

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

технічного сервісу та інженерного

(назва кафедри)

менеджменту ім. М.П.Момотенка

Руслан ШАТРОВ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

«_____» _____ 2026р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Удосконалення експертної системи діагностування двигунів зернозбиральних
комбайнів»

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

(код і назва)

Освітня програма «Агроінженерія»

(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо-наукова

(освітньо-професійна, або Освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

доктор технічних наук, професор

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Геннадій ГОЛУБ

(ім'я, прізвище)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

доктор технічних наук, професор

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Іван РОГОВСЬКИЙ

(ім'я, прізвище)

Виконав:

(підпис)

Ян СЕРВІНСЬКИЙ

(ім'я, прізвище)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Механіко – технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри технічного сервісу та
інженерного менеджменту імені М.П. Момотенка**

д.т.н., проф.
(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Іван РОГОВСЬКИЙ
(ПІБ)

« ____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Сервінському Яну Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

(код і назва)

Освітня програма «Агроінженерія»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна, або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Удосконалення експертної системи
діагностування двигунів зернозбиральних комбайнів»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «13» листопада 2024 р. № 2038 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи Науково – технічна література;
результати науково-дослідних робіт по літературних джерелах по вивченню питання
експертної системи діагностування двигунів зернозбиральних комбайнів

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Розділ 1 Стан питання та завдання дослідження системи діагностування
2. Розділ 2 Теоретичні основи системного діагностування
3. Розділ 3 Методика експериментальних досліджень
4. Розділ 4 Результати експериментів
5. Розділ 5 Економічний ефект системного діагностування

Перелік графічного матеріалу Електронна презентація на 14 слайдах

Дата видачі завдання «11» листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Роговський І.Л.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Сервінський Я.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Сервінський Я.О. магістерська кваліфікаційна робота на тему «Удосконалення експертної системи діагностування двигунів зернозбиральних комбайнів», пояснювальна записка на 86 сторінках, у т.ч. 5 розділів, 28 рисунки, 10 таблиці, 50 літературних джерел, (додатки А і Б,В).

Робота присвячена удосконаленню експертної системи діагностування двигунів зернозбиральних комбайнів.

Створено експертну систему (ЕС) технічного діагностування «Exsys» на відкритих базах, яка застосовується для широкого спектру технічних засобів агропромислового комплексу.

Розроблено апаратно-програмний комплекс динамічного діагностування дизельних двигунів зернозбиральних комбайнів «ІМДЦ-2».

Для реалізації поставленої мети проведено огляд літератури з метою виявлення потенційно корисних, але маловивчених для дизелів методів та засобів технічного діагностування; проведено розробку експертної системи розпізнавання несправностей об'єктів, що відповідає вимогам - які пред'являються агроінженерією, та були проведені експериментальні дослідження розглянутих у ході огляду літератури методів та засобів діагностування двигунів зернозбиральних комбайнів у частині їх модернізації, у тому числі з переходом до цифрових технологій.

Ключові слова: ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА, ДІАГНОСТУВАННЯ, ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИЙ КОМБАЙН, ДИЗЕЛЬНИЙ ДВИГУН.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	3
ЗМІСТ.....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ	
ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ.....	8
1.1. Прогресивна система технічного сервісу та роль діагностування в ній.....	8
1.2. Діагностичні експертні системи.....	11
1.2.1. Вимоги до експертних систем технічного діагностування в АПК.....	13
1.2.2. Огляд експертних систем технічного діагностування.....	14
1.3. Огляд сучасних методів технічного діагностування дизелів.....	15
1.3.1. Органолептичні методи.....	15
1.3.2. Індикаторні методи.....	18
1.3.3. Теплові методи.....	19
1.3.4. Акустичні та віброакустичні методи.....	19
1.3.5. Пневматичні методи.....	20
1.3.6. Динамічні методи.....	21
1.3.7. Гідравлічні методи.....	22
1.3.8. Електродинамічні методи.....	22
1.3.9. Комплексні системи діагностування.....	23
1.4. Застосування бортових електронних систем для діагностування.....	23
1.5. Методи та засоби поглибленого діагностування.....	24
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМНОГО	
ДІАГНОСТУВАННЯ.....	26
2.1. Трирівнева система пошуку несправностей у рамках системного діагностування.....	26
2.2. Структура технічного об'єкта.....	28
2.3. Аспекти роботи діагностичних експертних систем.....	32
2.4. Розробка експертної системи розпізнавання несправностей.....	33
2.4.1. Бази даних умовних ймовірностей.....	35
2.4.2. Розробка нового алгоритму роботи ядра експертної системи.....	35
2.4.3. Діалоговий режим пошуку несправностей.....	37
2.4.4. Розпізнавання інформації від тестів та індикаторних показників експертною системою.....	40
2.5. Апаратно-програмний комплекс динамічного діагностування.....	43

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	45
3.1. Формування баз даних експертної системи.....	45
3.1.1. Визначення умовних ймовірностей експертним методом.....	45
3.1.2. Емпіричний метод формування матриць первинних умовних ймовірностей.....	46
3.2. Методика вибору алгоритму розпізнавання індикаторних показників експертною системою.....	48
3.3. Визначення інформативності індикаторних показників.....	49
3.3.1. Попереднє дослідження пульсацій картерних газів ДВЗ.....	50
3.3.1.1. Експериментальне встановлення.....	51
3.3.1.2. Методика дослідження осцилограми тиску картерних газів.....	52
3.3.2. Поглиблене вивчення пульсацій картерних газів.....	53
3.4. Вивчення теплової похибки діагностування.....	59
3.5. Випробування комплексу ІМДЦ-2.....	60
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	63
4.1. Визначення умовних ймовірностей експертним методом.....	63
4.2. Вибір алгоритму розпізнавання індикаторних показників.....	64
4.3. Визначення інформативності індикаторних показників.....	66
4.3.1. Попереднє дослідження пульсацій картерних газів ДВЗ.....	66
4.3.2. Імітація несправностей паливної системи низького тиску на лабораторному стенді.....	68
4.4. Вивчення теплової похибки діагностування.....	71
4.5. Випробування комплексу ІМДЦ-2.....	74
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ СИСТЕМНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ.....	78
5.1. Економічне обґрунтування ефективності системного діагностування..	78
ВИСНОВКИ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85
ДОДАТКИ.....	92

ВСТУП

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

У свою чергу, одним із факторів, що впливають на експлуатацію та ТОР, є своєчасність та правильність застосування технічного діагностування. Відповідно до запропонованої спеціалістами стратегії технічного обслуговування та ремонту сільськогосподарських машин за станом (тобто за результатами діагностування), періодичність та зміст заходів ТОР повинні, крім іншого, залежати і від даних, що отримуються при діагностуванні, у тому числі в умовах рядової експлуатації машин та обладнання.

Таким чином, якість технічного діагностування, його інформативність, широта спектра застосованих методів і засобів, є одними з головних показників, що визначають надійність машин агропромислового комплексу і суміжних галузей економіки.

У технічній та науково-дослідній літературі представлено значну кількість методів та засобів технічного діагностування двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Однак це різноманіття є не цілісною системою, а розрізненою безліччю елементів.

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

Мета досліджень: розробка алгоритмів системного діагностування машин, що включають перспективні апаратні та програмні методи та засоби діагностування дизелів.

До завдань дослідження належать:

- огляд літератури з метою виявлення потенційно корисних, але маловивчених для дизелів методів та засобів технічного діагностування;
- розробка експертної системи розпізнавання несправностей об'єктів, що відповідає вимогам - які пред'являються агроінженерією;
- експериментальні дослідження розглянутих у ході огляду

літератури методів та засобів діагностування двигунів зернозбиральних комбайнів у частині їх модернізації, у тому числі з переходом до цифрових технологій.

Об'єктом дослідження є системи діагностування двигунів зернозбиральних комбайнів як синтез методологічної та апаратної основ.

Предметом дослідження є методи та засоби технічного діагностування дизелів зернозбиральних комбайнів, придатних для використання в розглянутих умовах, їхній дійсний потенціал, взаємозв'язок та можливості модернізації.

Методи досліджень: Експериментальна та конструкторська робота передувала широкому огляду сучасної літератури - головним чином, публікацій у збірниках та періодичних виданнях. У результаті дослідження застосовувалися методи системного аналізу. При формуванні алгоритму роботи експертної системи використано математичне моделювання. Конструкторська робота була тісно пов'язана з методами спостереження та експерименту, в ході яких, у тому числі, безперервно удосконалювався розроблюваний апаратно-програмний комплекс.

Наукова новизна роботи полягає у синтезі методологічної та апаратної основ системного технічного діагностування, вперше розглянутої для зернозбиральних комбайнів, на основі розробленої експертної системи, що відрізняється алгоритмом підвищення точності діагнозу в діалоговому режимі аж до рівня довірчої ймовірності, та індикаторних методів, модернізованих з метою підвищення їх достовірності.

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ

1.1. Прогресивна система технічного сервісу та роль діагностування в ній

Важливими факторами підвищення надійності мобільних енергетичних засобів агропромислового комплексу є їх своєчасне технічне обслуговування та ремонт.

Історичний шлях розвитку стратегій технічного сервісу в Україні (раніше відомих як концепції технічного обслуговування та ремонту) сільськогосподарської техніки (головним чином зернозбиральних комбайнів), призвів до послідовної появи трьох різних стратегій.

Найпершою стратегією TOP прийнято вважати заявкову, яка зародилася одночасно з появою перших зернозбиральних комбайнів. У її рамках ТО та ремонт проводилися за фактом відмови працівниками, як правило, уповноваженими заводом-виробником. Очевидно, що в таких умовах про якість планування та прогнозування ресурсу техніки не могло бути й мови.

Ієрархічна схема регламентної стратегії TOP наведено на рис. 1.1. Діаграма періодичності технічного обслуговування та ремонтів показана на рис. 1.2.

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

Основною вразливою частиною даного алгоритму обслуговування та ремонту є те, що періодичність операцій ремонтного циклу заздалегідь наказана системою і незмінна (за винятком деяких випадків) для всього парку обраної моделі, незалежно від поточного ресурсу, умов експлуатації та

обслуговування об'єкта.

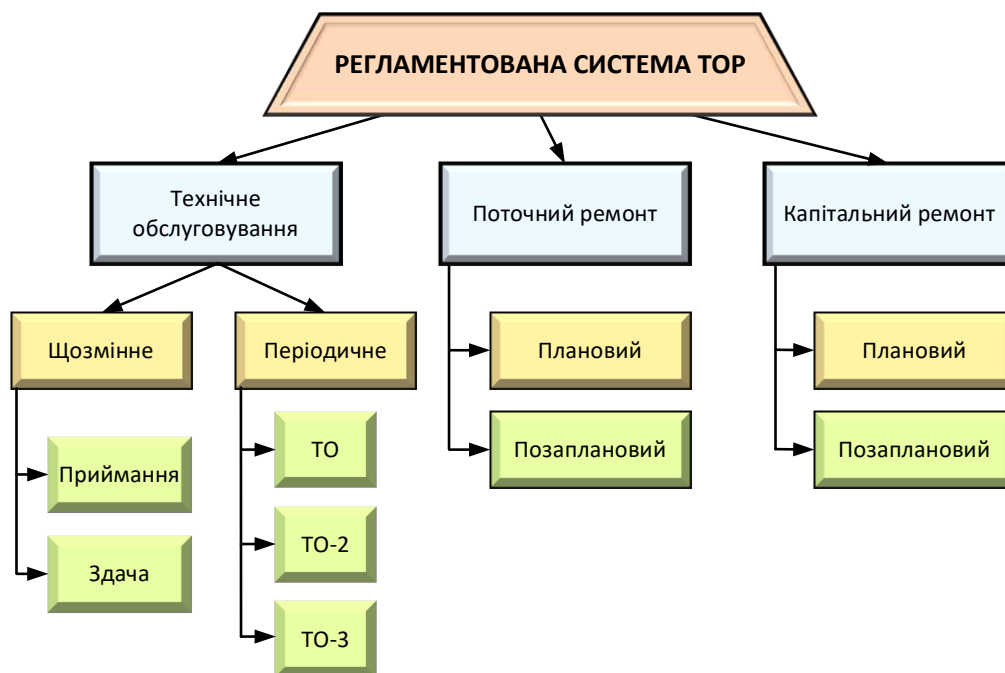


Рис. 1.1. Ієрархічна схема регламентної стратегії ТОР

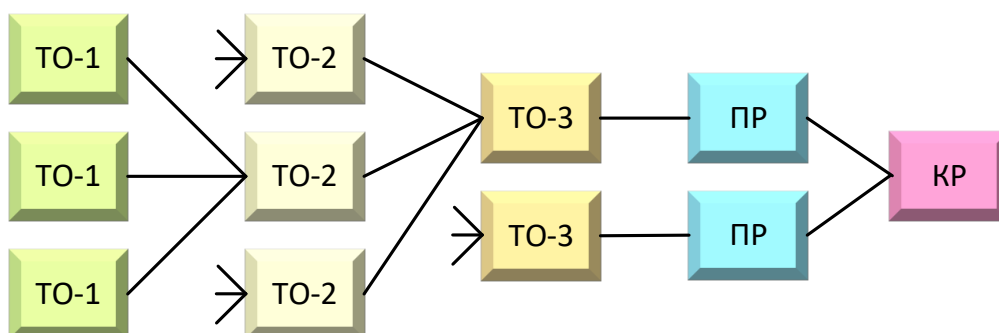


Рис. 1.2. Діаграма періодичності ТО та ремонту

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

З вказаних причин, крім того, 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, немає.

Ця вразливість була частково усунена за допомогою впровадження планово-попереджувальної стратегії, в рамках якої під час проведення ТО-3 та ремонту застосовувалися елементи технічного діагностування.

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

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

У зв'язку з цим перший крок до даної системи може полягати у реорганізації методів діагностування. Навіть за існуючої методології ТО та ремонту пріоритет при діагностуванні повинен надаватися тим методам, які мають мінімальну тривалість та не вимагають додаткового інструментального забезпечення.

