низькою трудомісткістю, а їх аналіз при правильній методології володіє високою інформативністю з виявлення несправностей механічних вузлів ДВЗ.

Наприклад, в статті розкривається підхід до визначення теплових зазорів газорозподільного механізму шляхом аналізу віброграм, отриманих від датчика, встановленого на кришці блоку клапанів. Отримані віброграми приводяться до виду гістограм, для кожної з яких визначається асиметрія і ексцес. Використання даних показників в якості осей координатної площини дає три поля точок, кожна з яких відповідає певній величині теплових зазорів.

Альтернативний спосіб аналізу вібраційних показників полягає у використанні частотно-часового кореляційного аналізу для отримання додаткової інформації про слабкі періодичні сигнали, що викликаються несправностями двигуна.

Також, крім вібраційних показників, мають значення і акустичні. Для них, аналогічно віброграм, знімаються так звані сонограми роботи ДВЗ в різних умовах. Методи аналізу сонограм представлені в ряді робіт.

Пневматичні методи. Оскільки робота дизельного двигуна заснована на термодинамічних явищах, його технічний стан багато в чому може бути визначено за параметром пневматичних процесів, що відбуваються в двигуні під час його роботи.

Одними з найбільш інформативних пневматичних показників є параметри стану картерних газів. При роботі двигуна внутрішнього згоряння в картер завжди надходить деяка кількість газів з камери згоряння. У новому двигуні це в основному паливо-повітряна суміш, яка просочується з циліндра на такті стиснення, але в міру зносу починають переважати відпрацьовані гази (що потрапляють на такті розширення).

На величину витрати газів картерів дизелів (особливо тракторних, що працюють в більш важких умовах, ніж автомобільні) впливають численні фактори, основними з яких є:

- конструкція двигуна (форма камери згоряння, тип охолодження, паливна апаратура та інші);
- навантаження двигуна (на яких режимах працює дизель);
- частота обертання колінчастого валу;
- особливість конструкції циліндро-поршневої групи;
- стан і конструкція поршневих кілець;
- тепловий стан двигуна;
- параметри навколишнього середовища та ін.

Динамічні методи. Класичним прикладом динамічного методу діагностування є аналіз кутового прискорення колінчастого валу при його вільному розгоні або повному вибігу. Згідно з принципом Д'Аламбера, в таких режимах відбувається повне навантаження дизеля його власним наведеними моментом інерції; таким чином, при вільному розгоні реалізується повна ефективна потужність дизеля.

Пристрій ПІД-Ц (індикатор потужності двигуна цифровий) дозволяє виміряти такі показники, як: частота обертання колінчастого валу двигуна; кутове прискорення колінчастого валу в процесі вільного розгону або повного вибігу; напруга в системі електрообладнання трактора. За даними показниками можуть бути визначені: ефективна потужність двигуна; потужність механічних втрат; крутний момент в режимі номінальної потужності; механічний ККД; індикаторна потужність; коефіцієнт нерівномірності роботи циліндрів.

Метод визначення потужності двигуна за допомогою приладу ПІД-Ц заснований на вимірі кутового прискорення колінчастого валу в режимі вільного розгону, здійснюваного шляхом різкого підвищення частоти обертання на холостому ході з мінімально стійкою до максимальної.

Недоліком методів індикаторного діагностування є необхідність установки додаткового обладнання на дизель: датчика зубців вінця маховика (що пов'язано з необхідністю свердління картера зчеплення на тракторі. В рамках цієї роботи становить інтерес зниження трудомісткості установки діагностичного обладнання для динамічних методів, а також зменшення його

вартості. Динамічні методи цінні тим, що можуть органічно доповнювати будь-які інші методи і засоби діагностики.

Гідравлічні методи. Поряд з параметрами стану тиску газових середовищ для ДВЗ є інформативним тиск в точках масляної, водяної і систем подачі палива - як його усереднене абсолютне значення, так і форми осцилограм пульсацій. Діагностування за допомогою гідравлічних методів є більш точним, ніж для пневматичних, оскільки рідини в першому приближенні можна вважати нестисливими.

Відомо, що однією з причин зниження тиску масла є збільшені зазори в підшипникових вузлах колінчастого валу двигуна.

Електродинамічні методи. Головним з електродинамічних методів є діагностування стану механіки двигуна за струмом, що споживає стартер на режимі пуску і прокрутки - так званий «метод відносної компресії». Його основою є пропорційна залежність між крутним моментом, необхідним для прокрутки валу ДВЗ, і струмом, що споживаються стартером. Зниження значень компресії в циліндрах двигуна призводить до зменшення опору стиску від повітряного заряду в камері згоряння, і, таким чином, знижує величину пульсацій струму стартера.

Комплексні системи діагностики. Крім поодинокі застосовуваних методів, існують також комплексні системи технічної діагностики, що поєднують в собі ряд індикаторних і поглиблених методів.

В даний час як в побуті, так і в ряді джерел популярне твердження про те, що бортові електронні системи мають потенціал діагностування ДВЗ. Дана гіпотеза не позбавлена сенсу, однак діагностика за допомогою бортових систем торкається найбільш енергонасичених вузлів двигуна, а саме його механічних елементів та обладнання.

Крім того, статистика, отримана від автосервісів, які співпрацюють з General Motors, вказує на переважання відмов електроніки над відмовами механічних систем. Зокрема, аналіз більш 10 000 гарантійних рекламацій за період з 2009 по 2021 роки за марками Opel, Chevrolet, Nissan і Hyundai

показав, що 70% відмов припадає на електронні системи управління агрегатами автомобіля, 20% на відмови механіки двигуна і трансмісії і 10% на відмови, викликані зовнішнім механічним впливом.

Використовувана на комбайнах John Deere бортова система, як впливає з інструкції, відображає близько 350 різних показників, однак тільки 11.4% з них дозволяють судити про стан механічної частини дизеля комбайну, інші ж відображають в основному несправності датчиків і інших елементів системи управління.

Висновки

Наявні на даний момент методи технічної діагностики (застосовується як для двигунів внутрішнього згоряння, так і для всієї технічної галузі) не мають чіткої організації і представлені в літературі досить хаотично. Проте, можна виділити кілька основних груп методів по сукупності їх трудомісткості і інформативності.

Очевидно, зростання трудомісткості діагностування тягне за собою отримання більшої кількості діагностичної інформації, однак для виявлення свідомо не відомої несправності необхідно комплексне застосування тих чи інших методів, що ставить питання про необхідність оптимізації алгоритмів її пошуку. Зокрема, локалізацію несправності найбільш правильно робити дедуктивним методом, з поступовим поглибленням пошуку.

Даний підхід вимагає переосмислення ієрархії методів технічної діагностики, з'єднання їх в зв'язну систему, що включає також і інформаційні засоби діагностування, такі, як експертні системи. Таким чином, для цієї роботи можна сформулювати наступні завдання:

- уявлення методів технічної діагностики в єдиній системі на прикладі органолептичних та індикаторних методів;
- формування підходу до побудови ймовірнісної моделі об'єкта, що діагностується;

- розробка експертної системи, що використовує отримані дані для зниження трудомісткості діагностування за органолептичними методами;
- систематизація відомих індикаторних методів; конструювання, випробування і включення в загальну систему засобів індикаторної діагностики ДВЗ, що відповідають сучасним вимогам, в тому числі і за цифровізацією;
- розробка методології тестування засобів технічної діагностики на предмет застосування в рамках роботи з експертною системою (а також експериментальна реалізація даної методології), в тому числі випробування методів діагностування автомобільних ДВЗ на прикладі тракторних і комбайнових;
- представлення технологічних аспектів роботи з відомими і розробленими (модернізованими) засобами технічної діагностики.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Основні теоретичні положення нинішньої системної діагностики були закладені ще в 1970-ті роки, в тому числі, в ході вже згаданого Богодухівського експерименту. Незважаючи на те, що в рамках використаної концепції системна діагностика не виділялася як окрема дисципліна, її розвиток тривав аж до початку 1990-х років, коли різко нові політичні та економічні умови привели до значного занепаду досліджень в даній області.

З появою ж сучасних цифрових методів діагностування, а також програмних засобів, що дозволяють реалізовувати експертні системи технічної діагностики, розглянута концепція поступово повертається до колишніх темпів розвитку.

Найголовніший принцип, покладений в основу системної діагностики, вимагає отримання максимальної кількості інформації за рахунок мінімальних трудовитрат.

З точки зору методології системна діагностика може бути розділена на об'єкт і суб'єкт: під першим мається на увазі безпосередньо об'єкт діагностики, під другим - комплекс методів і засобів, спрямованих на визначення його технічного стану.

Об'єкт і суб'єкт системної діагностики підлягають структуруванню за тими чи іншими ознаками. Перш ніж продовжити, необхідно відзначити ряд теоретичних положень, які стосуються діагностики. Одними з її важливих явищ є помилки першого і другого роду.

Помилкою першого роду стосовно до усіх видів діагностування і системі ТОР в цілому називають ймовірність відбракування фактично справного / працездатного елемента, коли структурний (характеризує його технічний стан) параметр насправді знаходиться в допустимих межах, а результати діагностування вказують на його перевищення в зв'язку з тими чи іншими причинами, включаючи похибку прямого або непрямого вимірювання.

Помилкою другого роду називають валідацію (прийняття твердження про справність / працездатність) фактично несправного / непрацездатного елемента, коли його структурний параметр знаходиться поза допустимих меж, але діагностичний параметр вказує на справність.

У загальному сенсі помилки першого і другого роду є ключовими поняттями завдань перевірки різних гіпотез. Дані поняття використовуються в багатьох областях при прийнятті бінарного (так / ні) рішення на основі деякого критерію (тесту, перевірки, вимірювання) або їх набору. Інформативність розглянутого критерію буде характеризувати ймовірність отримання правильного результату і, відповідно, зниження ризику появи помилок першого і другого роду. Дані закономірності повною мірою застосовні і до процесу діагностування.

У діагностичній практиці помилки першого і другого роду можуть бути описані наступним чином. Більшість діагностичних прийомів направлено на порівняння фактичних значень діагностичних показників з номінальними. Тому, звужуючи область допустимих значень параметра, діагност знижує кількість помилок другого роду. При цьому не слід забувати, що надмірне звуження області нормативних значень призведе до значного зростання числа помилок першого роду.

Одним з обставин, що збільшують кількість помилок першого і другого роду, є той факт, що представлені в технічній літературі дані про кореляцію несправностей і їх ознак (в тому числі які спостерігаються в процесі роботи об'єкта), стосовно до двигунів і механічного устаткування технічних засобів АПК і транспорту, є вельми розрізненими і несистемними. Також в переважній більшості випадків відомі класифікатори не мають прив'язки до поточного ресурсу об'єкта і умов його експлуатації.

Зниженню помилок першого і другого роду в значній мірі сприяє збільшення кількості розглянутих ознак (як органолептичних, так і діагностичних показників). Їх спільний розгляд з визначенням підсумкової ймовірності виникнення тієї чи іншої несправності дозволяє оцінити стан

об'єкта, що діагностується за співвідношенням ймовірних несправностей. Даний підхід розглянутий у розділі 2.4 цієї роботи.

Значною мірою підвищенню точності діагнозу також сприяє врахування особливостей експлуатації, таких, як якість паливо-мастильних матеріалів, природні умови (підвищена температура, запиленість повітря) в місці роботи об'єкта, високе напруження після останнього ремонту або навпаки, нещодавно проведений ремонт і т. п. Подібний підхід дає можливість прогнозування стану та поведінки об'єкта і при зростанні напруження, і при зміні діючих факторів, на відміну від чисто статистичної методології регламентної системи ТОР, в якій подібні показники не враховуються або враховуються лише локально (наприклад, в рекомендаціях більш частішої заміни повітряного фільтра при сильній запиленості повітря).

2.1 Трирівнева система пошуку несправностей в рамках системної діагностики

Першим кроком до подібної реорганізації є розгляд існуючих методів і засобів діагностики як зв'язкової трирівневої системи пошуку і локалізації несправностей. Рівні даної системи підрозділяються за глибиною пошуку і за трудомісткістю і особливостям застосування використовуваних в кожному випадку інструментів і методів.

Перший рівень представлений діагностуванням за органолептичними показниками роботи об'єкта (зовнішніми ознаками), тобто таким, які можливо зареєструвати без застосування будь-якого спеціального інструментарію. Як було зазначено вище (п. 1.3.1), відповідні методи діагностування реалізуються виключно за допомогою органів сприйняття людини і з цієї причини називаються органолептичними.

Точність органолептичного сприйняття встановлюється законом Вебера Фехнера:

$$p = k \ln \frac{S}{S_0}$$

де:

p - сила сприйняття;

S - інтенсивність подразника;

S_0 - нижнє граничне відчуття інтенсивності подразника;

k - константа, що залежить від суб'єкта відчуття і характеру подразника.

З виразу випливає, що сприйняття того чи іншого показника може значно відрізнятися в залежності від зовнішніх умов і від сприймаючої людини. З цієї причини точність органолептичних методів при їх одиночному застосуванні низька, що вимагає роботи з цілим комплексом органолептичних показників.

На етапі аналізу якісних ознак роботи об'єкта визначається характер і приблизна локалізація несправності на рівні основних його підсистем. Виявлення несправності за органолептичними показниками здійснюється або фахівцем-діагностом, або експертної системою, яка в самому простому випадку може бути представлена набором таблиць і правил, але в класичному розумінні є комп'ютерною програмою того чи іншого рівня складності.

Другий рівень діагностування являє собою використання індикаторних методів, в основі яких лежить формалізація якісних ознак на базі діагностичних параметрів.

Прилади, що застосовуються для індикаторних методів, як правило, не вимагають тривалої підготовки до діагностування. Датчики і інші чутливі елементи подібних приладів встановлюються на об'єкт без необхідності його розбірки (або з демонтажем легко знімних елементів).

Характерними ознаками індикаторних методів є швидкість оцінки і низька трудомісткість, але в багатьох випадках їм поряд з органолептичними показниками притаманна недостатня інформативність, що також може вимагати участі експертної системи для отримання результату з достатньою точністю. Принциповою відмінністю другого рівня від першого є його

правомочність щодо прийняття рішення про управління технічним станом об'єкта. Таким чином, другий рівень діагностування дозволяє уточнити локалізацію відмови, але не гарантує досить точного діагнозу.

Третій рівень діагностування являє собою найбільш глибокий, інструментальний пошук несправності, заснований на результатах проведення першого та другого етапів. Використання даних, отриманих від експертної системи і індикаторних методів, в ряді випадків дозволяє частково або повністю привести третій етап до так званих диференціальних методів діагностування, тобто спрямованих на виявлення конкретної несправності або вкрай малої їх кількості. Диференціальні методи, в свою чергу, дозволяють за рахунок використання групи діагностичних показників вирішити, по суті, завдання визначення кількох невідомих.

Фактично, завданням третього рівня діагностування є безпосереднє виявлення причини відмови або несправності.

Узагальнюючи сказане, можна резюмувати, що перший рівень глибини пошуку несправностей реалізується за допомогою аналізу якісних діагностичних ознак, а другий і третій - на основі умовно-послідовного алгоритму пошуку з переважанням кількісних показників.