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

Таким чином, можна стверджувати, що існуючі методи та засоби діагностування з ряду причин не здатні повноцінно забезпечити необхідну точність пошуку несправностей та встановлення діагнозу, тим більше в процесі рядової експлуатації та за нижчих видів технічного обслуговування.

У зв'язку з цим назріває необхідність реорганізації існуючих або розробки нових, більш універсальних, систем та алгоритмів пошуку несправностей, заснованих не лише на можливостях сучасних інструментальних методів діагностування, а й на особливостях зміни технічного стану в процесі експлуатації та в ході ремонтів, а також ознаках (симптомах), що супроводжують ці зміни.

Для подальшої роботи розглянемо методи та засоби технічного діагностування.

1.2. Діагностичні експертні системи

Поряд із плановим діагностуванням існують ситуації, в яких необхідно позапланове виявлення несправності (переважно, у разі ознак (симптомів), не характерних для штатної експлуатації). У цій ситуації, на відміну від планового діагностування, необхідна участь досвідченого фахівця, здатного визначити можливі несправності, вказати стратегії їх виявлення та подальші дії при виявленні тієї чи іншої несправності. Досвідчені діагности пізньорадянського періоду виявляли до 70% несправностей, але до теперішнього часу фахівці такого рівня обчислюються одиницями, а посада діагноста як така на підприємствах АПК фактично відсутня.

Проте, не завжди існує можливість надання подібного роду допомоги - наприклад, у польових умовах необхідно якнайшвидше виявити несправність та шляхи її усунення з метою уточнення подальших дій, які можуть змінюватись від найпростіших маніпуляцій з обладнанням до евакуації пошкодженої техніки на ремонтну базу.

У подібних умовах функції досвідченого фахівця можуть тією чи іншою мірою виконувати так звані експертні системи, що забезпечують підтримку прийняття рішень в умовах нестачі даних.

Експертні системи є одним із ступенів розвитку штучного інтелекту і застосовуються для управління складними процесами, що мають значну кількість параметрів та показників. Своєю назвою даний тип обчислювальних

систем завдячує тому, що моделює роботу експертів у заданій галузі інтелектуальної діяльності, полегшуючи вирішення завдань управління та прогнозування. Також для експертних систем характерне накопичення інформації в міру роботи для реалізації алгоритмів самонавчання тією чи іншою мірою.

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

В інформатиці експертні системи розглядаються спільно з базами знань як моделі поведінки експертів у певній галузі з використанням процедур логічного висновку та прийняття рішень, а самі бази знань – як сукупність фактів та правил логічного висновку у вибраній предметній галузі діяльності.

Типовий алгоритм роботи експертної системи наведено на (рис. в додатку А).

Головним елементом експертної системи є база знань, що включає інформацію, отриману як при проектуванні системи, так і в ході її самонавчання. База знань є логічно стрункою системою, елементи якої поєднані один з одним та з вхідними параметрами за допомогою математичних та/або логічних зв'язків.

Типовій експертній системі притаманні два режими роботи:

1. Режим введення знань: у цьому режимі експерт за допомогою редактора бази даних запроваджує відомі йому відомості про предметну область на згадку про ЕС.

2. Режим консультації: користувач веде діалог із експертною системою, повідомляючи їй відомості про поточне завдання та 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 вмісту спрацьовують у правилах знань і адекватністю механізму логічного висновку. У зв'язку з цим рекомендується основну увагу приділяти збору та аналізу експертних знань (бази даних) та розробці алгоритму пошуку несправностей технічних об'єктів.

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

1.2.1. Вимоги до експертних систем технічного діагностування в АПК

Одним з факторів, що встановлюють необхідність застосування експертної системи для експрес-діагностування технічних засобів АПК, є, як було зазначено вище, необхідність оперативного реагування на несправності.

Отже, першою визначальною властивістю такої ЕС є її швидкодія. Ця властивість може бути реалізована 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 мобільне, а тим більше кабельне інтернет з'єднання може бути не завжди доступним.

Широкий спектр технічних засобів, що застосовуються в АПК, свідчить про необхідність створення експертної системи, здатної при підключенні працювати із зовнішніми базами даних. Подібні БД можуть створюватися фахівцями як конкретної моделі об'єкта діагностування, так групи об'єктів, які

мають подібні характеристики. Наприклад, незважаючи на відмінності в конструкції ходової частини та трансмісії зернозбиральних комбайнів John Deere та Massey Ferguson, вони обидва оснащені подібними двигунами John Deere Power Tech та AGCO Power або Perkins які мають схожі характеристики, зумовлені вимогам до сучасної сільськогосподарської техніки, хоч і різні виробники. Це дозволяє відмовитися від дублювання баз даних несправностей дизельних двигунів кожного зернозбирального комбайна, обмежившись застосуванням єдиної бази обох моделей.

Окрім технічного стану зернозбиральних комбайнів та машин, значний вплив на їхню ефективність надають умови експлуатації (оцінка експлуатаційних факторів широко розглянуті в працях науковців. Тому третьою обов'язковою вимогою до експертної системи потреб технічного діагностування в АПК є здатність обліку даних експлуатації щодо 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 здатне надалі компенсувати (за рахунок прискорення процесу діагностування) трудовитрати створення баз знань.

1.2.2. Огляд експертних систем технічного діагностування

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

Окремо заслуговують системи діагностування на основі нейромережових технологій як сучасного засобу аналізу інформації. Даний метод зародився відносно недавно і швидко набирає популярності в науковому середовищі.

Видатними науковцями представлено нейронну мережу, яка використовує показники роботи гідромеханічного регулятора

газотурбінного двигуна для його діагностування. Побудовано математичну модель даного регулятора, у спрощеному, лінеаризованому варіанті використану в роботі самої нейромережі. Також проаналізовано низку алгоритмів самонавчання нейронних мереж.

Тема діагностування газотурбінних двигунів також представлена у роботах науковців (Hans R. DePold, F. Douglas Gass, Pratt & Whitney, США). Авторами розглядаються:

- застосування статистичного аналізу та фільтрів на основі штучної нейронної мережі для підвищення якості одержуваних даних;
- нейромережа для виявлення зміни тренду сигналу з метою діагностування змін продуктивності;
- застосування експертної системи з метою діагностування, подання тривожних повідомлень та вибудовування рекомендацій щодо ремонтно-обслуговуючих дій.

Система на віброакустичних показниках його роботи ДВЗ використовує ймовірнісну нейронну мережу та метод конструювання шаблонів на основі дискретного вейвлет-перетворення. Отримані результати підтверджують потенціал визначення технічного стану ДВЗ за допомогою аналізу віброакустичних явищ, що виникають у його роботі.

1.3. Огляд сучасних методів технічного діагностування дизелів

1.3.1. Органолептичні методи

Найбільш примітивними та простими у виконанні є органолептичні методи, що ґрунтуються на спостереженні за об'єктом діагностування, у тому числі при різних режимах його роботи, та формалізації отриманої інформації у вигляді так званих якісних ознак.

Відмінною рисою органолептичних методів є використання спеціальних інструментів.

До якісних ознак можна віднести, серед інших:

- **неможливість запуску двигуна.** Під даною ознакою мається на

увазі те, що при прокручуванні колінчастого валу стартером або пусковим двигуном дизель не запускається навіть за достатньої частоти обертання колінчастого валу. Причинами можуть бути, наприклад, несправність системи живлення паливом, повітряна пробка у ній чи банальна відсутність палива у баку;

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

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

Не зайве перерахувати та інші ознаки:

- недостатня частота обертання стартера;
- утруднений пуск дизеля;
- зупинка дизеля відразу після запуску;
- нестабільна робота на номінальному режимі;
- надмірна витрата палива;
- стукіт у двигуні;
- вихлоп білого кольору;
- вихлоп блакитного кольору;
- надмірна витрата оливи;
- перегрів дизеля;
- тривале прогрівання дизеля;
- вихід великої кількості газів через сапун;
- вихід пари із сапуна;
- нестача потужності;
- вібрація у двигуні;
- низький тиск оливи;

- високий тиск оливи;
- надлишковий тиск у впускному колекторі (зворотні пульсації) і т.д.

Наведений список є лише частковим відображенням спектра можливих несправностей дизеля та його ознак.

Частина якісних ознак виявляється лише за певних ситуаціях, імітація яких зветься діагностичних тестів.

Діагностичні тести - займають проміжне положення між першим та 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 такі:

- **прокачування палива** ручним паливопідкачуючим насосом при відкритті клапана випуску повітря. Даний тест застосовується для перевірки наявності повітря в паливній системі та в більшості випадків відразу усуває цю несправність;

- **аналіз хроматограми оливи** - дозволяє виявити як його забруднення твердими частинками чи рідинами, і втрату в'язкості, чи, навпаки, її надмірне значення;

- **контроль пульсацій у трубках від ПНВТ до форсунок** - здатний зазначити несправність тієї чи іншої секції паливного насоса;

- **почергове відключення форсунок** - шляхом від'єднання підвідних трубок застосовується щодо неробочого циліндра, при його вимиканні частота обертання колінчастого валу залишається незмінною;

- **тест швидкості відгуку управління подачею палива** - здатне дати уявлення про стан зчленувань паливної рейки. При повільному переміщенні педалі або важеля керування подачею палива заклинили та можуть залишатися в попередньому положенні;

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

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

1.3.2. Індикаторні методи

До індикаторних відносять методи оперативного діагностування, при реалізації яких використовуються, як правило, первинні перетворювачі (датчики, манометри та інші подібні пристрої), установка яких не вимагає підрозбирання двигуна для діагностування. Допустимою у цій концепції також є часткове підрозбирання, обмежене малим числом легкознімних вузлів.

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

- теплові: наприклад, використання пірометра чи тепловізора виявлення аномальних температур вузлів двигуна і несправностей, які викликали аномалію;
- акустичні та віброакустичні: явища несправностей щодо показників механічних коливань об'єкта діагностування;
- пневматичні: засновані на реєстрації параметрів стану повітря та газів у різних порожнинах дизеля;
- динамічні: як правило, пов'язані з вимірюванням частоти обертання колінчастого валу на перехідних режимах та подальшим аналізом динамічних показників для визначення дійсного значення ефективної потужності ДВЗ;
- Електродинамічні: наприклад, запис діаграми струму стартера та її аналіз для виявлення додаткового опору у вузлах двигуна;
- комплексні методи індикаторної та поглибленого діагностування.

Для повноти розуміння концепції індикаторних методів розглянемо кожен з цих груп детальніше.

1.3.3. Теплові методи

Двигун внутрішнього згоряння, як і будь-який технічний об'єкт, під час роботи виділяє теплову енергію. Найбільшою мірою це пов'язано з тим, що теплота від робочого процесу та відпрацьованих газів значною мірою накраплюється в елементах двигуна. Від деталей, що формують камеру згоряння, тепла енергія поширюється всім двигуном.

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

Незважаючи на те, що самі по собі теплообмінники є допоміжним обладнанням ДВЗ, представлені методи, зокрема визначення їх забрудненості, можуть бути поширені і на інші елементи двигунів внутрішнього згоряння, наприклад, фільтри очищення масла.

Також виділення тепла в ДВЗ пов'язане із втратами на тертя в підшипникових вузлах ковзання, фрикціонах та зубчастих зачепленнях.

1.3.4. 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 діагностування внаслідок того, що зняття вібраційних показників відрізняється низькою трудомісткістю, а їх аналіз при правильній методології має високу інформативність виявлення несправностей механічних вузлів ДВЗ.

Спрощене діагностування газорозподільного механізму за подібними алгоритму, що використовує тільки амплітуду сигналу віброімпульсу. Слід зазначити, що алгоритм і нормативні показники дійсні лише для розробленого експериментального приладу і може значно відрізнятися від

інших моделей вібродатчика і осцилографа.

Також, окрім вібраційних показників, мають значення і акустичні. Їх, аналогічно віброграмам, знімають так звані сонограми роботи ДВЗ у різних умовах.

1.3.5. Пневматичні методи

Оскільки робота дизельного двигуна заснована на термодинамічних явищах, його технічний стан багато в чому може бути визначений параметрами пневматичних процесів, що відбуваються в двигуні під час його роботи.

Одним із найбільш інформативних пневматичних показників є параметри стану картерних газів. При роботі двигуна внутрішнього згоряння в картер завжди надходить кілька газів з камери згоряння. У новому двигуні це в основному паливоповітряна суміш, що просочується з циліндра на такті стиснення, але в міру зносу починають переважати гази, що відпрацювали (що потрапляють на такті розширення).

На величину витрати картерних газів дизелів (що працюють у більш важких умовах, ніж автомобільні) впливають численні фактори, основними з яких є:

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

Найінформативнішим показником цієї групи є витрата картерних газів. Класичними приладами для його вимірювання є КІ-4887-II та КІ-13671. Перший із перелічених приладів відрізняється високою точністю

вимірювання, але збільшеною трудомісткістю процесу діагностування; у другому досягнуто зниження трудомісткості рахунок зменшеної точності.

Також одними з інформативних діагностичних показників ДВЗ, є осцилограми пульсацій тиску у впускному та випускному колекторах. У роботі описані найбільш інформативні режими роботи ДВЗ для діагностування за даними показниками. Цікаво експериментально перевірити дійсну інформативність подібних осцилограм стосовно дизеля.

1.3.6. Динамічні методи

Класичним прикладом динамічного методу діагностування є аналіз кутового прискорення колінчастого валу при його вільному розгоні або повному вибігу.

Пристрій ІМД-Ц дозволяє виміряти такі показники, як: частота обертання колінчастого валу двигуна; кутове прискорення колінчастого валу в процесі вільного розгону або повного вибігу; напруга у системі електроустаткування зернозбирального комбайна. За даними показниками можна визначити: ефективна потужність двигуна; потужність механічних втрат; крутний момент у режимі номінальної потужності; механічний ККД; індикаторна потужність; коефіцієнт нерівномірності роботи циліндрів

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

Діагностування при постійній частоті обертання валу переслідує інші цілі, однак, засноване на тих же процесах, що і діагностування з кутового прискорення. Показано графіки кутової швидкості та кутового прискорення колінчастого валу за один його оборот. Дані показники мають певну інформативність щодо виявлення неоднорідності роботи циліндрів і регулятора частоти обертання (слід зазначити, що ще застосовується її позиційне автоматичне регулювання). Також у роботі запропоновані методи

математичного перетворення та інтерпретації одержуваних осцилограм $n(t)$ та $\varepsilon(t)$.