2.2 Ієрархічне представлення технічного об'єкту

В рамках концепції системної діагностики основою структурування об'єкта є призначення його підсистем і елементів. За функціональними ознаками об'єкт представляється у вигляді ієрархічної структури, яка, відповідно до положень системного аналізу, включає в себе системи, підсистеми n -го рівня і первинні елементи, які є кінцевим елементом членування структури. З точки зору системного аналізу дизель представляє собою систему зі структурою сильної ієрархії, тобто суворим підпорядкуванням елементів нижчого рівня одному з компонентів вищого. Подібне підпорядкування може бути представлено у вигляді вертикальних

зв'язків. У свою чергу, слабкі, горизонтальні зв'язки також присутні в ієрархічній структурі дизеля, проте, для цілей системної діагностики подібні зв'язки не становлять значної цінності, тому для більшості задач можуть бути відхилені.

Глибина дискретизації структури (межа членування елементів) визначається по доцільності подальшого поділу тієї чи іншої складової частини. Як правило, до кінцевих елементів в даному контексті можна віднести ті вузли дизеля, які демонтуються з двигуна цілком, без часткової розборки. Прикладом можуть бути: форсунки, фільтри, нерозбірні вузли, електронні блоки і т. п.

Для кожного первинного елемента призначається набір структурних параметрів.

Структурним називають параметр, який безпосередньо характеризує фізичний стан елемента об'єкта.

Узагальнений структурний параметр - фізична величина, яка характеризує з допустимою похибкою працездатність декількох елементів об'єкта діагностики.

Діагностичний параметр - фізична величина, яка побічно характеризує конструктивний параметр, у т. ч. узагальнений.

Кожному структурному параметру відповідають:

- апріорна ймовірність несправності, тобто виходу структурного параметра за межі допустимих значень. Апріорна ймовірність може змінюватися в залежності від факторів експлуатації об'єкта: напруження, проведення ремонтів, атмосферних умов, якості паливо-мастильних матеріалів тощо;

- діагностичний параметр (або параметри), що характеризує структурний параметр з точки зору методів і засобів діагностики;

- якісні ознаки відмови.

Перераховані характеристики дозволяють оцінити структурні параметри, що визначають технічний стан об'єкта.

Структурні параметри, апріорні ймовірності, діагностичні параметри і якісні ознаки структуруються у вигляді матриці. Крім довідкових функцій, подібні таблиці можуть бути використані для створення баз даних експертних систем технічного діагностування.

Діагностичні параметри, що застосовуються і в експертній системі і в деяких самостійних методах, характеризуються чотирма показниками: чутливістю, однозначністю, стабільністю і інформативністю.

Чутливістю називають швидкість збільшення діагностичного параметра при зміні величини структурного (що безпосередньо характеризує технічний стан об'єкта). Прикладами можуть служити збільшення кількості газів, які прориваються з надпоршневого простору в картер двигуна і зниження тиску стиснення (компресії) в циліндрах внаслідок зносу деталей циліндро-поршневої групи, закоксування поршневих кілець і т. д. Для одного і того ж значення зносу витрата картерних газів збільшується в кілька раз у порівнянні з номінальним, а значення компресії зменшується на 10-20%.

Стабільність - характеристика варіації діагностичного параметра при багаторазових вимірах з одним і тим же значенням структурного. Менший розкид значень означає більшу величину стабільності. Її зменшення, в свою чергу, знижує вірогідність оцінки технічного стану з даного діагностичного параметру, а отже, і точність постановки діагнозу.

Однозначність характеризується відсутністю екстремумів від початкового до граничного значення залежно діагностичного параметра від структурного, тобто знакосталості похідної від цієї залежності.

Інформативність - достовірність діагнозу, одержуваного в результаті вимірювання значення діагностичного параметра. Достовірність оцінки технічного стану, в свою чергу, зворотно пропорційна кількості помилок першого і другого роду.

Розглянемо запропонований вище системний підхід стосовно об'єкту діагностики на прикладі дизеля Д-240 у вигляді блок-схеми членування (рис. 2.1), виділивши в ній гілку паливної апаратури високого тиску.

В продовження наведемо таблицю структурних параметрів на прикладі форсунки (табл. 2.1). апіорна ймовірність P_a і відмови є приблизною величиною, а її рівень встановлюється за допомогою експертної оцінки. Розглядаючи конкретний структурний параметр, експерт (на підставі свого досвіду) визначає апіорну ймовірність його порушення.

У зв'язку з тим, що для дизельного двигуна кількість структурних параметрів досить велике, має сенс встановити певний алгоритм для укрупнення логічних елементів об'єкта діагностики. На прикладі форсунки подібний алгоритм прийме наступний вигляд:

1. Призначення єдиного структурного параметра для укрупненого елемента.

2. Визначення апіорної ймовірності для укрупненого елемента. При більшій кількості структурних параметрів елемента було б правильним використовувати медіанне значення (моду), але оскільки дійсне число структурних параметрів елемента, як правило, невелика, то допустимо використовувати середнє арифметичне. Для форсунки отримуємо $\bar{P}_a = 0.2125$.

3. Діагностичні параметри укрупненого елемента успадковуються від його структурних параметрів, утворюючи єдиний список.

4. Якісні ознаки відмови для укрупненого елемента набувають властивість, звана умовною ймовірністю P_{ij} . Її значення для кожної якісної ознаки визначається як середня апіорна ймовірність для структурних параметрів, що мають цей показник відмови. Нерівномірність роботи циліндрів отримає умовну ймовірність, рівну 0.3. Для чорного або темно-сірого кольору вихлопу її значення складе 0.225.



Рисунок 2.1 – Ієрархічне представлення дизеля Д-240

Таблиця 2.1 – Структурні і діагностичні параметри форсунки

Структурний параметр	Апріорна ймовірність відмови	Діагностичний параметр	Якісні ознаки відмови
Проміжок в сполученні голка – корпус розпилювача	0.3	Швидкість падіння тиску	Падіння потужності, нерівномірність роботи циліндрів
Рухливість голки	0.1	Осцилограма вібрації на малих обертах	Пропуски подачі, стуки
Якість распилювання	0.25	Осцилограма $P_{фор}$, милозвучність вприскування	Чорний або темно-сірий колір вихлопу, падіння потужності, утруднений пуск в холодну пору
Тиск вприскування	0.2	Тиск підйому голки	Чорний або темно-сірий колір вихлопу

Також слід розглянути і зворотний процес, тобто диференціацію елементів на піделементи. У подібній ситуації необхідно, щоб апіорні ймовірності для піделементів відповідали їх середньому значенню, вказаному в укрупненому елементі - в даному випадку, заданому превентивно. Цю умову можна представити у вигляді наступного виразу:

$$P_{a_{n+1}} = m^{-1} \sum_{i=1}^m P_{a_{ni}}, \quad (2.2)$$

де m - кількість структурних параметрів укрупненого елемента. відповідного, для знаходження k -й апіорної ймовірності необхідно перетворити вираз 2.2 в наступний вигляд:

$$P_{a_{nk}} = m \cdot P_{a_{n+1}} - \underbrace{\sum_{i=1}^{k-1} P_{a_{ni}}}_{\text{...}} - \sum_{i=k+1}^m P_{a_{ni}}$$

З представленого виразу очевидно, що аж до останнього залишеного структурного параметра апіорні ймовірності можуть варіюватися в широкому діапазоні. Однак в такому випадку можливі ситуації, коли залишена апіорна ймовірність приймала б неприпустимі значення ($0 \leq [P_a] \leq 1$). У зв'язку з цим правильніше було б здійснювати розрахунок апіорних ймовірностей за допомогою математичного моделювання в реальному часі, що дозволить організувати безліч апіорних ймовірностей з максимальним наближенням їх значень до необхідних.

Значення умовних ймовірностей для якісних ознак при диференціації елементів визначаються за виразом, зворотному формулі 2.1. В ситуаціях, коли умовна ймовірність для якісної ознаки "кінцевого" елемента приймає значення, відмінне від одиниці, її величину пропонується називати первинною умовною ймовірністю (ПУВ).

Отримана база даних, що включає в себе структурні і діагностичні параметри, апіорні ймовірності і якісні ознаки відмови, покликана служити цілям діагностування за допомогою, в першу чергу, експертної системи, а також індикаторних і поглиблених методів.

2.3 Аспекти роботи діагностичних експертних систем

Проаналізувавши інформацію, отриману в ході огляду джерел, можна систематизувати наявні дані і виділити наступні аспекти використання експертних систем для діагностування:

1. Основою типової експертної системи є класифікатор (база даних), в якій зіставляються несправності і діагностичні ознаки. Класифікатор складається:

- а) експертами-діагностами, виходячи з власного досвіду, а також даних і нормативів технічних вимог і технічних умов на ремонт для різних об'єктів;
- б) за результатами спостереження за об'єктом.

Класифікатор є базовим елементом, покликаним з максимальною повнотою і точністю відобразити реальні взаємозв'язки несправностей і їх ознак.

2. Експертна система дозволяє накопичувати, систематизувати і зберігати знання і професійний досвід тих експертів, які виконують конкретні завдання найкращим чином. В першу чергу це стосується тих областей, де завдання і їх рішення формалізовані слабо або зовсім не формалізовані, не структуровані. До подібних областей може бути віднесена і технічна діагностика, оскільки одним з базисів методології, наявної в цій галузі знань, є аналіз даних людиною. Штучний інтелект, в свою чергу, дозволяє наблизити обчислювальні алгоритми комп'ютерів (і інших ЕОМ) до прийомів роздуму людини.

3. Експертна система покликана надавати допомогу тим фахівцям, котрим їх власних знань, досвіду і інтуїції не вистачає для самостійності вирішення виникаючих проблем. З огляду на все прискорене зростання спектра і числа технічних засобів не тільки в АПК, але і в інших галузях економіки, логічно припустити, що проблема нестачі знань і досвіду буде прогресувати і надалі.

4. Експертна система сприяє уникненню помилок в процесі діагностування за рахунок зниження частки людського фактору; в тому числі пов'язаних зі згаданим вище недостатнім досвідом.

5. Експертна система здатна до самонавчання, що є немаловажливим кроком до усунення від людського фактору при діагностуванні. Самостійний аналіз перетворюваних даних вкрай корисний для розвитку систем штучного інтелекту і дозволяє в автоматичному режимі доповнювати існуючі і формувати нові бази знань в досліджуваній області. Отримана інформація в подальшому може бути використана як для підвищення точності діагностування, так і для статистичного, економічного аналізу процесів, що відбуваються, відбуваються при експлуатації техніки.

6. Бази знань експертної системи, отримані за допомогою експертів і спостереження за експлуатованою технікою, дають широкі можливості з навчання персоналу ремонтно-обслуговуючих підприємств.

Як впливає з огляду літератури, в більшості своїй експертні системи за функціями поділяються на два види:

1. Діалогові ЕС для діагностування за якісними показниками, фіксується людиною (механіком, водієм);

2. Експертні системи виявлення несправностей шляхом аналізу (за допомогою різних методів розпізнавання образів) кількісних показників, осцилограм, амплітудно-частотних характеристик.

Як впливає з розділу 1.3, такий поділ притаманний не тільки експертним системам, але і всім діагностичним методам.

Оскільки спільне застосування різних методів і засобів здатне дати більш точний результат в порівнянні з одиночним, найкращою результативністю буде володіти експертна система, яка гармонійно зв'язує діагностування за якісними і кількісними показниками.

У тих випадках, коли якісних показників недостатньо для виявлення конкретної несправності з необхідною точністю, потрібно застосовувати додаткові прийоми, тести і методи. Отримані показники оцінюються в

більшості випадків в дискретному форматі (допустимі / неприпустимі значення), рідше - в безперервному. Як правило, до подібних методів (застосовується для дизелів) відносять: спостереження за пульсаціями тиску в різних порожнинах дизеля, синхронізованими щодо роботи циліндрів; вивчення перепадів температур робочих поверхонь і рідин, динамічних показників; аналіз вібрацій, шумів і звуків в різних діапазонах частот тощо.

Вкрай швидкий розвиток комп'ютерів в ті роки призвело до того, що розроблена експертна система "Дизель-діагност" вже до кінця 90-х років стала морально застарілою, хоча б з причини вкрай примітивного візуального інтерфейсу, що не тільки знижує її привабливість для підприємств технічного сервісу, але і позбавляє можливості використання значної кількості функцій.

Крім того, процес діагностування із застосуванням даної системи вимагав безпосередньої участі оператора не тільки в технологічних операціях діагностування, але і в роботі самого програмного забезпечення, тобто реалізації алгоритму обчислення.

Ще одним негативним моментом системи "Дизель-діагност" є труднощі реалізації додаткових баз даних для розширення спектра об'єктів, що діагностуються. Дана характеристика також притаманна багатьом іншим експертним системам, в тому числі розглянутих вище в джерелах. Деякі з перерахованих експертних систем не прив'язані до бази даних, тобто логічний апарат системи описаний безпосередньо її програмним кодом. Даний підхід унеможлиблює самостійне навчання експертної системи, оскільки при ньому неможливо внесення або зміну даних про несправності без безпосереднього втручання в програмний код. Таким чином, область застосування подібних закритих ЕС знижується до одного об'єкта або їх обмеженої кількості. Крім того, навіть при незначному внесенні змін в конструкцію об'єкта (в першу чергу, заводом-виробником) значний ризик суттєвих труднощів при переналаштуванні діагностичної експертної системи.

Даного недоліку багато в чому позбавлені експертні системи на базі нейронних мереж. Нейромережеві технології побудовані на основі

самонавчальних алгоритмів і є оптимальним засобом розпізнавання образів, що дозволяє застосовувати їх для аналізу великих вибірок даних одного типу, наприклад, осцилограм процесів, що відбуваються в двигуні. Слід врахувати, що використання неймереж для аналізу різнорідних по-показників, таких, як органолептичні ознаки роботи ДВЗ, пов'язане зі значними труднощами. Неймережеві технології використовують досить складний математичний апарат і є ще більш вузькоспеціалізованими, ніж перераховані вище ЕС для діагностування за органолептичними показниками. З цієї причини не може їх застосування для вирішення завдань класичної інженерії, які потребують більш простих рішень, хоча б і за рахунок деякого зниження точності постановки діагнозу.

2.4 Розробка експертної системи розпізнавання несправностей

Одним з основних напрямків роботи над науковою роботою була розробка (відповідно до сформульованих в п. 1.2.1 вимог) програмного комплексу, що представляє собою експертну систему розпізнавання несправностей за їх ознаками (симптомами) для технічних засобів АПК.

Перед подальшою роботою з формування алгоритму буде доцільно попередньо розглянути структуру баз даних умовних ймовірностей. Оскільки умовна ймовірність володіє двома «координатами» (несправність і ознака), то їх база даних являтиме собою двовимірний масив (таблицю, матрицю) умовних ймовірностей, стовпці якого відповідають признакам, а рядки - несправностям. Фрагмент подібного масиву для трактора МТЗ-82 (дизель Д-240) наведено в таблиці 2.2.

Подібні бази даних доцільно прив'язувати до моделі двигуна. Крім того, в разі, якщо база складена за параметрами укрупнених елементів, також буде раціональним формування баз для їх складових - наприклад, конкретної моделі блочного паливного насоса високого тиску.

Для баз даних схожих об'єктів може бути застосований принцип подібності. У першому наближенні одержувані експертним методом матриці умовних ймовірностей (п. 3.1.1) можуть бути використані для більшості двигунів близьких типорозмірів. У тому числі це можна віднести і до різноманітних моделей зарубіжної техніки, де, незважаючи на деякі відмінності в принципах конструювання, основні елементи побудовані за загальноприйнятими схемами. Для двигунів з електронним уприскуванням (Common Rail) загальні бази даних також застосовні, за вирахуванням тих несправностей, що відносяться до системи подачі палива високого тиску.

Таблиця 2.2 – Фрагмент матриці умовних ймовірностей

Несправності	Ознаки				
	Надмірна витрата мастила	Перегрівання дизеля	Надмірний тиск в картері	Нерівномірна робота двигуна	Недолік потужності
Додатковий опір в системі вентиляції картера	0.05	0	0.15	0	0
Додатковий опір в системі подачі палива	0	0	0	0.07	0.07
Додатковий опір в системі зливу зайвого палива в бак	0	0	0	0.005	0
Додатковий опір в системі впуску	0.05	0.01	0	0.07	0.06
Надмірний рівень мастила в двигуні	0.045	0.0225	0	0	0
Забруднення повітряного фільтру	0.035	0.0175	0	0.0525	0.07

Для спрощення роботи з системою пропонується використовувати ступінчасту градацію коефіцієнта сили:

0	0.3	0.6	0.9
Точно ні	Швидше ні	Швидше так	Точно так

Основним алгоритмом, що формує обчислювальне ядро експертної системи, є метод перетворення двовимірного масиву умовних ймовірностей P_{ij} і одновимірного масиву коефіцієнтів S_j сили в доміантний ряд апостеріорних ймовірностей P_j .

Таким чином, даний алгоритм, включає в себе елементи нечіткої логіки.

Облік зовнішніх факторів може бути з легкістю реалізований шляхом розгляду їх в ролі якісних ознак і подальшого обліку при роботі основного алгоритму. Для цього до матриці первинних умовних ймовірностей додаються фрагменти, аналогічні наведеним в таблиці 2.3. Таким же чином можуть бути введені коди несправностей, одержувані від бортових комп'ютерів: фактично ці коди характеризують не саму несправність, а лише її ознаки, в тому числі органолептичні.

Правильність результатів з точки зору теорії ймовірності може бути забезпечена лише суворим дотриманням законів математичної логіки.

Першим же очевидним припущенням є просте множення умовних ймовірностей, отриманих з бази даних для кожної несправності при обраних ознаках.

$$P_i = \prod_j P_{ij} , \quad (2.4)$$

Цей вираз, на перший погляд, відповідає поставленим вимогам, проте при найближчому розгляді можна помітити, що при будь-яких значеннях умовних ймовірностей, відмінних від одиниці, їх «нашарування» буде призводити до зниження апостеріорної ймовірності, а не до зростання, як того вимагає процес виявлення несправностей.

Таблиця 2.3 – Фрагмент матриці коефіцієнтів для зовнішніх умов

Зовнішні умови	Несправності				
	Низька температура	Запиленість повітря	Нещодавній ремонт	Значний поточний ресурс	Значне напруження
Недостатній заряд акумуляторної батареї	0.9	0	0.6	0.4	0.35
Надмірна в'язкість мастила	0.9	0	0.2	0	0
Забрудненість повітряного фільтру	0	0.9	0	0	0.8
Надмірний знос ЦПГ	0	0.2	0	0.8	0.9
Парафінізація палива	0.9	0	0	0	0
Наявність води в паливі	0	0	0.2	0	0

Логічно було б припустити, що алгоритм може бути реалізований шляхом складання умовних ймовірностей (2.5), оскільки ознаки тут мають властивості спільно з подіями, що відбуваються.

$$P_i = \sum_j P_{ij}, \quad (2.5)$$

Втім, при аналізі цього виразу стає зрозуміло, що апостеріорна ймовірність у багатьох випадках може виявитися більше одиниці, що суперечить положенням теорії ймовірності.

Зростання апостеріорної ймовірності може бути забезпечено при її розрахунку через протилежні події, в теорії ймовірності мають вигляд:

$$p = 1 - q$$

де p і q - протилежні, взаємовиключні події. У даному контексті цими подіями є P_{ij} «ознака S_j викликана несправністю D_i » і Q_{ij} «ознака S_j не викликана несправністю D_i ».

Поєднавши вирази 2.4 і 2.4.4, отримуємо:

$$P_i = 1 - \prod_j (1 - P_{ij})$$

Ввівши коефіцієнт сили, отримуємо остаточний вираз для розглядуваного алгоритму, який в подальшому пропонується іменувати інверсним:

$$P_i = 1 - \prod_j (1 - S_j \cdot P_{ij}), \quad (2.6)$$

Необхідно відзначити, що даний підхід цілком прийнятний для описаних вище випадків одночасної діагностики декількох несправностей, оскільки сума умовних ймовірностей для окремо взятої несправності може приймати будь-яке позитивне значення (R^+), Не обов'язково рівне одиниці. Вірно і зворотне, тобто одна ознака здатна одночасно характеризувати кілька несправностей:

$$\sum_{i=const} P_{ij} = R^+$$

$$\sum_{j=const} P_{ij} = R^+$$

З метою подальшої розробки необхідно відзначити, що процес діагностування повинен бути спрямований на виявлення несправностей із заданою точністю постановки діагнозу. Показник цієї точності називають довірчою ймовірністю $P_{ДОВ}$.

Очевидно, що значення довірчої ймовірності має бути максимально наближене до одиниці - з метою мінімізації ризиків невірного діагнозу. У теорії ймовірностей існує поняття «майже достовірної» події, але значення довірчої ймовірності для нього варіюється для кожного окремого випадку. У медичній статистиці довірна ймовірність, як правило, встановлюється на рівні 0.95.

З урахуванням того, що в технічній діагностиці, на відміну від медичної, припустимо більший поріг ризику, будемо спочатку думати, що достатнє значення довірчої ймовірності тут може бути встановлено на рівні 0.8.

Це значення не слід розглядати як остаточне або дефінітивне. Залежно від умов діагностування, а також вимог щодо зниження ризику, воно може бути змінено в ту чи іншу сторону.

Якщо на першому етапі діагностування жодна з апостеріорної вірогідності не досягнула величини довірчої, слід перейти до уточнення інших можливих ознак шляхом переходу до діалогового режиму роботи з експертною системою.

Для реалізації діалогового режиму діагностування необхідний алгоритм порівняння умовних ймовірностей для тих несправностей, які володіють найбільшими апостеріорними можливостями (далі пропонується іменувати такі несправності переважаючими), що дозволяє:

- виявити найбільшу розбіжність умовних ймовірностей по кожному з не вибраних раніше ознак;
- відкинути нульові умовні ймовірності i , відповідно, ознаки, що не володіють інформативністю в поточних умовах.

Для цього пропонується використовувати наступний алгоритм:

1. Несправності, апостеріорна ймовірність яких перевищує деякий поріг (наприклад, 0.5 від максимальної P_i), Віднести до числа, що превалюють. З метою попередження програмних помилок має сенс примусово обмежити максимальну кількість несправностей, що превалюють, наприклад, числом 15.

2. Всі умовні ймовірності для кожної з переважаючих несправностей вносяться в проміжну таблицю, при цьому відкидаються вже вибрані користувачем ознаки.

3. По кожному з решти ознак обчислюється середнє значення умовних ймовірностей і максимальне відносне відхилення від нього. Само по собі відхилення в чистому вигляді має вираз:

$$\Delta_{max}^{від} = \frac{P_{max} \cdot N}{\sum^N P_{ij}} - 1, \quad (2.7)$$

Де N - кількість розглянутих несправностей, що превалюють,

P_{max} максимальна умовна ймовірність для поточної ознаки.

Проаналізувавши цей вислів, можна відзначити, що при наявності єдиної P_{ij} для якої-небудь ознаки (ознак), $\Delta_{max}^{від}$ буде однаковим для кожної ознаки, що має одну P_{ij} незалежно від значення самої умовної ймовірності.

Для обліку цього значення має сенс домножити вираз 2.7 на P_{max} :

$$\Delta_{max}^{від} = P_{max} \left(\frac{P_{max} \cdot N}{\sum_{j=1}^N P_{ij}} - 1 \right), \quad (2.8)$$

Ознаки з максимальними відносними відхиленнями є найбільш інформативними в поточних умовах, а отже, першочерговими для перевірки в діалоговому режимі. Пропонується задіяти механізм, аналогічний відсіюванню несправностей, що превалюють, тобто використовувати граничне значення $0.5\Delta_{max}^{від}$.

Скориставшись даними таблиці 2.2, реалізуємо цей алгоритм, прийнявши, наприклад, в якості превалюючих несправностей: додатковий опір в системі вентиляції картера, додатковий опір в системі подачі палива, забруднення повітряного фільтра. Результати розрахунку наведені в таблиці 2.4. За даними таблиці видно, що в заданих умовах найбільшою інформативністю володіє ознака «підвищений тиск в картері». Ця ознака і повинна бути запропонована користувачеві.

Необхідно відзначити, що при більшій кількості ознак і несправностей, які превалюють, кількість превалюючих ознак буде вище, тому не слід робити висновки про малу інформативність застосовуваного алгоритму виключно за даними прикладу табл. 2.4.

До умов виходу з циклу діалогового режиму можна віднести:

- досягнення хоча б однієї апостеріорної ймовірності значення довірчої: $P_{i\ max} \geq P_{дов}$. Цей критерій є необхідною і достатньою умовою успішного виявлення несправності. Наступні ж умови застосовуються при $P_{i\ max} < P_{дов}$:

- досягнення максимальної заданої глибини діалогового режиму, тобто порога кількості циклів, прийнятного для користувача;

- вичерпання несправностей, що превалюють, або превалюючих ознак;

- примусове переривання на вимогу користувача.

-

Таблиця 2.4 – Умовні ймовірності несправностей, що превалюють і визначення інформативних ознак

Ознаки	Надмірна витрата мастила	Перегрівання дизеля	Надмірний тиск в картері	Нерівномірна робота двигуна	Недолік потужності
Несправності					
Додатковий опір в системі вентиляції картера	0.05	0	0.15	0	0
Додатковий опір в системі подачі палива	0	0	0	0.07	0.07
Забруднення повітряного фільтру	0.035	0.0175	0	0.0525	0.07
Середнє значення P_{ij}	0.02833	0.005833	0.05	0.040832	0.04667
$\Delta_{max}^{від} \cdot 10^3$	38.24	35	300	50	34.99

У всіх випадках, крім першого, наступним кроком діагностування є перехід до тестових впливів і індикаторних методів.

Незважаючи на те, що діалоговий режим роботи експертної системи дозволяє послідовно підвищувати точність діагнозу, його застосування не дає гарантії виявлення несправності, оскільки органолептичні показники за визначенням не здатні дати повної інформації про стан двигуна. Якщо в ході діагностування необхідна точність постановки діагнозу так і не була досягнута, тобто $P_{i \max} < P_{дов}$, переходять до тестових впливів і індикаторних методів діагностування. Пропонується використовувати певний алгоритм для визначення оптимального індикаторного методу діагностування для поточних умов.

Основою алгоритму є база даних інформативності діагностичних методів, фрагмент якої наведено в таблиці 2.5. Вона призначена для переходу до другого рівня діагностики і має таку ж двомірну структуру, як і основні бази даних.

Визначальною величиною в подібній базі даних є інформативність. Її значення I_{ij} відображає ймовірність успішного виявлення несправності D_i діагностичним методом або тестом M_j .

Першою сходинкою другого етапу діагностування є реалізація тестових впливів, які займають проміжне положення між органолептичними та індикаторними методами діагностування.

Визначення тестів, інформативних в поточних умовах, може бути реалізовано за тим же алгоритмом, що і пошук ознак, що превалюють, але з наступними відмінностями:

- знижений поріг несправностей, що превалюють: однією з умов завершення діалогового режиму є їх кількість, рівна 0 або 1.

Отже, для продовження діагностування в подібних умовах необхідно розширити список превалюючих несправностей;

- інформативність тестів для кожної несправності використовується в номінальному значенні, без множення на апіорну ймовірність, оскільки до моменту переходу на індикаторне діагностування експертною системою вже відсіюються несправності, малоімовірні при заданих ознаках.

Попередньо розглянемо методи розпізнавання діагностичних даних з аналогових приладів. Як правило, для подібного роду показників існують межі допустимих значень, зазначені у вигляді проміжків виду $[X]_{\min} < X < [X]_{\max}$ або $X < [X]_{\max}$ або $X > [X]_{\min}$.

Таблиця 2.5 – Фрагмент матриці інформативності

Несправності \ Метод	Тест пульсацій на вихлопі	Контроль тиску в паливній системі низького тиску	Тест пульсацій по впускному колектору	Контроль пульсацій картерних газів
Додатковий опір в випускній системі	0.5	0	0	0.3
Додатковий опір в системі вентиляції картера	0	0	0	0.9
Додатковий опір в системі подачі палива	0	0.8	0	0
Додатковий опір в системі зливу зайвого палива в бак	0	0	0	0
Додатковий опір в системі впуску	0	0	0.5	0

Також в деяких випадках - наприклад, при вакуумній діагностиці ДВЗ - застосовують двокоординатну систему допустимих значень показників, показану на діаграмі рис. 2.2. Крім того, дана діаграма добре ілюструє той факт, що діагностичні показники можуть не тільки вказувати на справність / несправність об'єкта, а й відповідати конкретній несправності або ступеня зносу об'єкта.

У застосуванні для імовірнісного алгоритму роботи експертної системи показниками значень діагностичних ознак можуть ставитися у відповідність величини ймовірності відповідності даного показника тієї чи іншої несправності. Форма кривих даних залежностей може бути різною, головним чином щоб збігалось з кривими розподілів в теорії ймовірності (нормальне, рівномірне, експоненціальне і т.д.). Незважаючи на удавану відповідність законам розподілів, функції залежності $P_i(X_{Vi})$ (Де P_i - ймовірність прояву

несправності P_i при значенні V_i діагностичного показника D_i) не володіють властивістю $\int P_i dX_{Vi} = 1$.

Розглядаючи даний показник, уявімо наведені в табл. 2.6 дані у вигляді графічної залежності ймовірності (фактично – можливого ступеня) зносу ЦПГ від величини витрати газів картерів q , л / хв (рис. 2.3).

Прийmemo, що значення допустимого зносу відповідає значенню ймовірності $P = 0.5$. Отримані графіки показують, що чутливість може бути відмінною для різних дизелів, але в цілому форма залежностей схожа.