Недоліком подібних методів індикаторного діагностування є необхідність встановлення додаткового обладнання на двигун: датчика зубців вінця маховика (що пов'язано з необхідністю свердління картера зчеплення на комбайні); або розподільчого диска. Динамічні методи цінні тим, що можуть органічно доповнювати будь-які інші методи та засоби діагностування.

1.3.7. Гідравлічні методи

Поряд з параметрами стану тиску газових середовищ для ДВЗ є інформативним тиск у точках масляної, водяної та паливної систем - 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 наближенні можна вважати такі, які не підлягають стисканню (стискання використовуваних у ДВЗ рідин проявляє себе лише за значних величин тиску).

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

Також науковцями наведено теоретичні та експериментальні дослідження фільтра для очищення оливи з погляду його частотних характеристик. Показані амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики фільтрів (відцентрового та з фільтроелементами) різного ступеня засміченості, а також мають несправність. Зроблено висновок про доцільність моніторингу даних характеристик шляхом встановлення датчиків тиску оливи до та після фільтрів.

1.3.8. Електродинамічні методи

Головним з електродинамічних методів є діагностування стану механіки двигуна за струмом, який споживає стартер на режимі пуску та прокручування - так званий «метод відносної компресії». Його основою є

пропорційна залежність між крутним моментом, необхідним для прокручування валу ДВЗ, і струмом, споживаним стартером. Зниження значень компресії в циліндрах двигуна призводить до зменшення опору стиснення повітряного заряду в камері згоряння, і, таким чином, знижує величину пульсацій стартерного струму.

1.3.9. Комплексні системи діагностування

Крім одиночно застосовуваних методів, існують також комплексні системи технічного діагностування, що поєднують у собі ряд індикаторних та поглиблених методів.

У сучасних умовах апаратна основа подібних систем зазвичай реалізується за допомогою так званих мотор-тестерів. Одним із найбільш популярних тестерів є MotoDoc III.

1.4. Застосування бортових електронних систем для діагностування

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

Крім того, статистика, отримана від сервісів, що співпрацюють із General Motors, вказує на переважання відмов електроніки над відмовами механічних систем. Зокрема, аналіз більше 10000 гарантійних рекламацій за період з 2009 по 2024 роки показав, що 70% відмов припадає на електронні системи керування зернозбиральних комбайнів, 20% на відмови механіки двигунів та трансмісій і 10% на відмову.

Бортова система, що використовується на комбайнах John Deere, відображає близько 350 різних показників, проте тільки 11,4% з них дозволяють судити про стан механічної частини двигуна зернозбирального комбайна, інші відображають в основному несправності датчиків та інших

елементів системи керування.

Існування подібних комплексів дозволяє судити про те, що, незважаючи на переважно електронну спрямованість бортових систем, існує певний потенціал їх застосування з метою діагностування механіки двигунів.

1.5. Методи та засоби поглибленого діагностування

Методи поглибленої діагностування можна умовно поділити на інтегральні та диференціальні. Інтегральні способи здатні дати уявлення про напрям подальшого діагностування чи ремонту, але не визначають причину несправності. Диференціальні методи дозволяють виявити несправність і її причину, а також визначити обсяг ремонту.

Засоби поглибленої діагностування є найпоширенішими на даний момент.

У магістерській кваліфікаційній роботі розглядаються лише індикаторні та органолептичні методи, тому має сенс навести приклади лише деяких приладів та методів поглибленої діагностування.

Як приклад вкажемо деякі прилади та методи поглибленого діагностування, які використовуються у навчальному процесі на кафедрі ТСіМ імені М.П. Момотенка:

- механотестер паливної апаратури МТА-2 - використовується для контролю тиску підйому голки форсунки, гідрощільності її елементів, якості розпилювання палива (на слух). Прилад отримав широку популярність і дозволяє значно скоротити частину прогресуючих витрат, які пов'язані з втратою палива від розрегулювання чи неправильної налаштування паливної апаратури високого тиску;
- аналізатор герметичності циліндрів АГЦ-3 - дозволяє визначити значення повного та залишкового вакууму в циліндрах при прокручуванні колінчастого валу на пускових оборотах. Набуті значення характеризують точку на номограмі, яка визначає технічний стан циліндро-поршневої групи та органів газорозподілу досліджуваного циліндра;

➤ пристрій для вимірювання сумарного зазору в кривошипно-шатунному механізмі - КІ-11140. Встановлюється замість форсунки, вимірювальна голка пристрою підводиться до поршня в положенні ВМТ у такті стиснення. Шляхом попереминої подачі до поршня тиску вище і нижче атмосферного за показаннями шкали мікрометричної головки пристрою визначають сумарний зазор у КШМ;

➤ технічний ендоскоп для візуального виявлення дефектів у недоступних для зору місцях, наприклад, задир на поверхні циліндрових гільз, наявності окалини в циліндрах, забруднення тих чи інших патрубків, порожнин і т. д.;

➤ пневмотестер для визначення витрати повітря через зазори циліндро-поршневої групи. Аналогічно виміру сумарного зазору КШМ встановлюється замість форсунки при положенні поршня в ВМТ такту стиснення, і при подачі повітря в циліндр вимірює його витрати, що у свою чергу характеризує пневмощільність пари поршень-гільза.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

2.1. Трирівнева система пошуку несправностей у рамках системного діагностування

Першим кроком до подібної реорганізації є розгляд існуючих методів та засобів діагностування як зв'язкової трирівневої системи пошуку та локалізації несправностей. Рівні цієї системи поділяються за глибиною пошуку і за трудомісткістю та особливостями застосування використовуваних у кожному випадку інструментів та методів.

Перший рівень - представлений діагностуванням з органолептичними показниками роботи об'єкта (зовнішнім ознакам), тобто таким, які можна зареєструвати без застосування будь-якого спеціального інструментарію. Як було зазначено вище відповідні методи діагностування реалізуються виключно за допомогою органів сприйняття людини і тому називаються органолептичними.

Точність органолептичного сприйняття встановлюється законом Вебера-Фехнера:

$$p = k \ln \frac{S}{S_0}, \quad (2.1.)$$

де: p -сила відчуття;

S -інтенсивність подразника;

S_0 -нижнє граничне відчуття інтенсивності подразника;

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

З виразу випливає, що сприйняття того чи іншого показника може значно відрізнитися в залежності від сприйнятих зовнішніх умов і від людини. З цієї причини точність органолептичних методів при їх поодинокому застосуванні низька, що потребує роботи з комплексом органолептичних показників.

На етапі аналізу якісних ознак роботи об'єкта визначаються характер та зразкова локалізація несправності на рівні основних його підсистем.

Виявлення несправності за органолептичними показниками існує або спеціалістом-діагностом, або експертною системою, яка в найпростішому випадку може бути представлена набором таблиць і правил, але в класичному розумінні є комп'ютерною програмою того чи іншого рівня складності.

Другий рівень діагностування є використання індикаторних методів, основу яких вкладена формалізація якісних ознак з урахуванням діагностичних параметрів.

Прилади, що застосовуються для індикаторних методів, зазвичай не вимагають тривалої підготовки до діагностування. Датчики та інші чутливі елементи подібних приладів встановлюються на об'єкт без необхідності його підрозбирання (або з демонтажем елементів, що легко знімаються).

Характерними ознаками індикаторних методів є швидкість оцінки та 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 ухвалення рішення про управління технічним станом об'єкта. Таким чином, другий рівень діагностування дозволяє уточнити локалізацію відмови, але не гарантує достатньо точного діагнозу.

Третій рівень діагностування являє собою найбільш глибокий, інструментальний пошук несправності, що базується на результатах проведення першого та другого етапів. Використання даних, отриманих від експертної системи та індикаторних методів, у ряді випадків дозволяє частково або повністю привести третій етап до так званих диференціальних методів діагностування, тобто спрямованих на виявлення конкретної несправності або малої кількості. Диференціальні методи, своєю чергою, дозволяють рахунок використання групи діагностичних показників вирішити, власне, завдання визначення кількох невідомих.

Фактично, завданням третього рівня діагностування є безпосереднє виявлення причин відмови чи несправності.

Узагальнюючи сказане, можна резюмувати, перший рівень глибини пошуку несправностей який реалізується у вигляді аналізу якісних діагностичних ознак, а другий і третій - з урахуванням умовно-послідовного алгоритму пошуку з величезним переважанням кількісних показників.

2.2. Структура технічного об'єкта

В рамках концепції системної діагностування основою структурування об'єкта є призначення його підсистем та елементів. За функціональними ознаками об'єкт представляється у вигляді структури, яка, згідно з положеннями системного аналізу, включає системи, підсистеми *n*-го рівня і первинні елементи, що є кінцевим елементом членування структури. З погляду системного аналізу дизельний двигун є системою зі структурою сильної ієрархії, тобто, суворим підпорядкуванням елементів нижчого рівня одному з компонентів вищого. Подібне підпорядкування може бути представлене у вигляді вертикальних зв'язків. У свою чергу, слабкі, горизонтальні зв'язки також присутні в ієрархічній побудові дизельного двигуна, проте для цілей системного діагностування подібні зв'язки не становлять значної цінності, тому для більшості завдань можуть бути відкинуті.

До кожного первинного елемента призначається набір структурних параметрів.

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

Узагальнений структурний параметр - фізична величина, що характеризує з припустимою похибкою працездатність кількох елементів об'єкта діагностування.

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

Кожному структурному параметру відповідають:

➤ **апріорна ймовірність несправності**, вихід структурного параметра за межі допустимих значень. **Апріорна ймовірність** може

змінюватися залежно від факторів експлуатації об'єкта: напруження, проведення ремонтів, атмосферних умов, якості паливо-мастильних матеріалів тощо;

- діагностичний параметр (або параметри), що характеризує структурний параметр з погляду методів та засобів діагностування;
- якісні ознаки відмови (як органолептичні).

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

Чутливістю називають швидкість збільшення діагностичного параметра при зміні величини структурного (безпосередньо характеризує технічний стан об'єкта). Для одного і того ж значення зносу витрата картерних газів збільшується в кілька разів 10-20%.

Стабільність - характеристика варіації діагностичного параметра при багаторазових вимірах з тим самим значенням структурного. Найменший розкид значень означає більшу величину стабільності.

Однозначність - характеризується відсутністю екстремумів від початкового до граничного значення залежності діагностичного параметра від структурного, тобто ознакою похідної від даної залежності.

Інформативність - достовірність діагнозу, що отримується в результаті вимірювання значення діагностичного параметра.

Розглянемо запропонований вище системний підхід стосовно об'єкта діагностування з прикладу дизельного двигуна John Deere PowerTech як блок-схеми членування (рис. 2.1.), виділивши у ній галузь паливної апаратури високого тиску.

В подальшому наведемо таблицю структурних параметрів на прикладі форсунки (табл. 2.1.).

Апріорна ймовірність P_{ai} відмови є приблизною величиною, а її рівень встановлюється у вигляді експертної оцінки. Розглядаючи конкретний структурний параметр, експерт (на підставі свого досвіду) визначає апріорну

можливість його порушення.

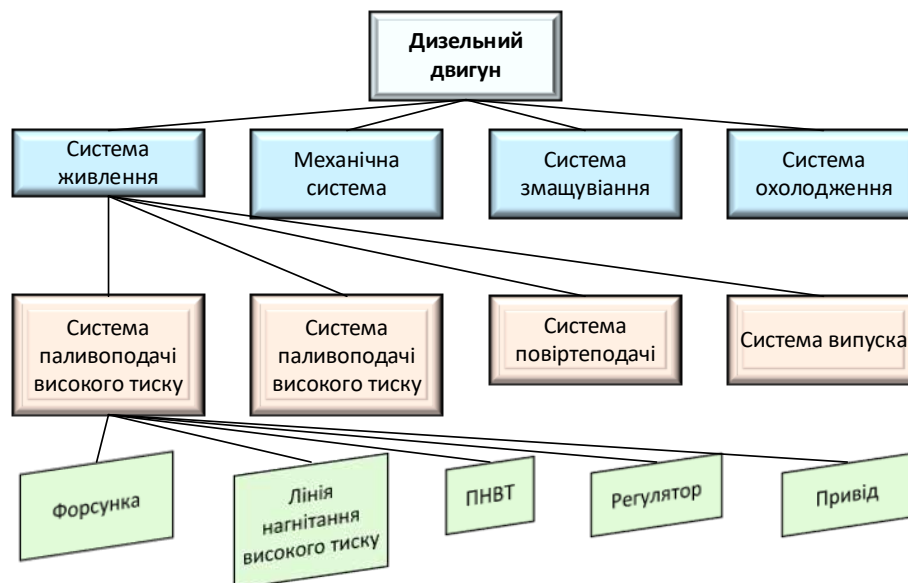


Рис. 2.1. Структура дизельного двигуна John Deere PowerTech

Таблиця 2.1.

Структурні та діагностичні параметри форсунки

Структурний параметр	Апріорна ймовірність відмови	Діагностичний параметр	Якісні ознаки відмови
Зазор у поєднанні голка - корпус розпилювача	0,3	Швидкість падіння тиску	Падіння потужності, нерівномірність роботи циліндрів
Рухливість голки	0,1	Осцилограма вібрації на малих обертах	Перепустки подачі, стуки
Якість розпилювання	0,25	Осцилограма $P_{\text{форс}}$, звучність упорскування	Чорний або темно-сірий колір вихлопу, падіння потужності, утруднений пуск у холодну пору
Тиск упорскування	0,2	Тиск підйому голки	Чорний або темно-сірий колір вихлопу

1. Призначення єдиного структурного параметра укрупненого елемента.

Приймаємо назву структурного параметра «справність форсунки».