Таблиця 2.6 – Значення параметрів стану ЦПГ тракторних дизелів (витрата картерних газів, л / хв)

Дизель	ЯМЗ-240Б	ЯМЗ-238НБ	СМД-62	Д-240	А-41	СМД-14
Номінальне значення	90	72	65	31	25	28
Допустиме значення	180	125	110	70	77	63
Максимальне значення	260	180	160	100	110	80

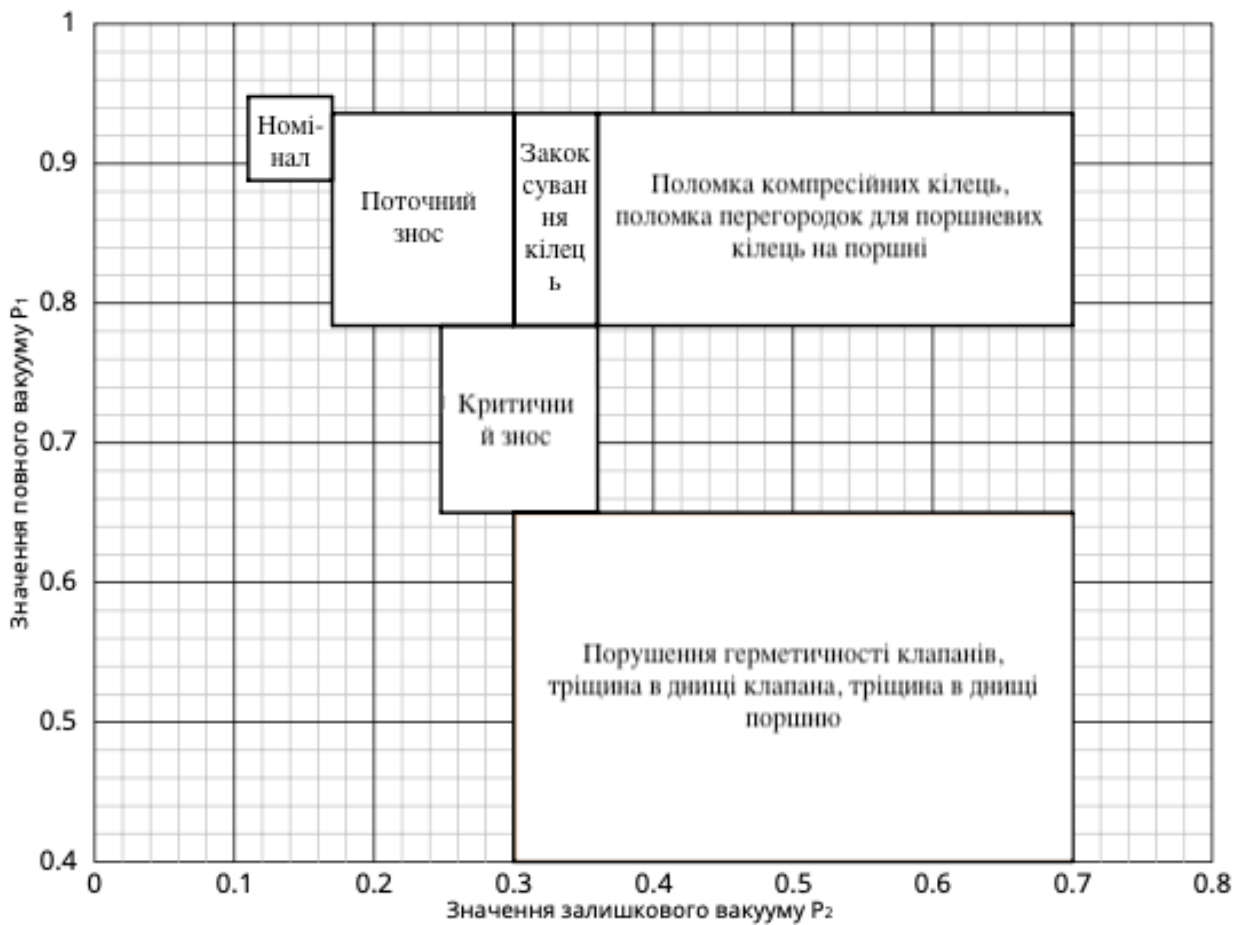


Рисунок 2.2 – Поля значень показників при вакуумній діагностиці дизельного двигуна, атм

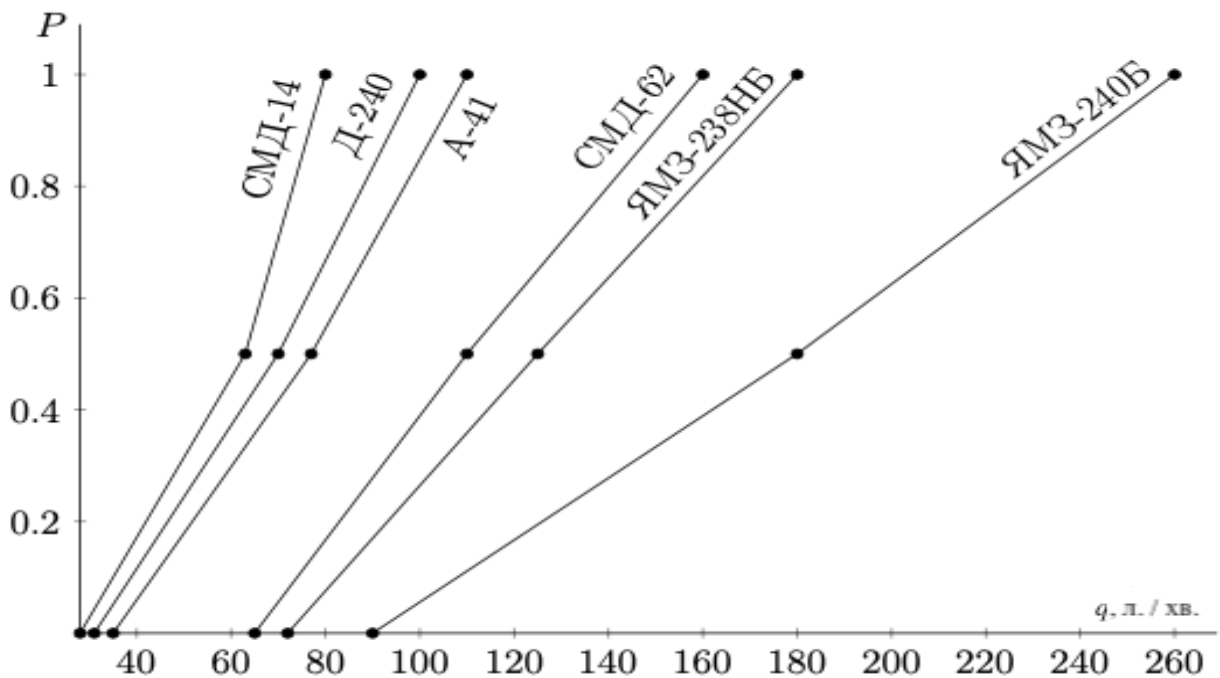


Рисунок 2.3 – Залежність можливого ступеню зносу ЦПГ від величини витрати картерних газів

Висновки

Апроксимація подібних залежностей для автоматичного розпізнавання діагностичних показників експертною системою є одним із завдань, що потребують вирішення для повноцінної роботи ЕС при її подальшому розвитку.

Таким чином, завдання обліку даних діагностики при роботі експертної системи може бути вирішена введенням бази описаних вище залежностей для кожного з діагностованих об'єктів.

Дані з бортових комп'ютерів сучасних тракторів і комбайнів також можуть бути використані для потреб діагностики, але, як було зазначено раніше, діагностичний потенціал бортових комп'ютерів на поточний момент дуже низький. Крім того, нерідкі несправності самих бортових комп'ютерів, що (разом з недоліками дилерської системи) деколи приводить до простою техніки під час найбільш інтенсивних робіт.

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Формування баз даних експертної системи

Розглянемо принцип первинного (чорнового) формування баз даних, що базується виключно на логічних висновках з теорії ДВЗ і практики експлуатації.

Основою формування баз даних є матриці первинних умовних ймовірностей (ПУЙ) p_{ij} . Ймовірність прояву заданої ознаки S_j при заданій несправності D_i . Вони утворюються за допомогою експертного або емпіричного методів, які описані далі. Подібні ймовірності використовуються з тієї причини, що логічний висновок можливих ознак для окремо взятої несправності простіше, ніж визначення можливих несправностей для конкретної ознаки. При емпіричному (в ході експлуатації) формуванні баз даних ЕС описаний підхід є єдино можливим.

Фрагмент матриці первинних умовних ймовірностей наведено в таблиці 4.1. Крім p_{ij} , в нього включені апіорні ймовірності прояви тієї чи іншої несправності, зафіксовані, наприклад, у численних звітах ГОСНИТИ. У свою чергу, умовні ймовірності P_{ij} утворюються за допомогою перемноження p_{ij} при заданих S_j і D_i і апіорної ймовірності P_a заданої D_i .

Формування матриць ПУЙ експертним методом засновано на послідовному аналізі кожної з несправностей, які відповідають конкретному типу об'єкта, з подальшим зіставленням йому ряду ознак.

Шаблон матриці ПУЙ представлений в табл. 3.1.

Формування подібних матриць здійснюється за наступним алгоритмом:

1. Поставити список несправностей для конкретного об'єкта; список ознак використовується загальний.

2. Для кожної несправності розглянути кожну з ознак і вказати передбачувану ймовірність її спостереження при обраній несправності.

Таблиця 3.1 – Формат матриці первинних умовних ймовірностей

	p_a	S_1	...	S_j	...	S_m
D_1	p_{1a}	p_{11}	...	p_{1j}	...	p_{1m}
D_2	p_{2a}	p_{21}	...	p_{2j}	...	p_{2m}
...
D_i	p_{ia}	p_{i1}	...	p_{ij}	...	p_{im}
...
D_n	p_{na}	p_{n1}	...	p_{nj}	...	p_{nm}

3. Априорні ймовірності визначити по літературі або скористатися даними, отриманими від фахівців, що мають досвід експлуатації об'єкта (інженери, трактористи, механіки, водії, і т. д.).

4. Після завершення заповнення матриці відкинути несправності і ознаки, які не отримали хоча б однієї ПУЙ.

Оскільки експертна система по визначенню має елементи штучного інтелекту, їй має бути притаманна властивість навчатись, що здатне значно підвищити точність постановки діагнозу.

У даній ситуації емпіричний алгоритм побудови таблиць умовних ймовірностей досить очевидний. При виявленні несправності з числа тих, що входять в базу даних ЕС, необхідно розглянути список існуючих в цій базі ознак, і відзначити ті, які спостерігаються на поточний момент. Якщо несправності або ознаки в матриці не існує, слід доповнити ними базу даних.

Подібні дані зберігаються у вигляді матриці, аналогічної по «осях» таблиці 2.2, але з тими відмінностями, що облік ведеться в натуральних числах та кожен розглянутий випадок також додає одиницю до загальної кількості спостережень тієї або іншої несправності. Скориставшись даними таблиці 2.2, створимо штучно подібну базу даних у вигляді таблиці 3.2, прийнявши (для кратності рахунку) загальну кількість спостережень за кожною несправністю рівну 20.

Таблиця 3.2 – Фрагмент бази даних спостережень при емпіричному методі

Ознака \ Несправність	Загальна кількість випадків	Надмірна витрата мастила	Перегрівання дизеля	Надмірний тиск в картері	Нерівномірна робота двигуна	Недолік потужності
Додатковий опір в системі вентиляції картера	20	5	0	15	0	0
Додатковий опір в системі подачі палива	20	0	0	0	7	7
Додатковий опір в системі зливу зайвого палива в бак	20	0	0	0	1	0
Додатковий опір в системі впуску	20	5	1	0	7	6
Надмірний рівень мастила в двигуні	20	6	3	0	0	0
Забруднення повітряного фільтру	20	2	1	0	3	4

Позначимо кількість випадків спостереження ознаки S_j при несправності D_i як C_{ij} [Case: Англ. випадок], А загальна кількість спостережень заданої несправності - $\sum C_i$. Тоді умовні ймовірності для заданих умов будуть рівні:

$$P_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum C_i}, \quad (3.1)$$

Звертаючись за цією формулою до даних таблиці 3.2, можна перетворити її до виду таблиці 2.2 і підтвердити математичну правильність розробленого алгоритму.

Правильною корективою буде використання коефіцієнта сили S_i при обліку ознак в емпіричному методі. При такому алгоритмі до значення C_{ij} при

реєстрації ознаки додають не одиниці, а $1 \cdot S_i$. Кількість несправностей при цьому як і раніше визначається натуральним числом.

Слід підкреслити, що в експертній системі повинен бути інтерфейс для введення даних експлуатації (в рамках емпіричного методу), який також може працювати як опитувальник і при експертному методі формування баз даних.

При вичерпанні точності постановки діагнозу за допомогою органолептичних ознак переходять до аналізу інформації отриманих від індикаторних методів діагностування.

3.2 Методика вибору алгоритму розпізнавання індикаторних показників експертною системою

Як зазначено в розділі 2.4. використання індикаторних показників в експертній системі неможливо без попереднього внесення в неї даних про значення індикаторних показників, що відповідають тим чи іншим несправностям.

Для отримання однакових залежностей методики їх визначення також повинні підкорятися загальним правилам. В рамках початкових етапів розвитку ЕС пропонується використовувати наступний узагальнений алгоритм:

1. Вибір вихідних даних за кількома (доцільно не менше п'яти) об'єктами шляхом аналізу літератури; результатом є таблиці, номограми, функціональні залежності. При цьому для номограм обирають близько 10 точок, в яких значення абсциси і ординати зчитуються найбільш чітко;

2. Приведення отриманих даних до виду залежності $P = f(x)$ ймовірності P наявності несправності від значення діагностичного показника x , при цьому $0 \leq P \leq 1$.

3. Вибір загального для всіх об'єктів апроксимуючого рівняння в двох варіантах: а) найвища точність, б) можливе спрощення:

- а. Введення даних кожного об'єкта в програмний комплекс апроксимації двовимірних полів точок.

б. Отримання деякого списку (близько 10 елементів) найбільш точних апроксимуючих функцій, при цьому є сенс обмежити кількість числових коефіцієнтів функції до 2-3.

с. Зведення отриманих функцій в загальну таблицю і аналіз її на співпадаючі елементи.

д. Аналіз декількох (достатня кількість - 5-7) найбільш часто помітних функцій на точність з того чи іншого критерію.

е. Вибір двох функцій: найбільш точної і найбільш простої.

4. Отримання коефіцієнтів апроксимуючих рівнянь для певних функцій по кожному з об'єктів.

5. Завдання обмежень області значень функції. Фактично даний крок може бути реалізований засобами самої експертної системи і тому може бути виключений з алгоритму, але з метою отримання математично правильної залежності $P_M(x)$ Слід задатися наступними обмеженнями:

$$P(x) < 0 \rightarrow P_M(x) = 0$$

$$0 \leq P \leq 1 \rightarrow P_M(x) = P(x)$$

$$P(x) > 1 \rightarrow P_M(x) = 1$$

3.3 Визначення інформативності індикаторних показників

Методика визначення інформативності конкретного індикаторного метода стосовно конкретної несправності базується на загальному алгоритмі:

1. Вибір еталонного діагностичного показника для заданої несправності, що дає точний діагноз по ній.

2. Підбір об'єкта діагностики, що має задану несправність, або способу її повноцінної імітації. В окремих випадках має сенс розглянути і ситуації, зворотні заданій несправності - наприклад, заходи підвищення еталонного діагностичного показника у випадках, коли несправність веде до його зниження. Згідно з положеннями теорії інженерного експерименту, даний метод відноситься до елементів повного факторного експерименту.

3. Вимірювання еталонного діагностичного показника в необхідних умовах.

4. Проведення діагностування досліджуваним індикаторним методом.

5. Порівняльний аналіз результатів діагностування.

Осцилограма пульсації тиску картерних газів показана на рис. 3.1 (нижній графік). Верхній графік - пульсації тиску в паливній трубці, що застосовуються для синхронізації.

Дана осцилограма складається з а) осцилограм тиску в кожному з циліндрів, тобто відповідним індикаторним діаграмам (рис. 3.2); б) коливань тиску, пов'язаних з рухом поршнів. Однак, проаналізувавши рух поршнів, можна переконатися, що сумарний їх вплив буде залишатися постійним при будь-якому положенні колінчастого валу.

Відставання піків пульсації картерних газів від піку індикаторної діаграми обумовлено інерційністю процесів, що відбуваються в ДВЗ і більшими паразитними обсягами.

Як стверджується, величина пульсації тиску картерних газів по циліндрах обернено пропорційна значенням компресії в відповідних циліндрах; відповідно, рівномірність пульсації дозволяє судити про рівномірний знос циліндро-поршневих груп. На рис. 3.3 представлений теоретичний графік залежності значення тиску картерних газів від кута повороту колінчастого валу. На графіку 1 - справний стан двигуна, на графіку 2 спостерігається нерівномірність пульсації тиску, що говорить про необхідність інструментальної діагностики ДВЗ.