2. Визначення апріорної ймовірності для укрупненого елемента. При великій кількості структурних параметрів елемента було б правильним використовувати медіану значення (моду), але оскільки дійсна кількість структурних параметрів елемента, як правило, невелика, то можна використовувати середнє арифметичне. Для форсунки отримуємо $\bar{P}_a = 0,2125$.

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

4. Якісні ознаки відмови для укрупненого елемента набувають властивість, яка називається умовною ймовірністю P_{ij} . Її значення для кожної якісної ознаки визначається як середня апіорна ймовірність для структурних параметрів, що мають цю ознаку відмови. Нерівномірність роботи циліндрів отримає умовну ймовірність, що дорівнює 0,3. Для чорного чи темно-сірого кольору вихлопу її значення становитиме 0,225.

У разі об'єднання елементів, що вже містять умовні ймовірності, значення P_{ij} для якісних ознак, що входять в елемент, додатково перемножуватимуться з відповідною апіорною ймовірністю:

$$P_{ij\ n+1} = P_{ij\ n} \cdot P_{a\ n}, \quad (2.2.)$$

де n - кількість «вкладених» рівнів укрупненого елемента.

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

$$P_{a\ n+1} = m^{-1} \sum_{i=1}^m P_{a\ n\ i}, \quad (2.3.)$$

де m - кількість структурних параметрів укрупненого елемента. Відповідно, для знаходження k -ї апіорної ймовірності необхідно перетворити вираз 2.3. до такого виду:

$$P_{a\ n\ k} = m \cdot P_{a\ n+1} - \underbrace{\sum_{i=1}^{k-1} P_{a\ n\ i}}_{\text{дано}} - \sum_{i=k+1}^m P_{a\ n\ i}, \quad (2.4.)$$

З представленого виразу очевидно, що аж до останнього структурного параметра, що залишився, апіорні ймовірності можуть варіюватися в широкому діапазоні. Проте в такому випадку можливі ситуації, коли апіорна ймовірність, що залишилася, 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 дозволяє організувати безліч апріорних ймовірностей з максимальним наближенням їх значень до потрібних.

Отримувана база даних, що включає структурні та діагностичні параметри, апріорні ймовірності та якісні ознаки відмови, покликана служити цілям діагностування за допомогою головним чином 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 та виділити такі аспекти використання експертних систем для діагностування:

1. Основою типової експертної системи є класифікатор (база даних), у якому зіставляються несправності та діагностичні ознаки. Класифікатор складається:

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

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

2. Експертна система дозволяє накопичувати, систематизувати та зберігати знання та професійний досвід тих експертів, які виконують конкретні завдання якнайкраще. Насамперед це стосується тих областей, де завдання та їх вирішення формалізовані слабо або зовсім не формалізовані, не структуровані. До подібних областей може бути віднесена і технічна діагностика, оскільки одним із базисів методології, що є в цій галузі знань, є аналіз даних людиною.

3. Експертна система сприяє уникненню помилок у процесі діагностування за рахунок зниження частки людського фактора; у тому

числі пов'язаних із згаданим вище недостатнім досвідом.

4. Бази знань експертної системи, отримані за допомогою експертів та спостереження за експлуатуючою технікою, дають широкі можливості щодо навчання персоналу ремонтно-обслуговуючих підприємств.

Експертні системи з функцій поділяються на два види:

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

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

У тих випадках, коли якісних показників недостатньо для виявлення конкретної несправності з необхідною точністю, потрібно застосовувати додаткові прийоми, тести та методи. Як правило, до подібних методів (стосовно дизелів) відносять: спостереження за пульсаціями тиску в різних порожнинах дизельного двигуна, синхронізованими щодо роботи циліндрів; вивчення перепадів температур робочих поверхонь та рідин, динамічних показників; аналіз вібрацій, шумів та звуків у різних діапазонах частот тощо.

2.4. Розробка експертної системи розпізнавання несправностей

Одним із основних напрямків магістерської кваліфікаційної роботи була розробка програмного комплексу, що є експертною системою розпізнавання несправностей за їх ознаками (симптомами) для технічних засобів АПК.

Для опису розробки та подальшого патентування експертної системи, що розробляється, необхідно дати їй назву. Оскільки дана ЕС є лише концептом, ядром майбутнього програмного комплексу системної діагностування, має сенс дати їй просту назву Exsys [Expert system].

Для розробки та подальшого розгляду алгоритму роботи системи Exsys використовуємо такі позначення:

❖ **ознака (симптом) S_i** - якісний ознака (органолептичний показник

чи зовнішній фактор);

❖ **умовна ймовірність** P_{ij} , тобто ймовірність вияву несправності D_i [Defect: англ. дефект, несправність] за ознакою S_j [Symptom: англ. симптом, ознака].

Імовірнісний алгоритм роботи експертної системи були застосовані у наукових працях, де розроблено експертну систему «Дизель-діагност». Доцільно розглянути докладніше основний алгоритм описаної роботи, так звану формулу Байєса:

$$P^*(H_i) = \frac{P(H_i) \cdot P\left(\frac{K_j}{H_i}\right)}{\sum_i P(H_i) \cdot P\left(\frac{K_j}{H_i}\right)}, \quad (2.5.)$$

де: $P^*(H_i)$ - апостеріорна ймовірність наявності i -ї несправності;

$P(H_i)$ - ймовірність виникнення i -ї несправності (апріорна);

$P\left(\frac{K_j}{H_i}\right)$ - умовна ймовірність (в цій роботі P_{ij}).

Даний підхід правомірний і абсолютно справедливий для класичної, статичної теорії ймовірностей, проте його застосування в практичних інженерних питаннях ускладнюється наступними фактами:

❖ ймовірність $P(H_i)$ виникнення несправності (апріорна) у її статичному вигляді не застосовна з точки зору теорії надійності, згідно з якою ймовірність відмови $q(t)$ визначається для часового проміжку $0 \leq t \leq t_{\text{поточ}}$, де $t_{\text{поточ}}$ - поточний момент, або заданий;

❖ апостеріорні ймовірності в байєсовському алгоритмі визначаються на основі формули повної ймовірності, з припущенням того, що сума всіх апостеріорних ймовірностей дорівнює одиниці.

❖ додаткове використання апріорної ймовірності при пошуку несправності недоцільно ще й тому, що апріорна ймовірність сама собою вказує на найбільш можливі несправності, що може утруднити виявлення тих несправностей, апріорна ймовірність яких мала в порівнянні з іншими.

Для усунення даних чинників потрібно розробка принципово нового основного алгоритму, що базується виключно на умовних імовірностях.

2.4.1. Бази даних умовних ймовірностей

Перед подальшою роботою формування алгоритму буде доцільно попередньо розглянути структуру баз даних умовних ймовірностей. Оскільки умовна ймовірність має дві «координати» (несправність і ознака), їх база даних буде двовимірний масив (таблицю, матрицю) умовних ймовірностей, стовпці якого відповідають ознаками, а рядки - неполадкам. Фрагмент подібного масиву для зернозбирального комбайна John Deere (дизельний двигун John Deere Power Tech) наведено у таблиці 2.2.

Подібні бази даних доцільно прив'язувати моделі двигуна. Крім того, 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 подібних об'єктів можна застосувати принцип подоби.

Для двигунів з електронним упорскуванням (головним чином Common Rail) загальні бази даних також застосовні, за винятком тих несправностей, що відносяться до паливної системи високого тиску.

2.4.2. Розробка нового алгоритму роботи ядра експертної системи

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

Як зазначено вище, алгоритм Байєса непридатний для поставлених цілей, тому потрібно розробити нову формулу, що відповідає таким вимогам:

- ❖ робота без введення апіорної ймовірності несправності;
- ❖ облік зовнішніх факторів (поточний ресурс об'єкта, кліматичні умови, якість паливно-мастильних матеріалів);
- ❖ облік сили прояви ознак (вже розроблений алгоритм)
- ❖ правильність результатів з погляду теорії ймовірності.

Облік зовнішніх факторів може бути з легкістю реалізований

шляхом розгляду їх у ролі якісних ознак та подальшого обліку під час роботи основного алгоритму. Для цього до матриці первинних умовних ймовірностей додаються фрагменти, аналогічні наведеному в таблиці 2.2. Так само можуть бути введені коди несправностей, одержувані від бортових комп'ютерів: ці коди характеризують не саму несправність, лише її ознаки, зокрема органолептичні.

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

Таблиця 2.2.

Фрагмент матриці коефіцієнтів для зовнішніх умов

Зовнішні умови Несправності	Низька температура повітря	Запиленість повітря	Нещодавній ремонт	Значний поточний ресурс	Значне напруження після ремонту
Недостатній заряд акумуляторної батареї	0,9	0	0,6	0,4	0,35
Підвищена в'язкість олії	0,9	0	0,2	0	0
Забруднення повітряного фільтра	0	0,9	0	0	0,8
Підвищений знос ЦПГ	0	0,2	0	0,8	0,9
Парафінізація палива	0,9	0	0	0	0
Наявність води у паливі	0	0	0,2	0	0

Першим очевидним припущенням є просте перемноження умовних ймовірностей, отриманих з бази даних кожної несправності при вибраних ознаках (вираз 2.6.)

$$P_i = \prod_j P_{ij}, \quad (2.6.)$$

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

Логічно було б припустити, що алгоритм можна реалізувати шляхом складання умовних ймовірностей (вираз 2.7.) оскільки ознаки тут мають властивості подій, що відбуваються спільно.

$$P_i = \sum_j P_{ij}, \quad (2.7.)$$

Втім, під час аналізу даного висловлювання стає зрозуміло, що апостеріорна ймовірність часто може виявитися більше одиниці, що суперечить положенням теорії ймовірності.

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

$$p = 1 - q$$

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

Поєднавши вирази 2.6. та 2.7. і отримуємо:

$$P_i = 1 - \prod_j (1 - P_{ij}), \quad (2.8.)$$

Ввівши коефіцієнт сили, отримуємо остаточний вираз для аналізованого алгоритму, який надалі пропонується називати інверсним:

$$P_i = 1 - \prod_j (1 - S_j \cdot P_{ij}), \quad (2.9.)$$

Необхідно відзначити, що даний підхід повністю застосовний для описаних вище випадків одночасного діагностування кількох несправностей, оскільки сума умовних ймовірностей окремо взятої несправності може приймати будь-яке позитивне значення (R^+), не обов'язково дорівнює одиниці. Вірно і зворотне, тобто одна ознака здатна одночасно характеризувати кілька несправностей:

$$\begin{aligned} \sum_j P_{ij} &= R^+ \\ i &= \text{const} \\ \sum_i P_{ij} &= R^+ \\ j &= \text{const} \end{aligned}$$

2.4.3. Діалоговий режим пошуку несправностей

З метою подальшої розробки слід зазначити, що процес діагностування

має бути спрямований на виявлення несправностей із заданою точністю постановки діагнозу. Показник цієї точності називають довірчою ймовірністю $P_{\text{дов.}}$.

Якщо на першому етапі діагностування жодна з апостеріорних ймовірностей не досягла 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 мають найбільші апостеріорні ймовірності (далі пропонується назвати такі несправності превалюючими), що буде дозволяти:

- ❖ виявити найбільшу розбіжність умовних ймовірностей по кожному з не вибраних раніше ознак;

- ❖ відкинути нульові умовні ймовірності i , відповідно, ознаки, які не мають інформативності 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 превалюючих. З метою запобігання програмним помилкам є сенс примусово обмежити максимальну кількість превалюючих несправностей, наприклад, числом 15.

2. Усі умовні ймовірності кожної з превалюючих несправностей вносяться в проміжну таблицю, у своїй відкидаються вже обрані користувачем ознаки.

3. По кожному з ознак, що залишилися, обчислюється середнє значення умовних ймовірностей і максимальне відносне відхилення від нього. Саме собою відхилення у чистому вигляді має вираз:

$$\Delta_{\text{відн}}^{\text{відн}} = \frac{P_{\text{max}} \cdot N}{\sum_{i=1}^N P_{ij}} - 1, \quad (2.10.)$$

де N - кількість розглянутих превалюючих несправностей,

P_{max} - максимальна умовна ймовірність для поточної ознаки.

Проаналізувавши цей вираз, можна зазначити, що за наявності єдиної P_{ij} для будь-якої ознаки (ознак), $\Delta_{max}^{відн}$ буде однаковим для кожної ознаки, що має одну P_{ij} незалежно від значення умовної ймовірності.

Для обліку цього значення має сенс домножити вираз 2.10. на P_{max} :

$$\Delta_{max}^{відн} = P_{max} \left(\frac{P_{max} \cdot N}{\sum_{j=1}^N P_{ij}} - 1 \right), \quad (2.11.)$$

4. Ознаки з максимальними відносними відхиленнями більш інформативними в поточних умовах, а отже, першочерговими для перевірки діалоговому режимі. Пропонується задіяти механізм, аналогічний відсіюванню превалюючих несправностей, тобто. використовувати граничне значення $0,5\Delta_{max}^{відн}$.

Результати розрахунку наведено у таблиці 2.3. За даними таблиці видно, що у заданих умовах найбільшу інформативність має ознаку «підвищений тиск у картері». Ця ознака і має бути запропонована користувачеві.

Таблиця 2.3.

Умовні ймовірності превалюючих несправностей та визначення інформативних ознак

Ознаки Несправності					
	Надмірна витрата олії	Перегрів дизельного двигуна	Підвищений тиск у картері	Нестійка робота двигуна	Нестача потужності
Додатковий опір у системі вентиляції картера	0,05	0	0,15	0	0
Додатковий опір у системі подачі палива	0	0	0	0,07	0,07
Забруднення повітряного фільтра	0,035	0,0175	0	0,0525	0,07
Середнє значення P_{ij}	0,02833	0,005833	0,05	0,04083	0,04667
$\Delta_{max}^{відн} \cdot 10^3$	38,24	35	300	50	34,99

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

2.4.4. Розпізнавання інформації від тестів та індикаторних показників експертною системою

Незважаючи на те, що діалоговий режим роботи розробляємої 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, пропонується використовувати якийсь алгоритм визначення оптимального індикаторного методу діагностування для поточних умов.