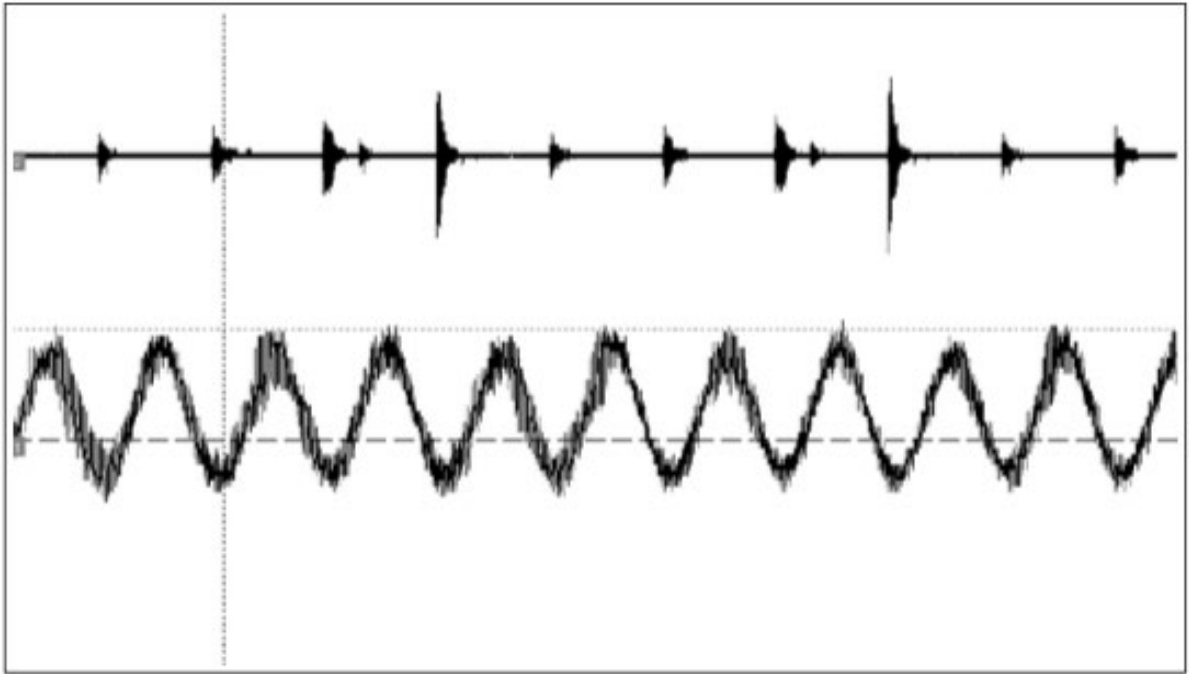


Рисунок 3.1 – Осцилограма пульсації тиску картерних газів в двигуні Д-240

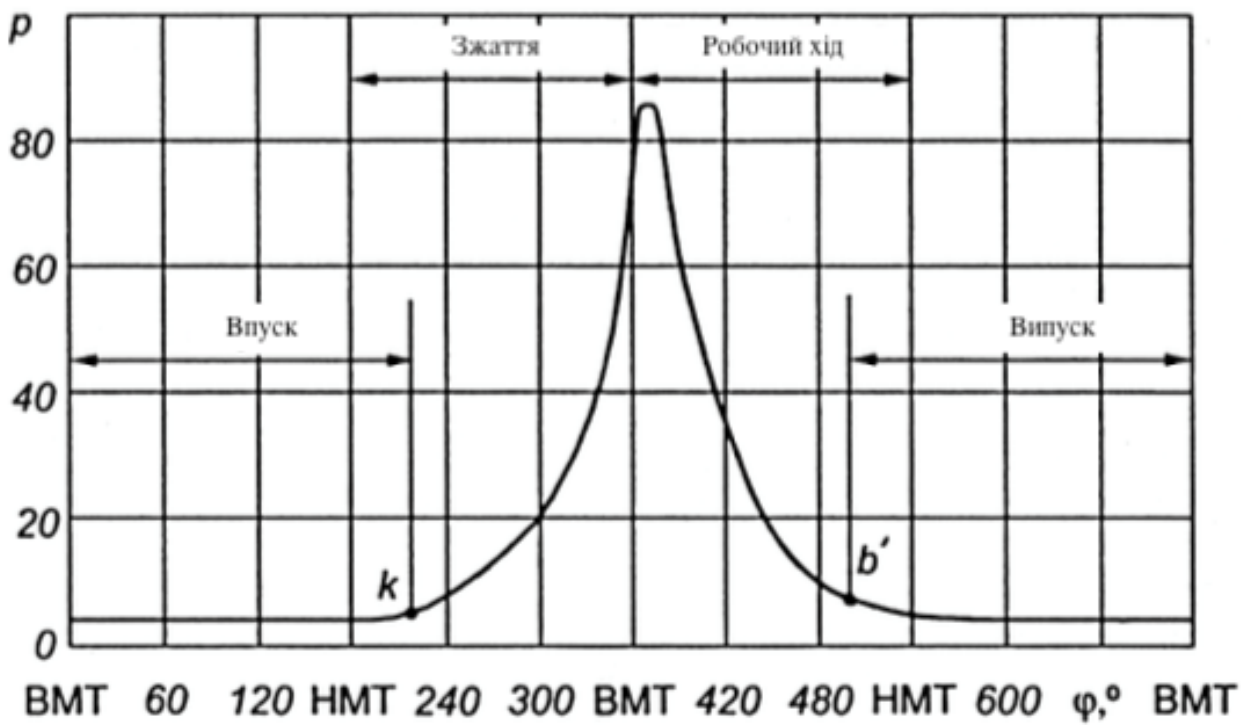


Рисунок 3.2 – Індикаторна діаграма чотирьохтактного ДВЗ

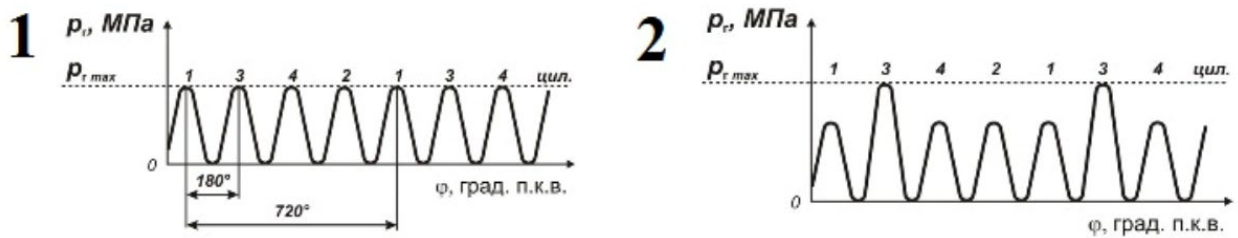


Рисунок 3.3. – Теоретичний графік залежності значення тиску картерних газів від кута повороту колінчастого валу

Найменші трудовитрати при вимірюванні величини компресії реалізуються на бензинових двигунах, оскільки демонтаж свічок запалювання менш трудомісткий, ніж зняття форсунок дизеля. З цієї причини експеримент слід провести на бензинових ДВЗ, наприклад : Renault k7j700, Mercedes-Benz M110, ЗМЗ-402-406, і Mazda FE. Для вимірювання значень компресії використовується компресометр (рис. 3.4, а), а для осцилографування тиску картерних газів використовується комплекс MotoDoc зі штатними датчиками (рис. 3.4, б), з можливістю підключення до комп'ютера.

Методика проведення експерименту включає в себе:

1. Попередній експеримент зі зняття осцилограми тиску картерних газів двигуна без перехідного пристрою за допомогою установки датчика в трубку масляного щупа двигуна.

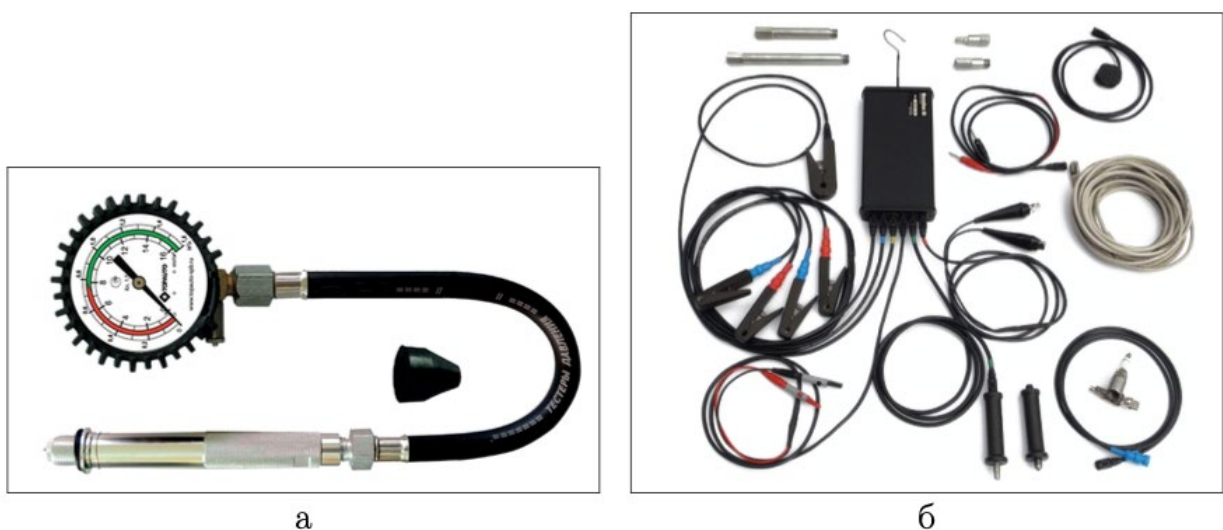


Рисунок 3.4 – Комплект приладів для проведення експерименту з картерними газами бензинових двигунів

2. Визначення величин компресії в циліндрах двигунів:

- a. Пуск двигуна, прогрів до робочої температури, зупинка.
- b. Зняття високовольтних проводів, свічок запалювання всіх циліндрів, відключення розподільника запалювання.
- c. Установка компресометра в отвір свічки першого циліндра.
- d. Прокрутка колінчастого валу стартером на пускових оборотах до отримання стабільного свідчення компресометра.
- e. Реєстрація свідчення компресометра.
- f. Демонтаж компресометра з свічкового отвору.
- g. Повтор пп. c.-f. для кожного циліндра.
- h. Установка свічок запалювання, високовольтних проводів, включення розподільника запалювання.

3. Пуск двигуна, прогрів до робочої температури.

4. Установка перехідного пристрою в маслозаливну горловину, а датчика низького тиску - в ПУ.

5. Установка струмових кліщів синхронізації на високовольтні дроти.

6. Налаштування комплексу MotoDoc.

7. Зняття осцилограми пульсацій тиску картерних газів на оборотах холостого ходу з фазовою прив'язкою до імпульсів в системі запалювання, збереження її на жорсткий диск.

8. Зупинка двигуна, демонтаж перехідного пристрою і датчиків.

9. Аналіз отриманих результатів:

- Відкриття збереженої осцилограми в графічному редакторі, нумерування циліндрів відповідно до фазової прив'язки.

- Порівняльний аналіз амплітуд піків осцилограми тиску картерних газів з показниками компресії по циліндрах.

Доведено, що важливу роль у формуванні пульсацій грають динамічне перетікання картерного газу і періодична зміна обсягу картера, викликана різницею швидкостей поршнів при русі до ВМТ і від неї.

Слід також врахувати, що значення компресії не завжди здатне повністю характеризувати стан циліндро-поршневої групи, тому для більш правильного діагностування рекомендується використовувати компресійно-вакуумний метод, описаний, наприклад, в навчальному посібнику.

Для експерименту необхідно обрати тракторний дизельний двигун, наприклад Д-240.

Для зняття компресійно-вакуумних показників використовується діагностичний комплект АГЦ (рис. 3.5). Вакуумметри комплекту відносяться до класу точності 2.5.

Для осцилографування тиску картерних газів використовується комплекс MotoDoc (рис. 3.4, б) зі штатними датчиками, а також датчиком пульсації паливної трубки, з можливістю під'єднання до ком'ютера.

Методика проведення експерименту включає в себе:

1. Визначення компресійно-вакуумних показників в циліндрах двигуна:
 - a. Пуск двигуна, прогрів до робочої температури, зупинка.
 - b. Відключення паливопроводів високого тиску, зняття форсунок.
 - c. Установка приладів компресійно-вакуумного діагностування в форсункові отвори.
 - d. Прокрутка колінчастого валу стартером на пускових оборотах до отримання стабільних показань приладів
 - e. Реєстрація показань приладів.
 - f. Повторна установка приладів комплекту в інші циліндри.
 - g. Повтор пп. d.-f. для кожного циліндра.
 - h. Демонтаж приладів комплекту з двигуна.
 - i. Установка форсунок, підключення паливопроводів.



Рисунок 3.5 – Прилади комплексу АГЦ: вакуумметри Р1 і Р2

- Пуск двигуна, прогрів до робочої температури.
 - Установка перехідного пристрою в маслозаливну горловину, датчика низького тиску - в ПУ.
 - Установка датчика синхронізації на паливну трубку.
 - Налаштування комплексу MotoDoc.
 - Зняття осцилограми пульсацій тиску картерних газів на оборотах холостого ходу з фазовою прив'язкою до імпульсів в паливній трубці, збереження на жорсткий диск. Варто знімати осцилограму в трьох варіантах:
 - зі знятою форсункою одного з циліндрів (з метою зниження тиску стиснення і, таким чином, прориву газів в картер);
 - з нещільно встановленою форсункою;
 - з форсункою, що встановлена і працює штатно.
3. Зупинка двигуна, демонтаж перехідного пристрою і датчиків.
4. Аналіз отриманих результатів:
- Відкриття збереженої осцилограми в графічному редакторі, нумерування циліндрів відповідно до фазової прив'язки.
 - Порівняльний аналіз амплітуд піків осцилограми тиску картерних газів з компресійно-вакуумними показниками по циліндрам.

Як уже згадувалося в оглядовому розділі, показники і осцилограми тиску експлуатаційних рідин дизеля мають діагностичну інформативність.

Зокрема, розглядаючи процеси, що відбуваються в паливній системі низького тиску (СПНТ: система подачі палива низького тиску), можна виділити наступні структурні параметри і відповідні їм діагностичні показники:

- стан всмоктувальної паливної магістралі / тиск на вході фільтра грубої очистки (ФГО);
- стан ФГО / тиск на вході паливнопідкачувального насосу (ППН);
- продуктивність ППН / тиск на вході фільтра тонкого очищення палива (ФТО);
- стан ФТО / тиск на вході паливного насоса високого тиску (ПНВТ);
- циклова подача форсунок / вид осцилограми тиску палива.

Для проведення експерименту слід використати тракторний дизель (Д-240) і наступні пристрої (див. Рис. 3.6, 3.7):

- Д1, Д2: регульовані дроселі;
- МВ: мано-вакуумметри;
- М: манометр;
- ТхК: триходовий кран для перемикання показань манометра;
- РТ: датчик тиску НК3022, підключений до АЦП, Похибка вимірювання датчика становить 5%. Клас точності мано-вакуумметра 1.5, манометра - 1.0. Для вимірювання потужності дизеля слід застосувати прилад ПД-Ц (рис. 3.6).

Робота аналого-цифрового перетворювача схожа з приладом ПД-Ц, значення напруги, одержувані від датчика, відправляються в віртуальний СОМ-порт комп'ютера, після чого інтерпретуються програмною оболонкою.