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

Визначення тестів, інформативних у поточних умовах, може бути реалізовано за тим самим алгоритмом, що й пошук превалюючих ознак, але з наступними відмінностями:

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

Отже, для продовження діагностування в подібних умовах необхідно розширити перелік переважних несправностей;

- ❖ Інформативність тестів для кожної несправності використовується в номінальному значенні, без множення на апіорну ймовірність, оскільки на момент переходу на індикаторне діагностування експертною системою вже відсіваються несправності, малоімовірні при заданих ознаках.

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

Також у 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 ступеню зношування об'єкта.

У застосуванні для ймовірнісного алгоритму роботи експертної системи Exsys показники значень діагностичних ознак можуть ставитися у відповідність величини ймовірності відповідності даного показника тієї чи іншої несправності. Незважаючи на відповідність законам розподілів, функції залежності $P_i(X_{Vi})$ (де P_i - ймовірність прояву несправності D_i при значенні X_{Vi} діагностичного показника V_i) не мають властивості $\int P_i dX_{Vi} = 1$.

Розглядаючи цей показник, представимо наведені в табл. 2.4. дані у вигляді графічної залежності ймовірності (фактично-- можливого ступеня) зносу P ЦПГ від величини витрати картерних газів q л/хв (рис. 2.3.). Приймемо, що значення допустимого зношування відповідає значенню ймовірності $P = 0,5$. Отримані графіки показують, що чутливість може відрізнятися щодо різних дизелів, але загалом форма залежностей схожа.

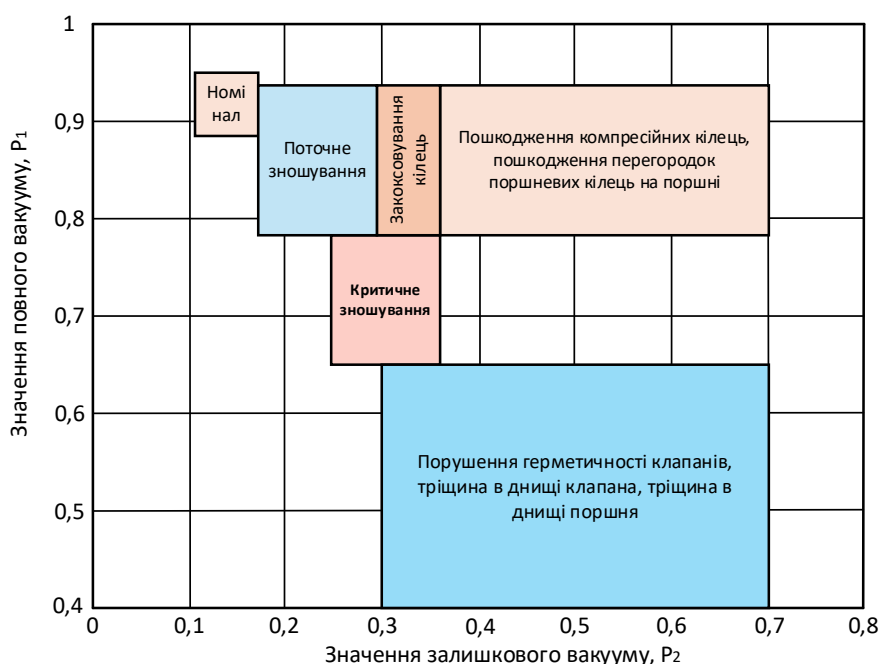


Рис. 2.2. Поля значень показників при вакуумній діагностиці дизельного двигуна, атм

Таблиця 2.4.

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

Марка зернозбирального комбайна	New Holland	Fendt	Massey Ferguson	John Deere	CLAAS	Case
Дизельний двигун	Fiat Powertrain Technologies	MAN 15.2	AGCO Power	PowerTech Plus	Mercedes-Benz	FPT/Cummins
Номінальне значення	60	30	50	30	30	40
Допустиме значення	120	50	120	70	50	70
Граничне значення	140	80	150	100	90	100

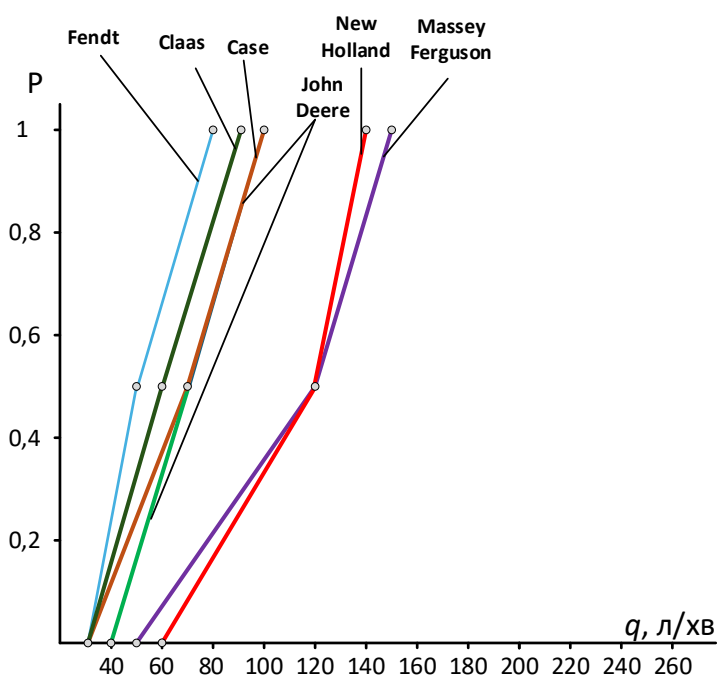


Рис. 2.3. Залежність можливого ступеня зношування ЦПГ від величини витрати картерних газів

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

Таким чином, завдання обліку даних діагностування під час роботи

експертної системи може бути вирішена введенням бази описаних вище залежностей для кожного з діагностуючих об'єктів.

Дані з бортових комп'ютерів сучасних комбайнів також можуть бути використані для потреб діагностування, але, як було зазначено раніше, діагностичний потенціал бортових комп'ютерів на даний момент дуже низький. Крім того, нерідкі несправності самих бортових комп'ютерів, що (разом з недоліками дилерської системи) часом призводить до простою техніки під час найінтенсивніших робіт.

2.5. Апаратно-програмний комплекс динамічного діагностування

У ході роботи, окрім експертної системи, розроблено низькобюджетний апаратно-програмний комплекс «ІМДЦ-2» діагностування за показниками частоти та прискорення обертання колінчастого валу. Назва приладу є безпосереднім посиланням на початкову версію діагностичного приладу ІМД-Ц, розглянутого в розділі 1.

Прошивка мікроконтролера - Використана для аналого-цифрового перетворювача (АЦП) плата Arduino Nano вимагає для виконання заданої роботи запису мікропрограми в енергонезалежну пам'ять. Застосована мікропрограма має такий алгоритм:

1. відлік кількості мікросекунд, що пройшли з моменту ввімкнення пристрою до появи сигналу від датчика Холла;
2. очікування наступного спрацювання датчика Холла;
3. визначення кількості мікросекунд, що відповідає одному оберту колінчастого валу;
4. надсилання отриманого числа у віртуальний COM-порт, відкритий шляхом з'єднання з комп'ютером через кабель USB.

Мікропрограма прошивки написана мовою C/C++ серед Arduino IDE.

Програма-інтерпретатор для ПК - Дані, що надходять від АЦП, інтерпретуються комп'ютером з наступним відображенням: поточної частоти обертання колінчастого валу, його поточного кутового прискорення,

прискорення розгону в точці початку дії регулятора, ефективної потужності дизельного двигуна. Для цього реалізується наступний послідовний алгоритм:

1. Значення періоду одного обороту колінчастого валу в мікросекундах, що надходять на вхід віртуального СОМ-порту:

$$\mu_2 < k_\phi \cdot \mu_1 \Rightarrow \mu_2 = 2\mu_1 - \mu_0 \quad (2.12.)$$

де μ_0 , μ_1 та μ_2 - значення мікросекунд, розташовані в порядку надходження;

k_ϕ - коефіцієнт фільтрації, що підбирається емпірично.

2. Визначається частота обертання колінчастого валу, хв-1:

$$n = \frac{60 \cdot 10^6}{N_m \cdot \mu}, \quad (2.13.)$$

де N_m - кількість магнітів на диску відмітника (або інших поділів при іншій конструкції відмітника та датчика).

3. Обчислюється кутове прискорення, рад/с²:

$$\varepsilon = 2\pi \cdot 10^6 \frac{10^6/\mu_2 - 10^6/\mu_1}{\mu_2 N_m} \quad (2.14.)$$

Здається, нераціональність формули обґрунтована особливостями числових обчислень комп'ютера і створена штучно підвищення точності кінцевого результату.

4. При розгоні виробляється лінійна інтерполяція значень ε :

$$n_1 > n_0 \wedge n_0 \leq n_p \wedge n_1 \geq n_p \Rightarrow \varepsilon_p = \frac{\varepsilon_0 n_1 - \varepsilon_1 n_0 + n_p (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{n_1 - n_0}, \quad (2.15.)$$

де $n_0, n_1; \varepsilon_0, \varepsilon_1$ - послідовні значення відповідно ε і n ;

n_p - частота обертання, що відповідає початку дії регулятора,

ε_p - Шукане значення прискорення розгону при частоті n_p .

5. Після отримання п'яти значень ε_p визначається середнє значення $\bar{\varepsilon}_p$.

6. $\bar{\varepsilon}_p$ перетворюється на значення ефективної потужності N_e , кВт:

$$N_e = \alpha + b\bar{\varepsilon}_p + c\bar{\varepsilon}_p^2 \quad (2.16.)$$

де α, b, c - коефіцієнти, що встановлюються для кожного типу двигуна. Значення даних коефіцієнтів були отримані шляхом апроксимації наведених у ньому номограм.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Формування баз даних експертної системи

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

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

Фрагмент матриці первинних умовних ймовірностей наведено в таблиці 4.1. Крім p_{ij} , до нього включені апріорні ймовірності прояву тієї чи іншої несправності. У свою чергу, умовні ймовірності P_{ij} утворюються за допомогою перемноження p_{ij} за заданих S_j і D_i та апріорної ймовірності P_a заданої D_i .

3.1.1. Визначення умовних ймовірностей експертним методом

Формування матриць первинних умовних ймовірностей експертним методом засноване на послідовному аналізі кожної з несправностей, що відповідають конкретному типу об'єкта, з наступним зіставленням ряду ознак.

Шаблон матриці первинних умовних ймовірностей представлений у табл. 3.1.

Формування подібних матриць здійснюється за наступним алгоритмом:

1. Вказати список несправностей для конкретного об'єкта; Список ознак використовується загальний.
2. Для кожної несправності розглянути кожну з ознак та вказати

ймовірну ймовірність його спостереження при вибраній 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. Апріорні можливості визначити з літератури чи користуватися даними, отриманими від фахівців, мають досвід експлуатації об'єкта (інженери, трактористи, механіки, водії, тощо. буд.).

4. Після завершення заповнення матриці відкинути несправності та ознаки, які не отримали хоча б однієї первинних умовних ймовірностей.

3.1.2. Емпіричний метод формування матриць первинних умовних ймовірностей

Оскільки експертна система з визначення має елементи штучного інтелекту, їй має бути властива властивість учня, що здатне значно підвищити точність постановки діагнозу.

У цій ситуації емпіричний алгоритм побудови таблиць умовних ймовірностей досить очевидний. При виявленні несправності з-поміж тих, що входять до бази даних ЕС, необхідно розглянути список наявних у цій базі ознак, і відзначити ті, що спостерігаються на даний момент. Якщо несправності чи ознаки у матриці немає, слід доповнити ними базу даних.

Подібні дані зберігаються у вигляді матриці, аналогічної до «осей» таблиці 2.2., але з тими відмінностями, що облік ведеться у натуральних

числах і кожен розглянутий випадок також додає одиницю до кількості спостережень тієї чи іншої несправності. Скориставшись даними таблиці 2.2., створимо штучно подібну базу даних у вигляді таблиці 3.2., прийнявши (для кратності рахунку) загальна кількість спостережень за кожною несправністю 20.

Таблиця 3.2.

Фрагмент бази даних спостережень за емпіричного методу

Ознака Несправність	Загальна кількість випадків	Надмірна витрата оливи	Перегрів дизеля	Підвищений тиск у картері	Нестійка робота двигуна	Нестача потужності
Додатковий опір у системі вентиляції картера	20	5	0	15	0	0
Додатковий опір у системі подачі палива	20	0	0	0	7	7
Додатковий опір у системі зливу зайвого палива в бак	20	0	0	0	1	0
Додатковий опір у впускній системі	20	5	1	0	7	6
Підвищений рівень оливи у двигуні	20	6	3	0	0	0
Забруднення повітряного фільтра	20	2	1	0	3	4

Позначимо кількість випадків спостереження ознаки S_j за несправності D_i як C_{ij} , а загальна кількість спостережень заданої несправності - $\sum C_i$. Тоді умовні ймовірності для заданих умов дорівнюватимуть:

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

Звертаючись за цією формулою до даних таблиці 3.2., можна перетворити її на вигляд таблиці 2.2. та підтвердити математичну правильність розробленого алгоритму.

Правильною корективною буде використання коефіцієнта сили S_i з урахуванням ознак емпіричного методу. При такому алгоритмі значення C_{ij} при реєстрації ознаки додають не одиницю, а 1 S_i . Кількість несправностей при цьому, як і раніше, визначається натуральним числом.

Емпіричний метод формування матриць первинних умовних ймовірностей вимагає досить тривалого часу роботи з експертною системою (порядку декількох років), тому в рамках цієї магістерської кваліфікаційної роботи його реалізація не описуватиметься.

Слід підкреслити, що в експертній системі Exsys є інтерфейс для введення даних експлуатації (в рамках емпіричного методу), який також може працювати як опитувальник і за експертного методу формування баз даних.