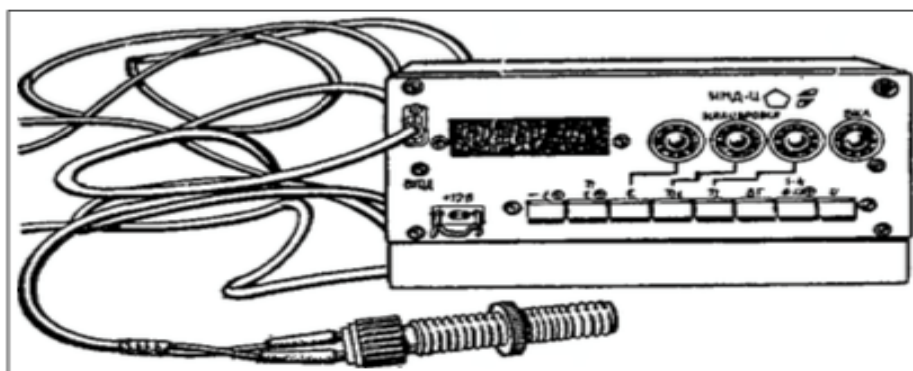


Рисунок 3.6 – Прилад ПД-Ц

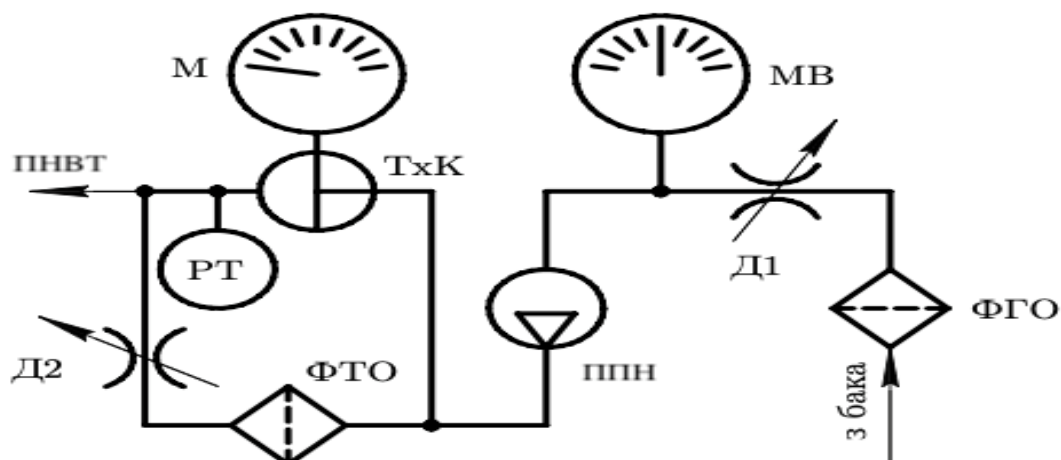


Рисунок 3.7 – Схема СПНТ експериментальної установки

Висновки

Доведено, що важливу роль у формуванні пульсацій грають динамічне перетікання картерного газу і періодична зміна обсягу картера, викликана різницею швидкостей поршнів при русі до ВМТ і від неї.

Слід також врахувати, що значення компресії не завжди здатне повністю характеризувати стан циліндро-поршневої групи, тому для більш правильного діагностування рекомендується використовувати компресійно-вакуумний метод, описаний, наприклад, в навчальному посібнику.

Для зняття компресійно-вакуумних показників використовується діагностичний комплект АГЦВакуумметри комплекту відносяться до класу точності 2.5.

Для осцилографування тиску картерних газів використовується комплекс MotoDос зі штатними датчиками, а також датчиком пульсації паливної трубки, з можливістю під'єднання до ком'ютера.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Підключення компресометра і датчиків Motodos III до двигунів показано на рис. 4.1, 4.2. Для проведення досліджень були виготовлені два перехідних пристрої (ПП). ПП виконані на токарному верстаті з дерева, оскільки практика експлуатації ПП з твердих полімерних матеріалів показала нещільність їх прилягання до отвору масляної горловини.

Проведений експеримент включив в себе наступні стадії:

1. Визначення впливу трубки масляного шупа на форму осцилограми тиску картерних газів двигуна MB M110, отриманої з установленної на виході трубки датчика;
2. Визначення дійсних величин компресії в циліндрах двигунів ЗМЗ-406, Renault k7j, Mazda FE;
3. Зняття осцилограм пульсацій картерних газів двигунів ЗМЗ-406, Renault k7j, Mazda FE через перехідний пристрій в маслозаливній горловині;
4. Аналіз отриманих результатів;



Рис. 4.1. Підключення Motodos III до двигунів



Рисунок 4.1 - Підключення компресометра до двигунів

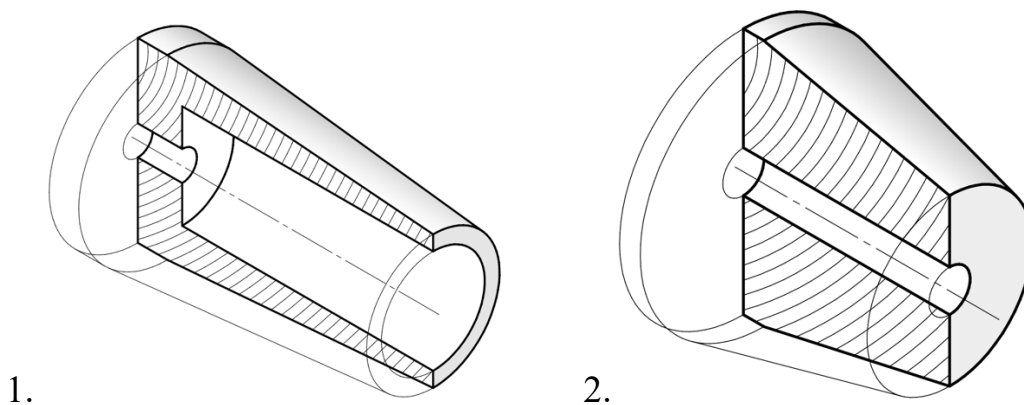


Рисунок 4.2 - Перехідний пристрій великий – 1, малий - 2

Результатом попереднього експерименту по зняттю осцилограми тиску картерних газів через трубку масляного щупа двигуна МВ М110 стала осцилограма. На ній не спостерігається повторюваності даних, а значення амплітуд пульсацій носять характер, близький до випадкового. Таким чином, попередній експеримент показав, що даний метод установки датчика неспроможний, отже, необхідно використовувати інші варіанти його підключення - в тому числі, за допомогою перехідних пристроїв.

З цієї причини подальше зняття осцилограм в цьому дослідженні проводиться виключно через отвір маслозаливної горловини двигунів, оскільки воно є доступним і дозволяє знизити кількість необхідних перехідних пристроїв до декількох кінцевих насадок.

Отримані показники компресії по циліндрах відображені в таблиці 4.1. Аналіз отриманих осцилограм вказує на відсутність кореляцій між величиною компресії (в рамках її нормативних значень) в циліндрах і піковими значеннями пульсацій тиску картерних газів.

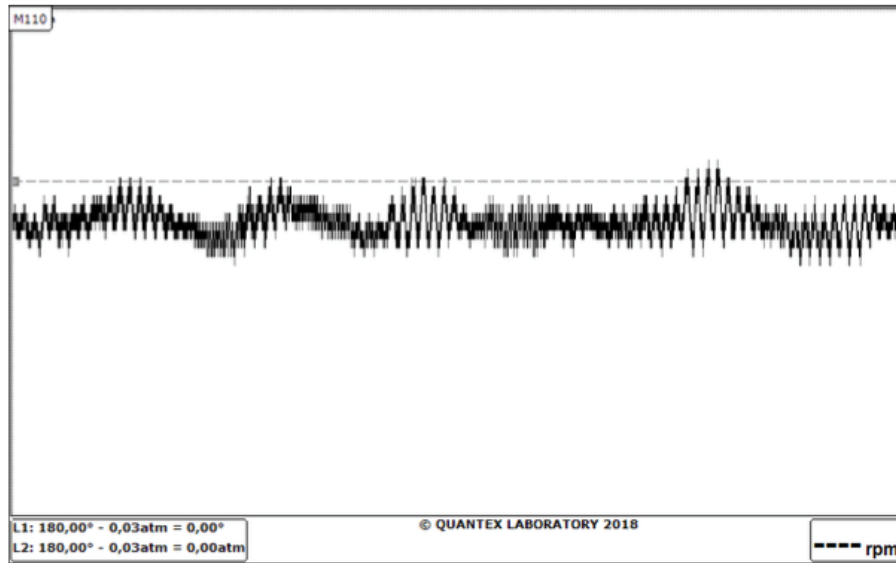


Рисунок 4.3 - Осцилограма тиску картерних газів, знята через трубку масляного щупа двигуна M110

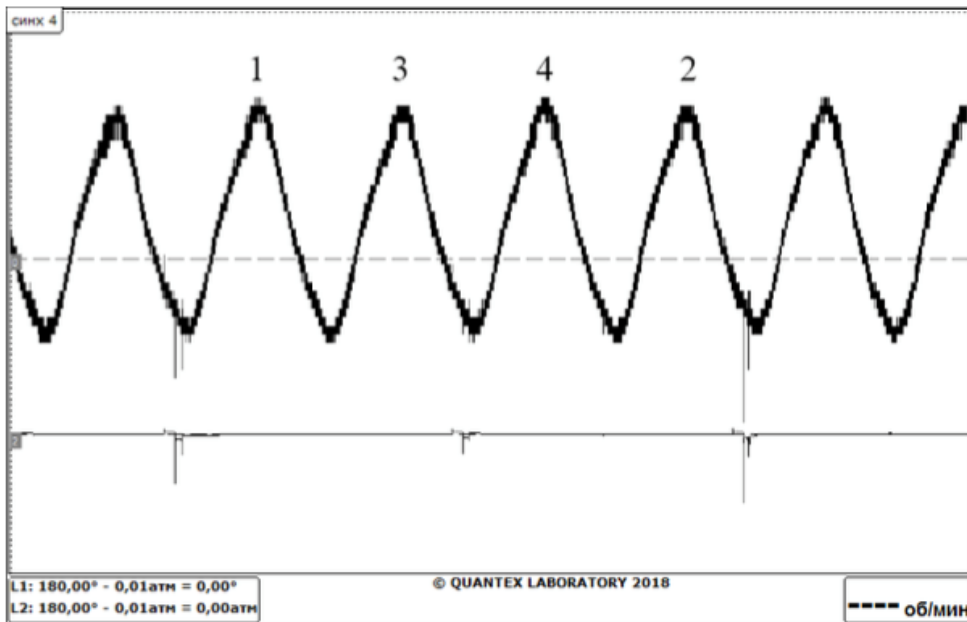


Рисунок 4.4 - Осцилограма для двигуна ЗМЗ

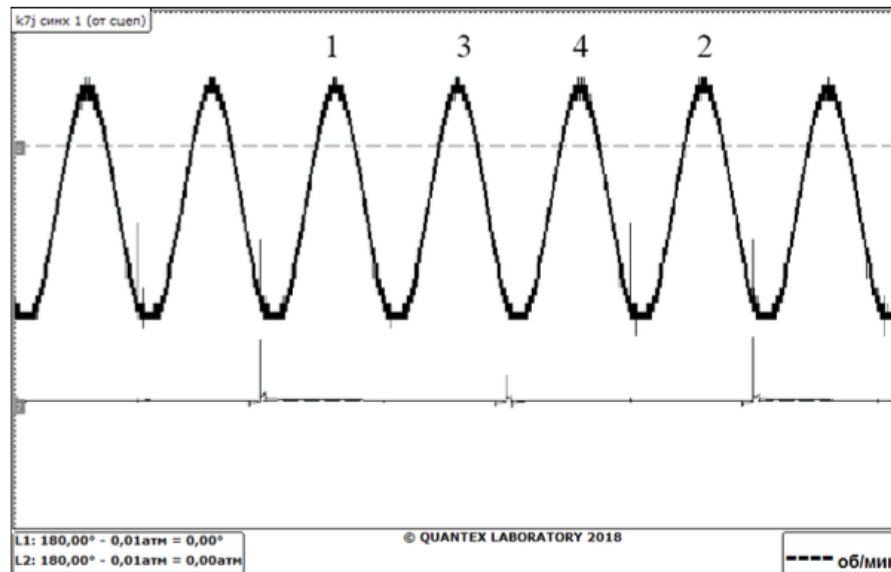


Рисунок 4.5 - Осцилограма для двигуна Renault

Таблиця 4.1 - Значення компресії в циліндрах двигунів, кгс / см²

Циліндри	1	2	3	4
ЗМЗ-406	10	9.5	7.3	10.8
Renault k7j700	9	8	9.2	8.4
Mazda FE	11.2	11.4	11	11.2

До причин неінформативності подібної діагностики бензинових ДВЗ можна віднести наступні:

1. Низьке значення ступеня стиснення, а, отже, і витоків газів з надпоршневого простору в картер, в порівнянні з дизелями;
2. Маслозаливна горловина автомобільних ДВЗ розташована в клапанній кришці, на відміну від багатьох тракторних дизелів;
3. Робочий об'єм досліджених двигунів значно менше, ніж у тракторних дизелів, в зв'язку з чим зменшується кількість газів, що прориваються в картер.

Отже, застосування аналізу осцилограм пульсацій картерних газів для виявлення ступеня зносу циліндро-поршневої групи має вкрай низьку або навіть нульову інформативність. Відповідно, в розрахунках значення I_{ij}

інформативності даного методу для визначення зносу ЦПГ слід приймати рівним нулю.

Не варто виключати можливість подальшого розвитку даного методу, але на цьому етапі, з застосовуваними на поточний момент приладами (MotoDoc III з комплектом штатних датчиків), застосування даного методу для технічної діагностики ДВЗ малого типорозміру недоцільно.

Для підключення датчика тиску, як і раніше, використані перехідні пристрої, показані на рис. 4.2.



Рисунок 4.6 - Підключення приладів комплексу АГЦ

Проведений експеримент включив в себе наступні стадії:

1. Комплексне визначення стану циліндро-поршневої групи дизеля за допомогою діагностичного комплексу АГЦ;
2. Зняття осцилограм пульсацій картерних газів дизеля через перехідний пристрій в отворі вимірювального щупа рівня масла;
3. Аналіз отриманої інформації.

Отримані дані компресійно-вакуумного діагностування наведені в табл. 4.5.

Результати діагностування, згідно діаграмі рис. 2.2, знаходяться для всіх циліндрів в межах допусків поточного зносу. При цьому в 1 і 2 циліндрах знижено

значення повного вакууму, що свідчить про дещо більшому зносі ЦПГ даних циліндрів.

Осцилограми тиску картерних газів, отримані в ході експерименту показані на рис. 4.8-4.9.

Для порівняльного аналізу накладемо один на одного осцилограми, отримані при найбільш відмінних умовах, а саме при номінальному режимі роботи і при демонтованій форсунці.