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

3.2. Методика вибору алгоритму розпізнавання індикаторних показників експертною системою

Як зазначено у розділі 2, використання індикаторних показників в експертній системі неможливе без попереднього внесення до неї даних про значення індикаторних показників, що відповідають тим чи іншим неполадкам.

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

1. Вибір вихідних даних з кількох (доцільно щонайменше п'яти) об'єктам шляхом аналізу літератури; результатом є таблиці, номограми, функціональні залежності. При цьому для номограм вибирають близько 10 точок, у яких значення абсциси та ординати читаються найчіткіше;

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

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

а. Введення даних кожного об'єкта в програмний комплекс апроксимації двовимірних полів точок (під час роботи над магістерською кваліфікаційною роботою використовувався функціонал програми TableCurve).

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 у загальну таблицю та аналіз її на співпадаючі елементи.

д. Аналіз декількох (достатня кількість - 5-7) функцій, що найчастіше зустрічаються, на точність за тим чи іншим критерієм.

е. Вибір двох функцій: найточнішої та найпростішої.

4. Отримання коефіцієнтів апроксимуючих рівнянь для вибраних функцій кожного 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 задати наступні обмеження:

$$\begin{aligned} P(x) < 0 &\rightarrow P_m(x) = 0 \\ 0 \leq P \leq 1 &\rightarrow P_m(x) = P(x) \\ P(x) > 1 &\rightarrow P_m(x) = 1 \end{aligned} \quad (3.2.)$$

3.3. Визначення інформативності індикаторних показників

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

1. Вибір еталонного діагностичного показника для заданої несправності, що дає точний діагноз щодо неї.

2. Підбір об'єкта діагностики, має задану несправність, чи методу її повноцінної імітації. В окремих випадках має сенс розглянути і ситуації, обернені до заданої несправності - наприклад, заходи підвищення

еталонного діагностичного показника у випадках, коли несправність веде до його зниження. Відповідно до положень теорії інженерного експерименту - цей метод відноситься до елементів повного факторного експерименту.

3. Вимірювання еталонного діагностичного показника в потрібних умовах.
4. Проведення діагностування досліджуваним індикаторним методом.
5. Порівняльний аналіз результатів діагностування.

3.3.1. Попереднє дослідження пульсацій картерних газів ДВЗ

Осцилограма пульсації тиску картерних газів показано на рис. 3.1. (нижній графік). Верхній графік - пульсації тиску паливної трубки, що застосовуються для синхронізації.

Відставання піків пульсацій картерних газів від піку індикаторної діаграми обумовлено інерційністю процесів, що відбуваються в ДВЗ, і великими паразитними об'ємами.

Як стверджується, величина пульсацій тиску картерних газів по циліндрах обернено пропорційна значенням компресії у відповідних циліндрах; відповідно, рівномірність пульсацій дозволяє судити про рівномірне зношування 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 пульсацій тиску, що говорить про необхідність інструментальної діагностики ДВЗ.

Недостатність відомостей про пульсації картерних газів у технічній літературі дає ґрунт для експериментального вивчення процесів прориву газів з надпоршневого простору в порожнину картера. Зокрема, цікавить встановити дійсний зв'язок значень компресії в циліндрах з амплітудами пульсацій картерних газів.

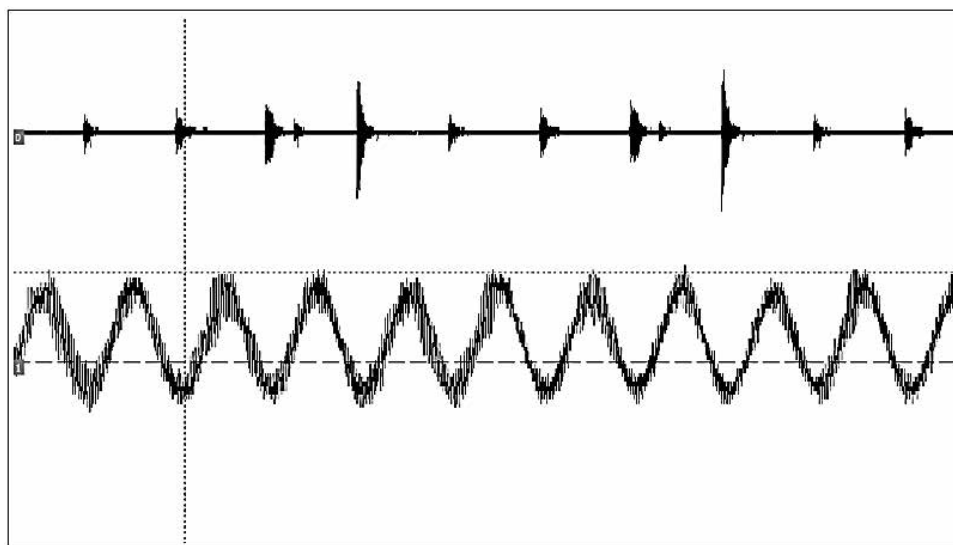


Рис. 3.1. Осцилограма пульсації тиску картерних газів у двигуні PowerTech Plus зернозбирального комбайна John Deere

Іншими словами, в ході експерименту потрібно підтвердити або спростувати гіпотезу про інформативність осцилограм пульсацій картерних газів для виявлення несправностей ЦПГ.

3.3.1.1. Експериментальне встановлення

При вимірі величини компресії проводилися на зернозбиральних комбайнах John Deere та Fendt.

Для виміру значень компресії скористаємося компресиметром для дизельних двигунів F06011 (рис. 3.3. а).



а)



б)

Рис. 3.2. Двигуни для експерименту зернозбиральних комбайнів:

а) John Deere; б) Fendt

Для осцилографування тиску картерних газів використовуємо комплекс MotoDoc III із штатними датчиками (рис. 3.3. б) підключений до ноутбука Acer Aspire One 722.

3.3.1.2. Методика дослідження осцилограми тиску картерних газів

Методика проведення експерименту включає:

1. Попередній експеримент зі зняття осцилограми тиску картерних газів двигунів зернозбиральних комбайнів.
2. Визначення величин компресії в циліндрах двигунів:



Рис. 3.3. Комплект приладів для експерименту з картерними газами двигунів зернозбиральних комбайнів

1. **Прогрів двигуна:** Двигун необхідно прогріти до робочої температури (80-90°C), оскільки це дозволяє зазорам та оливі набути робочих параметрів.
2. **Очищення:** Ретельно очистіть область навколо форсунок або свічок розжарювання, щоб уникнути потрапляння бруду в циліндри.
3. **Відключення паливоподачі:** Вимкніть подачу палива (перекрийте паливний клапан або знеструмте електромагнітний клапан ТНВД), щоб двигун не запустився під час перевірки.
4. **Демонтаж:** Зніміть форсунки або свічки розжарювання з усіх циліндрів.
5. **Акумулятор:** Переконайтеся, що акумулятор заряджений, а

стартер справний, оскільки потрібна висока швидкість прокручування (понад 200 об/хв).

Порядок вимірювання

1. **Встановлення компресиметра:** Вкрутіть або щільно притисніть наконечник компресиметра в отвір форсунки, або свічки розжарювання першого циліндра.
2. **Прокручування:** За допомогою стартера прокручуйте двигун протягом 5-10 секунд, поки показання манометра не перестануть рости.
3. **Фіксація результатів:** Запишіть свідчення манометра.
4. **Скидання:** Скиньте тиск на манометрі (натисніть клапан скидання).
5. **Повторення:** Повторіть процедуру для всіх інших циліндрів двигуна.

Налагодження комплексу MotoDoc III.

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

2. Зупинка двигуна, демонтаж перехідного пристрою та датчиків.

3. Аналіз отриманих результатів:

а. Відкриття збереженої осцилограми у графічному редакторі, пронумерування циліндрів відповідно до фазової прив'язки.

б. Порівняльний аналіз амплітуд піків осцилограми тиску картерних газів із показниками компресії по циліндрах.

3.3.2. Поглиблене вивчення пульсацій картерних газів

В ході попереднього експерименту отримані дані, що свідчать про низьку кореляцію амплітуд пульсацій картерних газів зі значеннями компресії циліндрів. Крім того, ряд джерел показують, що прорив картерних газів не є єдиним фактором, що впливає на параметри динамічного стану газового середовища в картері двигуна. Доведено, що важливу роль у формуванні пульсацій відіграють динамічне перетікання картерного газу та періодична зміна об'єму картера, викликана різницею швидкостей поршнів при русі до

ВМТ та від неї.

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

Методика досліджень осцилограми тиску картерних газів двигунів зернозбиральних комбайнів

Методика проведення експерименту включає:

1. Визначення компресійно-вакуумних показників у циліндрах двигуна:
 - a. Пуск двигуна, прогрівання до робочої температури, зупинка.
 - b. Вимкнення паливопроводів високого тиску, зняття форсунок.
 - c. Встановлюємо прилади компресійно-вакуумного діагностування в форсуночні отвори.
 - d. Прокручування колінчастого валу стартером на пускових обертах до отримання стабільних показань приладів
 - e. Реєстрація показань приладів.
 - f. Повторне встановлення приладів комплекту в інші циліндри.
 - g. Повторення пп.d.-f. для кожного циліндра.
 - h. Демонтаж приладів комплекту із двигуна.



Рис. 3.4. Прилади комплекту АГЦ: вакууметри Р1 та Р2

- i. Встановлення форсунок, підключення паливопроводів.

2. Запуск двигуна, прогрівання до робочої температури.
3. Встановити перехідний пристрій в олвозаливну горловину, датчика низького тиску - в ПУ.
4. Встановити датчик синхронізації на паливну трубку.
5. Налаштування комплексу MotoDoc III.
6. Зняття осцилограми пульсацій тиску картерних газів на обертах холостого ходу з фазовою прив'язкою до імпульсів паливної трубки, збереження на жорсткий диск. Осцилограма знімається у трьох варіантах:
 - зі знятою форсункою одного з циліндрів (з метою зниження тиску стиснення та, таким чином, прориву газів у картер);
 - з нещільно встановленою форсункою;
 - з форсункою, встановленою та працюючою штатно.
7. Зупинка двигуна, демонтаж перехідного пристрою та датчиків.
8. Аналіз отриманих результатів:
 - а. Відкриття збереженої осцилограми у графічному редакторі, пронумерування циліндрів відповідно до фазової прив'язки.
 - б. Порівняльний аналіз амплітуд піків осцилограми тиску картерних газів з компресійно-вакуумними показниками по циліндрах.

Імітація несправностей паливної системи низького тиску зернозбирального комбайну на лабораторному стенді

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

Під час експерименту слід оцінити інформативність осцилограм тиску палива (у різних точках паливної системи низького тиску) для діагностування СПНТ.

Експериментальне встановлення

Для проведення експерименту використовуємо дизельний двигун зернозбирального комбайну із наступними пристроями:

- Д1, Д2: регульовані дроселі;
- МВ: мановакууметр;

- **М:** манометр;
- **ТхК:** триходовий кран для перемикання показань манометра;
- **РТ:** датчик тиску НК3022, підключений до АЦП на базі мікроконтролера АТМega 168. Похибка вимірювання датчика становить 5%. Клас точності мановакууметра 1,5, манометра - 1.0.

Для вимірювання потужності дизеля в експерименті скористаємось приладом ІМД-Ц (рис. 3.5.).

Робота аналого-цифрового перетворювача схожа з приладом ІМДЦ-2: значення напруги, що отримуються від датчика, відправляються у віртуальний СОМ-порт комп'ютера, після чого інтерпретуються програмною оболонкою, що працює як цифровий осцилограф. Програма також написана мовою Delphi та використовує ті ж драйвери СОМ-порту, що й інтерпретатор ІМДЦ-2. Інтерфейс програми показано на рис. 3.8.

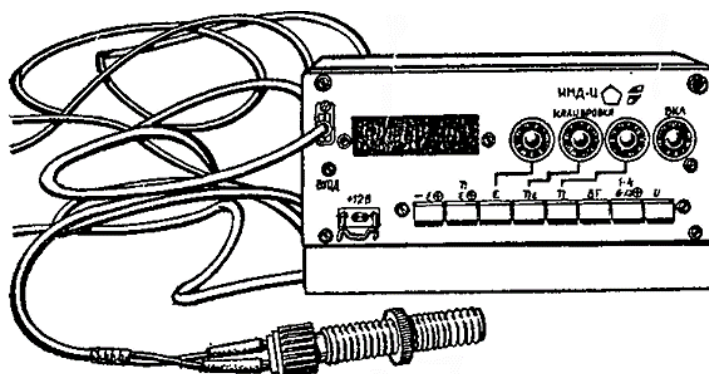


Рис. 3.5. Прилад ІМД-Ц

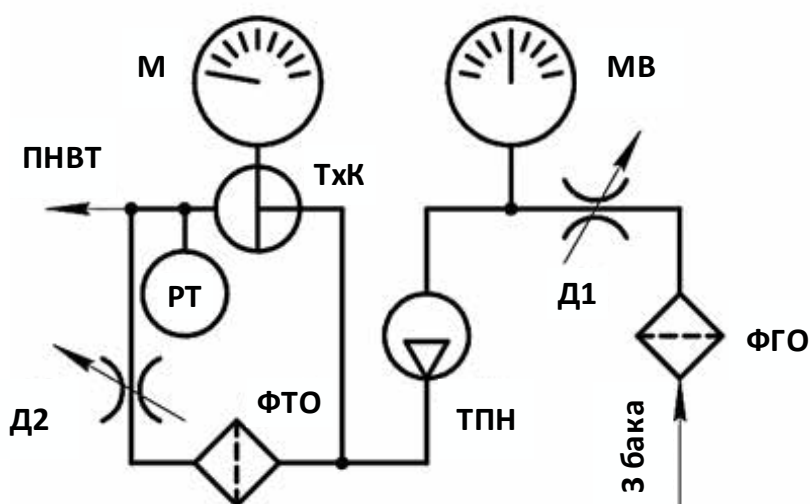


Рис. 3.6. Схема СПНТ експериментальної установки

Методика експериментального дослідження паливної системи низького тиску зернозбиральних комбайнів

1. Запуск двигуна, встановлення частоти обертів 1300 хв^{-1} , прогрів до робочої температури
2. Підключення роз'єму датчика тиску до АЦП, а АЦП - до комп'ютера, запуск програми-осцилографа
3. Вимірювання номінальних показників на режимі холостого ходу:



Загальний вигляд
експериментальної установки



АЦП та датчик тиску

Рис. 3.7. Експериментальна установка та її елементи

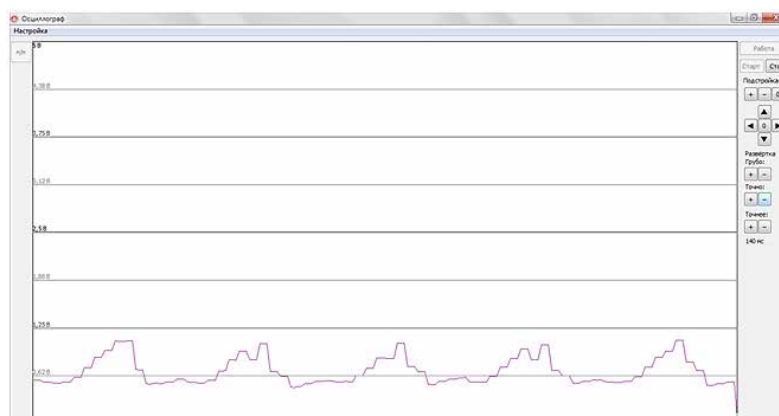


Рис. 3.8. Інтерфейс програми-осцилографа

- а. Зняття осцилограми пульсацій тиску в растровому та цифровому форматах;
- б. Визначення величин тиску наступних точках.
4. Імітація засміченості ФГО:
 - а. Триразове вимірювання прискорення вільного розгону приладом ІМД-Ц;

- b. Збільшення гідравлічного опору дроселя Д1;
- c. Витримка для стабілізації показань;
- d. Визначення величини тиску на виході ФГО;
- e. Триразове вимірювання прискорення вільного розгону приладом ІМД-Ц;
- f. Повторення пунктів b.-e. з великими значеннями опору дроселя Д1;
- g. Повернення дроселя Д1 у нейтральне положення.

Імітація засміченості ФТО:

Перевірка інформативності осцилограми тиску у впускному колекторі з виявлення розрегулювання клапанного механізму

В даний час стає досить поширеним твердження про те, що вид осцилограми абсолютного тиску у впускному колекторі ДВЗ з вільним впуском здатний дати уявлення про стан елементів механіки двигуна, зокрема теплових зазорів клапанного механізму.

Зміна зазорів у клапанному механізмі здатна викликати значне зміщення по ординаті описаних піків осцилограми.

Однак на досліджуваному дизельному двигуні зняття повітряного фільтра має досить високу трудомісткість, що суперечить принципам індикаторного діагностування, а саме експрес-режим вимірювань. Тому в рамках експерименту має сенс зробити досвід як зі знятим, так і з встановленим повітряним фільтром, але основним методом індикаторної діагностики в даному випадку будуть вимірювання з встановленим фільтром.

Експериментальне встановлення

Для зняття осцилограм використовуємо мотор-тестер MotoDoc III з датчиками низького тиску та пульсації паливної трубки (для синхронізації показань; датчик є п'єзометричним).

Налаштування теплових проміжків буде проводитися за допомогою віялового комплексу щупів 0,05-1 мм. Згідно з документацією, номінальна величина теплового зазору між клапанним коромислом і наполегливою

тарілкою клапана становить 0,25 мм як для впускних, так і для випускних клапанів.

3.4. Вивчення теплової похибки діагностування

Відомо, що для отримання точного результату діагностування ДВЗ необхідно проводити після його повного прогріву, тобто досягнення температури охолоджуючої рідини 60-80°C. Однак на практиці нерідкі ситуації, в яких повне прогрівання дизельного двигуна неможливе. Діагностування в подібних умовах даватиме невірні результати. Зниження кількості подібних помилок може бути досягнуто за допомогою обліку поправочних коефіцієнтів, одержуваних експериментально за єдиною методикою для кожного з діагностичних методів.

У цьому дослідженні розглянемо вплив температурних чинників на: прискорення вільного розгону дизельного двигуна, годинна витрата палива на різних оборотах холостого ходу.

Експериментальне встановлення

Які реєструвальні пристрої будуть використані:

1. Для визначення прискорення вільного розгону – прилад ІМД-Ц.
2. Витратомір палива DFM-100СК. Похибка вимірювання витрати палива у DFM-100СК становить менше 1%.

1.1.1 Для вимірювання температури блоку циліндрів – інфрачервоний пірометр PeakMeter PM6530B (рис. 3.10. Похибка вимірювання PM6530B становить $\pm 1,5\%$ та $\pm 2^\circ\text{C}$.

Методика вивчення теплової похибки діагностування

1. Запуск двигуна, встановлення частоти обертів холостого ходу 1100 хв⁻¹;
2. Вимірювання температури блоку циліндрів;



Рис. 3.9. Витратомір палива DFM-100CK



Рис. 3.10. Пірометр Peak Meter PM6530B

3. З мінімальною затримкою після попереднього пункту: - визначення прискорення вільного розгону;
4. Повторення пп. 2-3 з витримкою, що відповідає зростанню температури блоку циліндрів на 2-5°C. Повтор проводиться до повного прогріву дизельного двигуна;
5. Зупинка дизельного двигуна, охолодження до температури у приміщенні;
6. Запуск двигуна, встановлення частоти 800 хв⁻¹;
7. Реєстрація годинної витрати палива;
8. Вимірювання температури блоку циліндрів;
9. Повтор пп. 6-8 для 1200, 1600 та 2200 хв⁻¹;
10. Повторення пп. 6-9 до повного прогрівання дизельного двигуна;
11. Зупинка дизельного двигуна;
12. Аналіз отриманих результатів з отриманням коефіцієнтів приведення індикаторних даних до значень, що отримали за нормативних теплових показників.

3.5. Випробування комплексу ІМДЦ-2

Як і будь-який діагностичний прилад, ІМДЦ-2 вимагає проведення випробувань з метою визначення його дійсної точності та методів її підвищення.

Інтерфейс комплексу ІМДЦ-2 відображає: поточне значення обертів двигуна $n_{\text{дв.}}$, поточне значення кутового прискорення колінчастого валу, одиночні ε та середнє $\bar{\varepsilon}$ значення прискорення вільного розгону колінчастого валу, потужність двигуна.

У ході випробувань комплексу доцільно зробити виміри точності $n_{\text{дв.}}$, ε , $\bar{\varepsilon}$, частково - у порівнянні з ІМД-Ц як з більш точним приладом. Для порівняння використовуємо криві теплової похибки кутового прискорення вільного розгону, отримання яких описано у розділі 3.

Точність визначення частоти обертів двигуна будемо досліджувати на прикладі залежності $n_{\text{дв.}}$ від температури блоку циліндрів при незмінному положенні ручки керування подачею палива.

Експериментальне встановлення

Для експерименту буде використано дизельний двигун із встановленими комплектами приладів ІМД-Ц та ІМДЦ-2.

Апаратну частину комплексу ІМДЦ-2 показано на рис. 3.13. До її складу входять:

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП). В його основі лежить плата Arduino Nano на базі процесора ATmega 328, що є широко поширеною і має низьку вартість.

В ескізній версії приладу корпус виконаний з полістиролу та має дисплей, який використовувався для налагодження налаштувань приладу у процесі його тестування. По суті, в серійному компонуванні дисплей немає призначення, оскільки вся інформація відображається на екрані ПК. З цієї причини на дисплеї відображається повідомлення *Ready* про готовність приладу до вимірювань, яке в серійних версіях може бути замінене на індикацію світлодіодом з подальшою компактизацією АЦП.

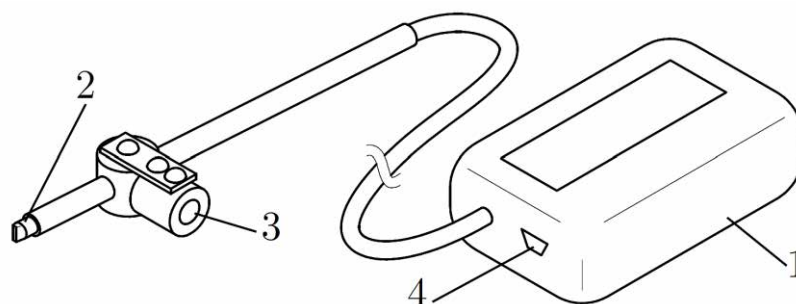


Рис. 3.11. Прилад ІМДЦ-2

На корпусі розташований роз'єм MicroUSB (4), який використовується для підключення до комп'ютера. Даний тип роз'єму є уніфікованим і одним із найпоширеніших.

2: датчик магнітного поля (на елементі Холла) TLE4935L. Передня сторона датчика промаркована білою фарбою. Датчик підключається до АЦП за допомогою екранованого кабелю і фіксується в трубці-подовжувачі за допомогою термоклею для демонтажу з метою ремонту. Трубка-подовжувач виконана з алюмінію, також може виготовлятися з іншого немагнітного матеріалу з метою виключення впливу магніту відмітника.

3: магнітне кріплення з чотирма ступенями свободи. Положення трубки фіксується гвинтом на головці кріплення, підібганою, у свою чергу, двома бічними гвинтами через пружинні шайби з метою створення опору обертанню. Магнітне кріплення може бути встановлене, наприклад, на рамі зернозбирального комбайна. Підстроювання кріплення здійснюється таким чином, щоб позначена фарбою сторона датчика була звернена до поміченої сторони магніту, встановленого в диску відмітника.

Відмітник: що виготовляється з полімерних листових матеріалів (наприклад, акрилове скло) диск, форма якого призначена для установки на торець шків колінчастого валу дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів. Зокрема, для дизельного двигуна John Deere диск має виріз (у формі гайки під ключ 32 мм), що запобігає провороту диска під час роботи дизельного двигуна. Магніт-відмітник встановлюється в просвердлений в диску отвір, при цьому створюючи силу, що притискає диск до шків.

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1. Визначення умовних ймовірностей експертним методом

Розглянемо рядково таблицю 4.1., теоретично обґрунтувавши вхідні до неї первинні ймовірності.

Додатковий опір у системі вентиляції картера з високою ймовірністю (тут 0,75) призведе до підвищення тиску газів у картері (залежно від характеру опору), а, отже, у деяких випадках (0,25) може спостерігатися надмірна витрата оливи, викликана його витіканням через ущільнення двигуна внаслідок підвищення тиску.

Додатковий опір у системі подачі палива здатне призвести як до нестійкої роботи двигуна, так і до нестачі його потужності внаслідок зменшення циклової подачі. Проте виявлятимуться дані ознаки будуть лише за значної величини опору.

Таблиця 4.1.

Фрагмент матриці первинних ймовірностей

Ознака Несправність	Апріорна ймовірність	Надмірна витрата оливи	Перегрів двигуна	Підвищений тиск у картері	Нестійка робота двигуна	Нестача потужності
Додатковий опір у системі вентиляції картера	0,2	0,25	0	0,75	0	0
Додатковий опір у системі подачі палива	0,2	0	0	0	0,35	0,35
Додатковий опір у системі зливу зайвого палива в бак	0,1	0	0	0	0,05	0
Додатковий опір у впускній системі	0,2	0,25	0,05	0	0,35	0,3
Підвищений рівень оливи у двигуні	0,15	0,3	0,15	0	0	0
Забруднення повітряного фільтра	0,35	0,1	0,05	0	0,15	0,2

Додатковий опір у системі зливу зайвого палива в бак є однією з найнешкідливіших несправностей і лише в деяких виняткових випадках може викликати нестійку роботу двигуна.

Додатковий опір у впускній системі, як правило, призводить до неповного згоряння палива в циліндрах - відповідно, може спричинити

нестійку роботу двигуна і нестачу потужності. Залежно від величини нестачі повітря може спостерігатися перевитрата палива, пов'язана з його втратами на неповне згоряння, які компенсує комбайнер, збільшуючи подачу палива. Залишки незгорілого в циліндрах палива можуть продовжувати згоряти поза циліндром, що здатне спричинити перегрів дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів.

Підвищений рівень оливи у двигуні може викликати його перевитрату як через нещільність з'єднань елементів двигуна, так і внаслідок його згоряння через потрапляння на стінки циліндра. Підвищений рівень оливи також здатний викликати утворення повітряно-оливної піни, внаслідок чого погіршиться якість змащування та охолодження елементів дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів, що призведе до його перегріву.

Забруднення повітряного фільтра є одним з окремих випадків додаткового опору у впускній системі, тому їх умовні ймовірності будуть приблизно пропорційні.

Наведені дані є виключно аналітичною оцінкою умовних ймовірностей. Зрозуміло, їхнє застосування не завжди здатне дати досить точні результати.

4.2. Вибір алгоритму розпізнавання індикаторних показників

У ході експерименту дослідна апроксимація проводилася згідно з вихідними даними та алгоритму. Дослідження здійснювалося за такою програмою:

1. Вихідні дані, отримані з нормативних матеріалів.
2. Приймаємо «Номінальне зношування» за ймовірність $P = 0$, «Допустим зношування» за $P = 0,5$ і «Граничне зношування» за $P = 1$. Представимо дані в табл. 4.2.
3. Вибір апроксимуючих рівнянь:
 - а. Для апроксимації використаний програмний комплекс

TableCurve 2D. Оскільки варіативність вибору апроксимуючих рівнянь у ньому дуже велика, пошук проводився за розділом Simple equations: «Прості рівняння»

б. Для кожного з досліджуваних дизельних двигунів отримано 10 апроксимуючих рівнянь, які відображені в (додаток Б). Проведено аналіз на збіг у рівнянь у різних стовпцях; рівняння, які мають збіги, відкинуті. При аналізі рівнянь замість ординати P , використовується y , тоді як і потім, що ймовірність $P(x)$ має границю області значень.