Таблиця 4.2 - Результати компресійно-вакуумного діагностування

Циліндр	Показники АГЦ, кгс/см ²		
	P ₁	P ₂	P _к
1	0.85	0.2	23
2	0.85	0.26	23
3	0.86	0.22	20
4	0.86	0.2	23

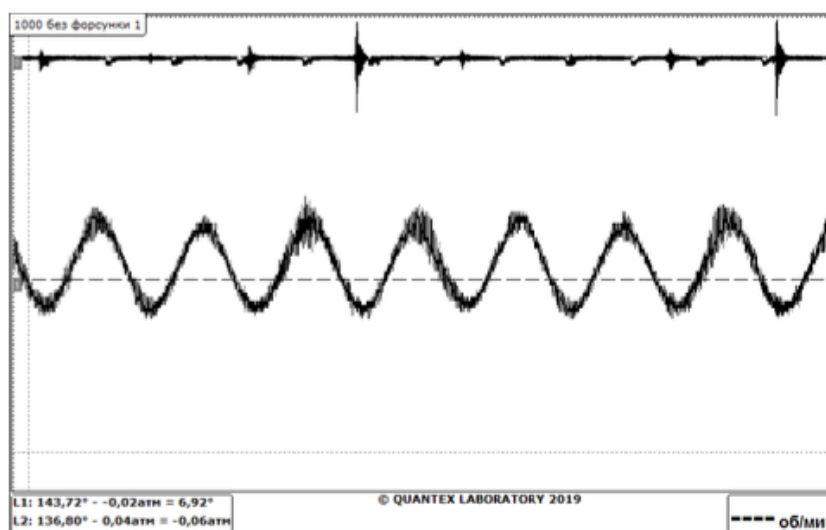


Рисунок 4.7 - Осцилограма тиску картерних газів при 1100 хв⁻¹ і демонтованою форсункою 1 циліндра

Порівняльний аналіз осцилограм показує деяке зниження значень тиску в картері при номінальному режимі щодо роботи з однієї демонтованою форсункою. Даний факт може бути пояснений тим, що для досягнення однієї і тієї ж частоти обертання колінчастого валу при чотирьох працюючих циліндрах потрібна менша циліндрична потужність, а відповідно, і менший індикаторний тиск, що призводить

до незначного зниження загального тиску картерних газів. У свою чергу, цей тиск може варіюватися для одного і того ж дизеля, в залежності від стану системи вентиляції картера, в тому числі рециркуляційної.

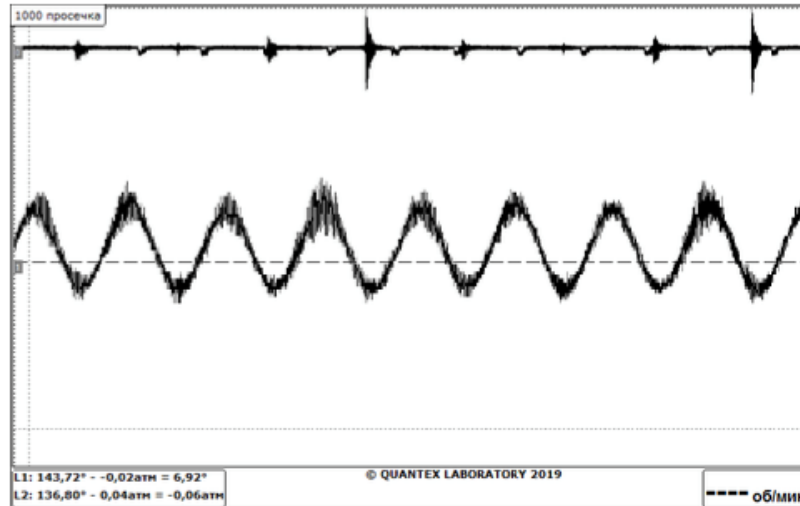


Рисунок 4.8 - Осцилограма тиску картерних газів при 1000 хв^{-1} і нещільно встановленою форсункою 1 циліндра

Висновки

Проведена в ході наукового дослідження експериментальна робота дозволила:

1. Випробувати експертний метод формування баз даних експертної системи на прикладі розробленої ЕС Exsys, а конкретно - матриць умовних ймовірностей;
2. Розробити і протестувати метод отримання залежностей умовної ймовірності обраної несправності від значення діагностичного показника.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Нижче приведені основні вимоги з техніки безпеки та охорони праці при роботі з діагностичним обладнанням для дизельних двигунів:

1. Загальні вимоги безпеки

Перед початком роботи провести інструктаж з техніки безпеки. Використовувати лише справне обладнання, яке має відповідні сертифікати та пройшло перевірку. Забороняється працювати без попереднього ознайомлення з інструкцією до обладнання. Забезпечити хорошу вентиляцію робочого приміщення для уникнення скупчення токсичних газів.

2. Організація робочого місця

Робоче місце має бути чистим, без сторонніх предметів, які можуть заважати виконанню робіт. Використовувати спеціальні інструменти та пристрої для фіксації двигуна та його деталей. Розташувати обладнання так, щоб забезпечити вільний доступ до нього та уникнути травмонебезпечних ситуацій.

3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Обов'язкове використання захисних окулярів для уникнення потрапляння дрібних частинок у очі. Використовувати рукавички, захисний одяг та взуття з антиковзною підошвою. У разі роботи з високим рівнем шуму необхідно використовувати засоби захисту слуху.

4. Запобігання електричним небезпекам

Усі електричні з'єднання повинні бути надійно ізольовані. Забороняється торкатися до обладнання мокрими руками. Перед початком робіт перевірити наявність заземлення діагностичного обладнання.

5. Робота з токсичними речовинами

Під час тестування двигунів забезпечити відведення відпрацьованих газів за межі приміщення. Забороняється вдихати випари пального чи мастила. У разі розливу пального або мастила негайно прибрати забруднення та провітрити приміщення.

6. У разі аварійної ситуації

Негайно припинити роботу обладнання. Повідомити відповідальну особу про інцидент. Надати першу допомогу постраждалим і за потреби викликати медичну допомогу.

7. Правила роботи з паливними системами

Перед початком роботи перевірити герметичність паливної системи. Уникати контакту пального зі шкірою або очима; у разі потрапляння негайно промити уражену ділянку водою. Під час роботи з високим тиском у паливній системі дотримуватися безпечної відстані, оскільки пальне під високим тиском може спричинити травми. Забороняється використовувати відкритий вогонь або курити біля робочої зони.

8. Робота з високими температурами

Після зупинки двигуна зачекати, поки його елементи охолонуть, перед початком діагностики. Використовувати інструменти з термоізольованими рукоятками для роботи з гарячими елементами. У разі опіків негайно звернутися за медичною допомогою.

9. Перевірка працездатності двигуна

Перед запуском двигуна забезпечити, щоб усі рухомі частини були захищені та не становили небезпеки. Забезпечити відсутність сторонніх осіб у зоні роботи двигуна. Відпрацьовані гази повинні виводитися через спеціальні системи вентиляції або шланги.

10. Навчання персоналу

Усі працівники, які здійснюють діагностику, повинні пройти навчання та мати відповідні допуски до роботи. Регулярно проводити повторні інструктажі з техніки безпеки. Організувати навчання щодо дій у надзвичайних ситуаціях, таких як витоки пального, займання чи ураження електричним струмом.

11. Профілактичні заходи

Періодично проводити технічне обслуговування діагностичного обладнання. Перевіряти стан електричних кабелів, датчиків та приладів перед

початком роботи. Регулярно оновлювати інструкції та перевіряти відповідність робочих процесів новим нормам і стандартам.

12. Документальне оформлення

Фіксувати в журналах стан обладнання та результати перевірок. У разі аварійних ситуацій складати акти та проводити розбір причин інциденту.

13. Екологічні аспекти

Утилізувати відпрацьовані матеріали (пальне, мастила, фільтри) згідно з екологічними нормами. Забезпечити збирання та зберігання небезпечних відходів у спеціальних контейнерах. Запобігати викидам токсичних речовин у навколишнє середовище.

14. Вимоги до електробезпеки

Забороняється використовувати обладнання з видимими пошкодженнями електропроводки чи корпусу. Підключення діагностичного обладнання має здійснюватися тільки через пристрої захисного відключення (ПЗВ). Використовувати електроінструменти лише з відповідним класом захисту від ураження електричним струмом. Під час обслуговування електрообладнання вимикати його від мережі.

15. Безпечне транспортування і встановлення обладнання

Переносити та встановлювати діагностичне обладнання потрібно лише у відповідності до рекомендацій виробника. Під час переміщення використовувати спеціальні засоби (візки, ремені), щоб уникнути травм. Установлювати обладнання на стійкі поверхні, щоб уникнути його падіння чи розхитування.

16. Робота в умовах обмеженої видимості чи у нічний час

Забезпечити належне освітлення робочої зони. Використовувати додаткові світильники з безпечним напругою (12 або 24 В). Перевіряти наявність тіней чи інших факторів, які можуть ускладнити огляд діагностованих частин двигуна.

17. Робота з гідравлічними та пневматичними системами

Перед початком роботи перевіряти тиск у системах, уникати перевищення граничних параметрів. Забороняється працювати з пошкодженими шлангами, клапанами чи іншими компонентами. Використовувати тільки рекомендовані рідини та мастила.

18. Контроль фізичного та психоемоційного стану працівників

До роботи допускаються лише працівники у доброму фізичному стані. Забороняється виконувати роботи під впливом алкоголю, наркотиків або медикаментів, які можуть впливати на реакцію та концентрацію. Проводити періодичні медичні огляди працівників.

19. Взаємодія з іншими працівниками

Забезпечити чітке узгодження дій між працівниками, які здійснюють діагностику або ремонт. Забороняється одночасне виконання різних робіт в одній зоні без координації дій. У разі виникнення незрозумілих ситуацій припинити роботу та повідомити відповідальну особу.

20. Регулярний аудит умов праці

Проводити періодичні перевірки дотримання вимог безпеки на робочих місцях. Виявляти та усувати потенційні ризики для працівників і обладнання. Оновлювати процедури безпеки у разі змін технологій або нормативної бази.

Висновки

Дотримання цих вимог дозволяє знизити ризики травматизму, забезпечити ефективну роботу обладнання та сприяти збереженню здоров'я працівників і екологічної безпеки.

Дотримання вимог техніки безпеки при роботі з діагностичним обладнанням є необхідним для запобігання нещасним випадкам та збереження здоров'я працівників.

Робоче місце повинно бути організоване відповідно до санітарних та технічних норм, зокрема забезпечене належним освітленням, вентиляцією та зручним доступом до обладнання.

Працівники повинні використовувати ЗІЗ, такі як рукавички, захисні окуляри та антистатичний одяг, для зниження ризику травмування або впливу небезпечних речовин.

Обладнання повинно бути заземлене, а персонал зобов'язаний перевіряти стан електричних з'єднань перед початком роботи, щоб уникнути ураження електричним струмом.

У приміщенні необхідно розміщувати засоби пожежогасіння та забороняти використання відкритого вогню поблизу обладнання, яке може бути джерелом займання.

Персонал має регулярно проходити інструктаж з техніки безпеки, ознайомлюватись із характеристиками обладнання та алгоритмами дій у разі аварійних ситуацій.

Здійснення діагностичних робіт повинно супроводжуватись дотриманням правил утилізації відпрацьованих матеріалів і мінімізацією негативного впливу на довкілля.

Для запобігання аварійним ситуаціям необхідно проводити періодичний технічний огляд діагностичного обладнання.

6 ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКОНОМІЧНА

Економічна доцільність впровадження системи діагностичного комплексу для дизельних двигунів

Зменшення витрат на технічне обслуговування та ремонт (Своєчасна діагностика дозволяє виявляти несправності на ранніх етапах, що знижує ризик серйозних поломок та дорогого ремонту. Зменшення частоти незапланованих простоїв техніки та зупинок виробничих процесів.)

Ефективніше використання ресурсів (Діагностика допомагає оптимізувати параметри роботи двигуна, що сприяє зменшенню споживання пального. Зниження витрат на мастильні матеріали завдяки більш точному контролю стану двигуна.)

Продовження терміну служби двигунів (Регулярний моніторинг технічного стану сприяє уникненню передчасного зносу компонентів. Підтримка оптимальних робочих характеристик зменшує негативний вплив на двигун і продовжує його ресурс.)

Покращення екологічних характеристик (Оптимізація паливної системи та зменшення димності знижують обсяг викидів шкідливих речовин (CO_2 , NO_x , твердих частинок). Відповідність сучасним екологічним стандартам зменшує ризик штрафів за порушення норм забруднення.)

Підвищення продуктивності роботи (Швидкий доступ до точних діагностичних даних мінімізує час простоїв, необхідний для обслуговування техніки. Можливість проводити прогностувальні ремонти замість аварійних, що дозволяє ефективніше планувати використання техніки.)

Зменшення витрат на навчання персоналу (Використання автоматизованих діагностичних комплексів спрощує обслуговування двигунів, що знижує потребу у висококваліфікованих спеціалістах для базового обслуговування.)

Зниження витрат на страхування та компенсації (Підвищення технічної надійності двигунів та зменшення аварійних ситуацій може знизити витрати на

страхові внески. Скорочення кількості інцидентів, пов'язаних з несправностями, зменшує ризики виплат компенсацій за пошкодження майна або шкоду навколишньому середовищу.)

Підтримка конкурентоспроможності (Використання сучасних діагностичних систем дозволяє підприємству забезпечувати стабільну якість виконання послуг або продукції. Економія на ресурсах та зниження собівартості експлуатації техніки створює конкурентні переваги на ринку.

Можливість інтеграції з іншими системами управління (Сучасні діагностичні комплекси здатні інтегруватися в загальні системи моніторингу та управління підприємством, що дозволяє проводити аналіз ефективності техніки у реальному часі. Автоматизований збір даних спрощує планування витрат і технічного обслуговування.)

Підтримка нормативних і законодавчих вимог (Впровадження діагностичних систем відповідає сучасним стандартам екологічної безпеки та технічного регламенту. Забезпечення прозорості у звітності про стан техніки, що знижує ризики претензій з боку державних органів.)

Зменшення непрямих витрат (Завдяки зниженню простоїв техніки підприємство може скоротити витрати на резервні ресурси. Менше часу на усунення несправностей дозволяє персоналу зосередитися на основних завданнях, що підвищує загальну продуктивність.

Підвищення гнучкості управління технічним станом (Діагностичний комплекс дозволяє адаптивно реагувати на зміни у стані двигуна, що дає змогу знизити залежність від фіксованих графіків ТО та перейти до стратегії обслуговування за станом (Condition-Based Maintenance). Такий підхід дозволяє підприємству економити на непотрібному технічному обслуговуванні, виконуючи лише необхідні роботи.

Зменшення впливу людського фактору (Автоматизація діагностичних процесів зменшує ймовірність помилок, пов'язаних із суб'єктивними оцінками технічного стану працівниками. Точні дані, отримані від комплексу, знижують

потребу в додаткових перевірках і повторній роботі, що сприяє економії часу та ресурсів.)

Економічна доцільність впровадження діагностичного комплексу базується на значному скороченні витрат, оптимізації процесів та зменшенні екологічного впливу. У поєднанні з довгостроковими фінансовими перевагами та підвищенням ефективності роботи підприємства, інвестиції в систему діагностики є виправданими та стратегічно вигідними.

Впровадження системи діагностичного комплексу для дизельних двигунів є стратегічно важливим рішенням, що забезпечує підприємству як оперативні, так і довгострокові переваги. Завдяки автоматизації діагностичних процесів та покращенню управління технічним станом обладнання, підприємство отримує комплексну економічну, екологічну та операційну вигоду.

Серед основних економічних переваг виділяються:

Скорочення експлуатаційних витрат: своєчасна діагностика зменшує частоту дорогих ремонтів, мінімізує витрати на паливо, мастильні матеріали та продовжує термін служби двигунів.

Підвищення продуктивності: зменшення простоїв техніки забезпечує стабільність виробничих або транспортних процесів, що сприяє більш раціональному використанню ресурсів.

Зменшення ризиків та витрат на аварійні ситуації: передбачення несправностей дозволяє уникати поломок, які можуть спричинити значні збитки чи втрату активів.

Екологічні аспекти впровадження системи сприяють мінімізації шкідливого впливу на навколишнє середовище. Завдяки оптимізації роботи двигунів знижуються викиди CO₂, NO_x та твердих частинок, що дозволяє підприємству дотримуватися сучасних екологічних стандартів. Це не тільки зменшує екологічні штрафи, а й покращує імідж компанії як соціально відповідального суб'єкта господарювання.

Інтеграція діагностичного комплексу також має значний вплив на безпеку персоналу. Регулярний моніторинг технічного стану двигунів дозволяє мінімізувати ризики травмування працівників через несправності обладнання, що сприяє поліпшенню умов праці та підвищенню загальної ефективності роботи колективу.

Висновки

У довгостроковій перспективі діагностичний комплекс:

- сприяє розвитку інноваційної культури в компанії;
- покращує управління активами завдяки зменшенню зношуваності обладнання;
- відкриває можливості для отримання додаткового доходу через надання сервісних послуг.

Окрім того, застосування такого комплексу підтримує адаптивність підприємства до змін у законодавчій базі, зокрема в частині екологічних та технічних вимог. Відповідність сучасним стандартам робить компанію більш конкурентоспроможною як на локальному, так і на міжнародному ринку.

З огляду на вищевикладені переваги, впровадження діагностичного комплексу є економічно, технічно та екологічно доцільним. Для максимізації вигоди рекомендується:

Провести детальний аналіз витрат на впровадження системи та її очікуваної економії.

Забезпечити навчання персоналу для ефективного використання обладнання.

Інтегрувати діагностичний комплекс у загальну систему управління підприємством для підвищення його функціональності.

Реалізація цього проекту сприятиме сталому розвитку підприємства, підвищенню його ефективності та відповідності сучасним вимогам ринку та екологічної політики.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведена дослідницька і конструкторська робота привела до наступних результатів:

1. Доведено актуальність застосування системної діагностики як комплексної методології, а також її складових: експертної системи і індикаторних методів діагностування.

2. Створено експертну систему (ЕС) технічного діагностування «Exsys» на відкритих базах, застосовується для широкого спектра технічних засобів агропромислового комплексу. Застосування відкритих баз дає широкий потенціал для самонавчання системи; для цього в її складі є компонент, за допомогою якого оператор вносить в бази знань ЕС дані про виникаючі несправності. В системі також реалізований облік зовнішніх чинників експлуатації, таких, як кліматичні умови, якість паливо-мастильних матеріалів і т. п. Система має алгоритм діалогу з користувачем, що дозволяє в інтерактивному режимі підвищувати точність постановки діагнозу аж до довірчої ймовірності, значення якої для діагностики технічних об'єктів рівне 0.8.

3. Використано апаратно-програмний комплекс динамічного діагностування дизелів «ПД-Ц -2». Комплекс дозволяє визначати дійсну потужність двигуна по кутовому прискоренню колінчастого валу при розгоні. Крім того, за допомогою ПД-Ц -2 можуть бути отримані характеристики розгону і вибігу двигуна, що володіють високою інформативністю для діагностики. Застосовувана апаратна основа є низькобюджетною, що дає можливість широкого застосування описаних розробок в рамках єдиної концепції системної діагностики.

4. Запропоновано принципи синтезу 1 і 2 рівнів діагностики, в тому числі і методи представлення їх в експертній системі, частина з яких реалізована на практиці.

5. Вперше для тракторних двигунів випробувані наступні методи діагностики: аналіз пульсацій абсолютного тиску у впускному колекторі, аналіз пульсацій картерних газів.

6. Проведено аналіз ряду індикаторних методів діагностики на їх застосування для тракторного дизеля. Найбільш успішно показав себе аналіз осцилограм показників тиску в різних точках паливної системи низького тиску.

7. Незважаючи на те, що експериментальні дослідження проводилися на дизелі з механічним уприскуванням, використані методи застосовні і для сучасних двигунів з електронною системою управління, в тому числі, інтегрованої в бортову систему. Розроблено підхід до застосування даних від бортових систем для діагностування спільно з індикаторними і іншими методами інтегрального характеру, що дозволяє при комплексному застосуванні домогтися підвищення точності постановки діагнозу.

Подальші дослідження можуть бути, спрямовані на зниження похибок роботи розроблених програмних і апаратних засобів; підвищення їх автономності. Використана методика аналізу індикаторних методів дає основу для подальшого розширення доступної інформації про їх застосування для виявлення тих чи інших несправностей.

Узагальнивши отриману інформацію, можна зробити висновки про те, що використання датчика тиску палива на вході ПНВТ (нехай і низькобюджетного, з невеликою роздільною здатністю і високим часом відгуку) може бути корисним для виявлення таких несправностей:

- засмічення або несправність паливних фільтрів як грубої, так і тонкої очистки;
- підвищений опір паливопроводів, викликаний, наприклад, їх засміченістю або деформацією;
- знижена циклова подача секцій ПНВТ.

Крім діагностичних функцій, датчик здатний виконувати і моніторинг поточного стану СПНТ трактора при його роботі. Для цього може бути виготовлено простий пристрій, що видає попереджувальний сигнал при появі ознак розрідження в паливопроводі.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Шевченко А.С. Діагностика дизельних двигунів: теорія та практика. – Київ: Техніка, 2020. – 320 с.
2. Данилов М.І. Теоретичні основи та методи діагностики дизельних двигунів. – Харків: ХНТУ, 2019. – 280 с.
3. Гнатюк В.В. Сучасні методи діагностики дизельних двигунів: підручник. – Львів: Вища школа, 2021. – 236 с.
4. Bourgeois, J., & Lambert, M. "Advanced Diagnostics for Diesel Engine Fault Detection." *Journal of Automotive Engineering*, 2022, vol. 48, no. 4, pp. 309–320.
5. Ляшенко В.М. Інноваційні технології в діагностиці дизельних двигунів: монографія. – Одеса: ОНПУ, 2021. – 274 с.
6. Mazur, M., & Kołodziej, K. "Condition Monitoring and Diagnostics of Diesel Engines Using Modern Techniques." *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 67, pp. 134–144.
7. Петренко С.О. Методи діагностики технічного стану дизельних двигунів. *Автомобільний журнал*, 2020, №3, с. 45–52.
8. Sklar, R., & Koo, S. "Diesel Engine Performance Diagnostics Using Advanced Sensors." *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, vol. 315, art. 112370.
9. Чекменьова Н.П. Теоретичні основи діагностики і ремонту дизельних двигунів. – Київ: Наукова думка, 2018. – 298 с.
10. Harrison, G., & Zinn, W. "Model-Based Diagnostics of Diesel Engines Using Vibration Analysis." *Journal of Engine Research*, 2020, vol. 59, no. 2, pp. 210–222.
11. Овсієнко О.В. Ремонт та діагностика дизельних двигунів у сільському господарстві. *Аграрна інженерія*, 2019, №5, с. 18–24.
12. Czarnigowski, J., & Kaczmarek, T. "Implementation of Intelligent Systems in Diesel Engine Diagnostics." *Intelligent Transportation Systems Review*, 2020, vol. 9, pp. 78–89.

13. Микитенко В.П. Аналіз та діагностика систем дизельних двигунів: теорія та практика. Автомобільна техніка, 2021, №6, с. 60–67.
14. Sung, C., & Kim, S. "Diagnostic Approaches for Diesel Engine Fuel Injection Systems." *Fuel Systems Journal*, 2020, vol. 34, no. 1, pp. 33–45.
15. Бортник А.С. Технічна діагностика та контроль дизельних двигунів. – Харків: Наукова книга, 2019. – 350 с.
16. Henderson, R., & Jones, M. "Predictive Maintenance of Diesel Engines Using Diagnostics." *Journal of Maintenance and Engineering*, 2022, vol. 33, no. 4, pp. 122–137.
17. Неволін С.О. Сучасні методи вимірювання та діагностики дизельних двигунів. *Техніка та інженерія в АПК*, 2020, №7, с. 48–55.
18. Gupta, N., & Pundir, R. "Engine Fault Diagnostics Based on Vibration Signature Analysis in Diesel Engines." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, vol. 153, art. 107576.
19. Рибачук І.О. Системи діагностики дизельних двигунів автомобілів. *Транспортні технології*, 2021, №9, с. 73–81.
20. Baker, J., & Lewis, D. "Real-Time Diesel Engine Diagnostics Using Machine Learning." *International Journal of Vehicle Design*, 2020, vol. 73, pp. 162–175.
21. Забродський О.А. Методи діагностики та моніторингу дизельних двигунів на основі аналізу викидів та споживання палива. *Екологічна техніка та інженерія*, 2022, №4, с. 47–54.
22. Rodríguez, M., & García, F. "Diesel Engine Diagnostics Using Exhaust Gas Temperature and Pressure Sensors." *Energy Systems and Control*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 88–102.
23. Іванов М.П. Діагностика несправностей дизельних двигунів автомобілів. *Автосервіс та діагностика*, 2020, №11, с. 23–31.
24. Petrov, S., & Tomášek, M. "Fault Detection in Diesel Engines Using Data-Driven Models." *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, vol. 35, no. 6, pp. 2317–2326.

25. Сидоренко І.І. Методи візуальної та акустичної діагностики дизельних двигунів. Автомобільний інжиніринг та технічне обслуговування, 2021, №2, с. 67–74.
26. Briggs, A., & Cooper, T. "Vibration and Acoustic Diagnostics for Diesel Engine Condition Monitoring." *Mechanical Engineering Advances*, 2022, vol. 47, pp. 190–203.
27. Костенко О.В. Системи автоматичної діагностики дизельних двигунів на основі датчиків та аналізу даних. Наукові дослідження та технології в АПК, 2020, №8, с. 55–62.
28. Williams, J., & Zhao, L. "Use of Artificial Intelligence in Diesel Engine Diagnostics." *Advanced Control Engineering*, 2021, vol. 41, no. 3, pp. 234–247.
29. Гріньов І.В. Діагностика та ремонт дизельних двигунів сільськогосподарських машин. Агротехнічна інженерія, 2021, №4, с. 22–29.
- Müller, F., & Huber, G. "In-Cylinder Pressure Analysis for Diesel Engine Fault Diagnostics." *Journal of Internal Combustion Engine Technology*, 2022, vol. 67, no. 5, pp. 67–79.
30. Литвиненко В.І. Методи діагностики та прогнозування працездатності дизельних двигунів. Інженерія машинобудування, 2020, №6, с. 72–80.
31. Jiang, Y., & Zhang, L. "Modeling and Diagnosis of Diesel Engine Fuel Systems." *Automotive Engineering Journal*, 2021, vol. 40, pp. 1034–1045.
32. Шевчук М.О. Розвиток методів діагностики дизельних двигунів з турбонаддувом. Технічні науки та інновації в транспорті, 2022, №9, с. 95–103.
33. Griffiths, R., & Smith, C. "Use of Neural Networks for Diesel Engine Fault Diagnosis." *Automotive Electronics and Diagnostics*, 2020, vol. 18, pp. 151–163.
34. Саприкін В.Г. Комп'ютерні системи діагностики та ремонту дизельних двигунів. Моделювання технічних систем, 2021, №12, с. 53–60.
35. Tomaselli, M., & Ferraro, V. "Fault Diagnosis and Prognosis for Diesel Engines Using Machine Learning Algorithms." *Industrial Applications of AI in Engineering*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 34–44.

36. Демченко В.О. Впровадження інтелектуальних систем для діагностики дизельних двигунів. Наукові проблеми транспорту, 2020, №2, с. 100–107.
37. Yadav, A., & Kumar, S. "Application of Thermography in Diesel Engine Diagnostics." *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, vol. 168, art. 106903.
38. Смірнов О.М. Інтерфейс для діагностики дизельних двигунів автомобілів. Транспорт та логістика, 2022, №8, с. 29–36.
39. Goswami, A., & Singh, R. "Non-Destructive Testing Methods for Diesel Engine Diagnostics." *Materials Testing & Inspection*, 2020, vol. 62, no. 1, pp. 12–24.
40. Гончаренко В.П. Системи діагностики та контролю викидів дизельних двигунів. Екологічна безпека та техніка, 2021, №7, с. 52–59.
41. Srinivasan, S., & Thirumalai, G. "On-Board Diagnostics for Diesel Engine Performance Monitoring." *Automotive Technology Advances*, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 75–88.
42. Корнєєв С.М. Теорія та практика діагностики дизельних двигунів у транспортних засобах. Науково-технічний вісник транспорту, 2022, №5, с. 65–72.
43. Nayak, S., & Ghosal, P. "Online Condition Monitoring of Diesel Engines Using IoT Sensors." *Journal of Advanced Automotive Technologies*, 2021, vol. 44, no. 3, pp. 187–199.
44. Коваленко А.О. Використання ультразвукових методів у діагностиці дизельних двигунів. Звукозапис і технічна діагностика, 2021, №8, с. 34–42.
45. Singh, V., & Bansal, R. "Diesel Engine Diagnostics Using Real-Time Data Processing." *Computers in Mechanical Engineering*, 2022, vol. 30, pp. 110–122.
46. Тимченко І.В. Механізми та методи діагностики дизельних двигунів на основі аналізу термографічних зображень. Інженерія та технології, 2021, №10, с. 48–56.

47. Zhao, Q., & Wu, Z. "Fault Diagnosis of Diesel Engines Using Vibration Signal Processing." *International Journal of Vibration and Acoustics*, 2021, vol. 75, pp. 271–282.

48. Балашова І.М. Системи моніторингу стану дизельних двигунів для підвищення ефективності експлуатації. Автомобільні системи і технології, 2020, №11, с. 89–96.

49. Liu, X., & Zhang, H. "A Review of Diesel Engine Diagnosis Based on Data Fusion Techniques." *Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, vol. 236, no. 4, pp. 399–410.

50. Воронов О.М. Особливості діагностики дизельних двигунів на етапах експлуатації. Наукові розробки та технічні інновації в транспорті, 2020, №6, с. 24–31.

51. Choi, J., & Kim, H. "Diesel Engine Condition Diagnosis Based on Engine Control Unit Data." *Journal of Automotive Technology*, 2021, vol. 46, no. 7, pp. 98–107.

52. Петров К.І. Акустичні методи діагностики несправностей дизельних двигунів. Інженерія та екологія, 2021, №9, с. 74–81.

53. Yang, M., & Liu, L. "Diagnostics and Prognostics of Diesel Engines Based on Machine Learning Models." *Applied Artificial Intelligence in Engineering*, 2020, vol. 31, pp. 220–232.

54. Крюков О.М. Комп'ютерні методи діагностики дизельних двигунів. Інформаційні технології в техніці, 2022, №3, с. 65–73.

55. Brown, D., & Lee, C. "Predictive Diagnostics for Diesel Engines Using Time Series Analysis." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2022, vol. 102, art. 104376.

56. Давиденко В.В. Методи визначення технічного стану дизельних двигунів через аналіз викидів і шуму. Транспортна інженерія та техніка, 2021, №12, с. 90–97.

57. Chang, T., & Li, Z. "Automated Diesel Engine Fault Diagnosis Using Neural Networks and Real-Time Data." *Intelligent Systems in Engineering*, 2021, vol. 29, no. 5, pp. 113–126.

58. Топчій А.О. Методи діагностики та профілактики поломок дизельних двигунів. *Інженерно-технічні рішення для транспорту*, 2022, №2, с. 47–55.

59. Liu, Y., & Ma, X. "State-of-the-Art Diesel Engine Fault Diagnosis Techniques." *Energy and Fuel Systems*, 2021, vol. 49, pp. 85–99.

ДОДАТКИ