с. Найбільш поширені рівняння в кількості 6 шт. приведені до виду $y = f(x)$ та відображені у (додатку В). Також до списку додані рівняння $y = a + bx^2$, $y = a + bx^{0.5}$, $y = a + bx^3$. Точність апроксимації у програмному комплексі TableCurve відображається у вигляді коефіцієнта детермінації R^2 . Оскільки кількість точок мало, R^2 у разі приймає значення, близькі до одиниці, у таблиці точність відбивається як $1-R^2$; при цьому найменшому значенню $1-R^2$ відповідає найвища точність апроксимації.

д. Як «точна» функція обрана $y = e^{a+b/x^2}$, що має найбільший R^2 , як «просту» - $y = a + bx$, що має меншу точність. Штучно введені функції показали ще нижчу точність. Крім того, відкинута функцію $y = e^{a+b \ln x / x^2}$ як надмірно складну.

4. Для двох обраних функцій визначено коефіцієнти a та b для кожного дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів.

Таблиця 4.2.

Значення ймовірності зношування ЦПГ, співвіднесені з витратою картерних газів

Дизель	New Holland	Fendt	Massey Ferguson	John Deere	CLAAS	Case
	Витрата картерних газів, л/хв					
$P = 0$	90	72	65	31	25	28
$P = 0,5$	180	125	110	70	77	63
$P = 1$	260	180	160	100	110	80

У ході дослідження визначено загальні види функцій інтерпретації значень витрат картерних газів та індивідуальні коефіцієнти цих функцій кожного з розглянутих дизельних двигунів. Отримані дані можуть використовуватися в експертній системі з умовою обмеження їхньої області значень.

4.3. Визначення інформативності індикаторних показників

4.3.1. Попереднє дослідження пульсацій картерних газів ДВЗ

Підключення приладів

Підключення компресиметра та датчиків Motodoc III до двигунів зернозбиральних комбайнів.

Для проведення досліджень було виготовлено два перехідні пристрої (ПП), виконані на токарному верстаті з дерева, оскільки практика експлуатації ПП з полімерних твердих матеріалів показала нещільність їх прилягання до отвору оливозаливної горловини.

Хід експерименту

Результати експерименту

Отримані дані компресійно-вакуумного діагностування наведено у табл. 4.3.

Результати діагностування, згідно з діаграмою рис. 2.2., знаходяться для всіх циліндрів у межах допусків поточного зношування. При цьому в 1 і 2 циліндрах знижено значення повного вакууму, що свідчить про дещо збільшене зношування ЦПГ даних циліндрів.

Осцилограми тиску картерних газів, отримані в ході експерименту, показано на рис. 4.1.-4.2.

Для порівняльного аналізу накладемо один на одного осцилограми, зняті за умов, що найбільш відрізняються, а саме при номінальному режимі роботи і при демонтованій форсунці.

Порівняльний аналіз осцилограм показує деяке зниження значень тиску в картері за номінального режиму щодо роботи з однією демонтованою

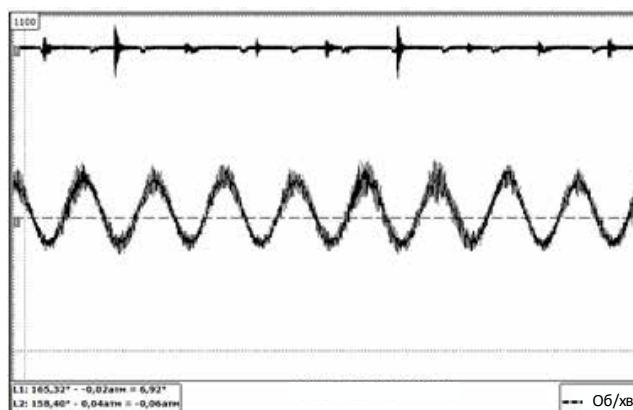
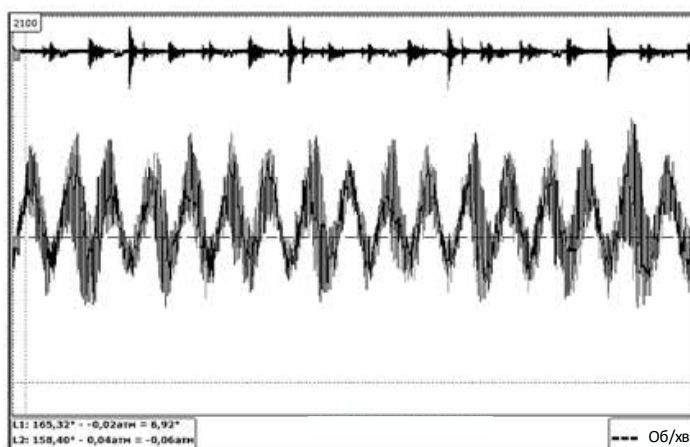
форсункою. Цей факт можна пояснити тим, що для досягнення однієї і тієї ж частоти обертання колінчастого валу при чотирьох працюючих циліндрах потрібна менша циліндрова потужність, а отже, і менший індикаторний тиск, що призводить до незначного зниження загального тиску картерних газів.

Таблиця 4.3.

Результати компресійно-вакуумного діагностування

Циліндр	Показники АГЦ, кгс/см ²		
	P_1	P_2	P_k
1	0,85	0,2	23
2	0,85	0,26	23
3	0,86	0,22	20
4	0,86	0,2	23

У свою чергу, цей тиск може змінюватись для одного і того ж дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів, залежно від стану системи вентиляції картера, у тому числі рециркуляційної.

Рис. 4.1. Осцилограма тиску картерних газів при 1100 хв⁻¹Рис. 4.2. Осцилограма тиску картерних газів при 2100 хв⁻¹

При розгляді осцилограм відзначимо факт наявності «шумів», що відрізняються за амплітудою, у верхній частині отриманої псевдосинусоїди. Однак найбільших амплітуд шуми досягають не в тих ділянках осцилограм, які, ймовірно, відповідають циліндрам з меншою щільністю ЦПГ.

З даних можна зробити висновок, що підтверджує результат попереднього експерименту - визначення зносу ЦПГ за параметрами пульсацій картерних газів або є неінформативним та недоцільним, або вимагає застосування більш точного та дорогого обладнання, економічна ефективність якого для даного методу перебуває під питанням. При цьому не слід виключати застосування даного методу для виявлення серйозніших несправностей ЦПГ (таких, як прогар поршня або поломка поршневих кілець), оскільки при них витік газів у картер, очевидно, збільшується на порядок.

4.3.2. Імітація несправностей паливної системи низького тиску на лабораторному стенді

Результати експерименту

В результаті експерименту були отримані наступні залежності:

- осцилограма відносного тиску палива на вході ПНВТ (рис. 4.3.)
- величини тиску палива у діагностичних точках на номінальному режимі (рис. 4.4.);
- характеристика тиску палива на виході ФГО та кутового прискорення вільного розгону на різних режимах (рис. 4.5.);
- те саме - для фільтра тонкого очищення (рис. 4.6.).

На осцилограмі тиску палива можна виділити дві гармонічні складові. Перша гармоніка, з нижчою частотою, формується роботою паливopідкачувального насоса. У свою чергу друга гармоніка утворюється за рахунок зниження тиску палива при його заборі плунжерними парами ПНВТ. Ймовірно, при зниженій з тих чи інших причин цикловій подачі амплітуда другої гармоніки, що відповідає несправній плунжерній парі, буде нижче -

відповідно, на амплітуді можна спостерігати менший «провал», ніж для інших.

На рис. 4.4. відображені коливання стрілок манометра та мановакуумметра. Червоний, верхній графік відображає максимальне положення стрілки; синій, нижній - мінімальний. Коливання тиску спричинені низкою причин, у тому числі роботою ПНВТ, що зазначено вище.

При зміні опору дроселів тиск палива знижується, що відображено у лівій частині рисунків 4.5. і 4.6. Різним величинам опору відповідають режими А, В і С. У номінальному режимі та режимі «А» спостерігається періодичне (1-2 с) переміщення стрілки манометра між двома коливальними режимами - з високим і низьким тиском. На відповідному фрагменті рис. 4.6. штриховими лініями показано область коливань низького тиску. Це явище викликано роботою перепускного клапана паливної системи. За високого опору ФТО перепускний клапан зберігає своє відкрите положення.

При зміні опору дроселів також знижується кутове прискорення розгону (права частина даних рисунків). Слід зазначити, що величина цього зниження невелика. Пояснюється це тим, що вимір потужності двигуна динамічним методом носить миттєвий характер - тому не встигає «виробитися» обсяг палива, запасений у паливопроводі від ФТО і порожнинах ПНВТ.

Тим не менш, значне зниження тиску палива (аж до розрідження) здатне викликати «паливне голодування» ПНВТ. У свою чергу, розрідження в рідинних середовищах нерідко призводить до кавітаційних процесів, здатних руйнувати вплив на елементи рідинних систем технічних об'єктів.

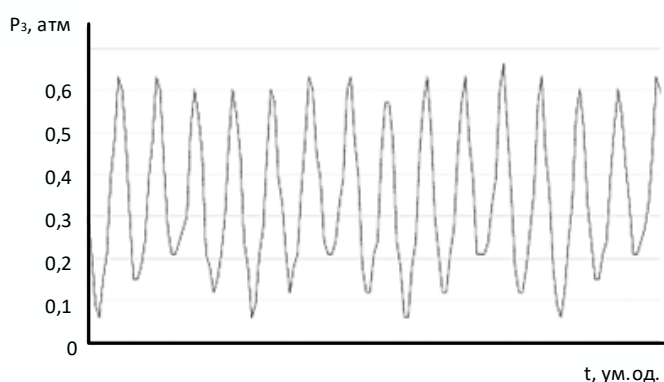


Рис. 4.3. Осцилограма тиску палива на вході ПНВТ

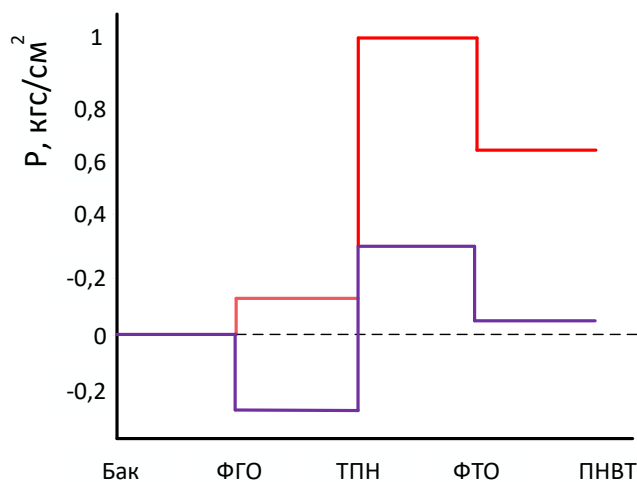


Рис. 4.4. Величини тиску палива в діагностичних точках на номінальному режимі

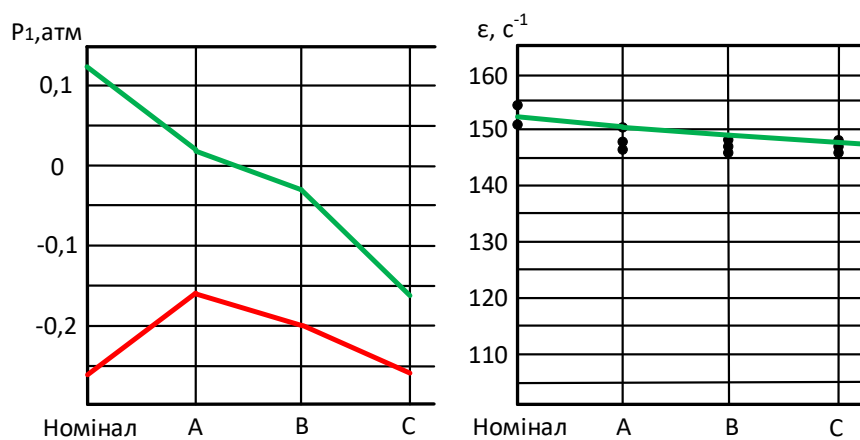


Рис. 4.5. - Характеристики двигуна при імітації засміченості ФГО

Узагальнивши отриману інформацію, можна зробити висновки про те, що використання датчика тиску палива на вході ПНВТ (нехай і низько бюджетного може бути корисним для виявлення наступних несправностей:

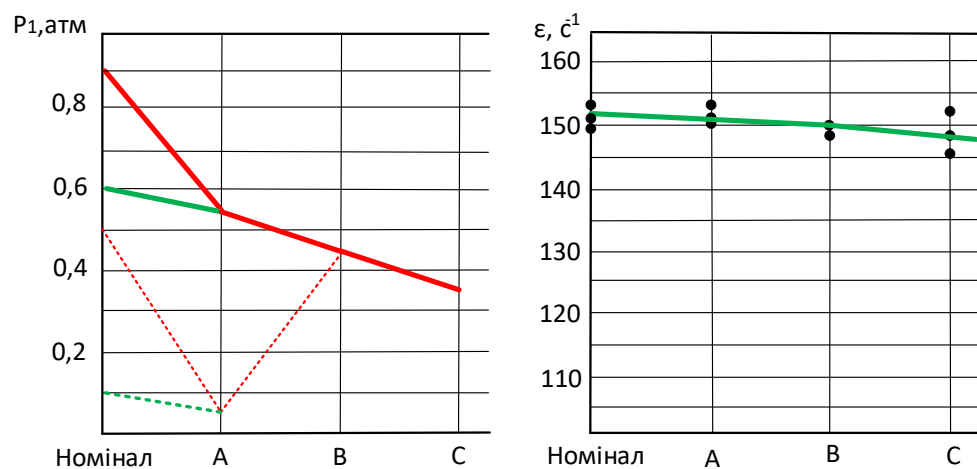


Рис. 4.6. Характеристики двигуна при імітації засміченості ФТО

- засмічення чи несправність паливних фільтрів як грубого, і тонкого очищення;
- підвищений опір паливопроводів, викликаний, наприклад, їх засміченням або деформацією;
- знижене циклове подання секцій ПНВТ.

Крім діагностичних функцій датчик здатний виконувати і моніторинг поточного стану СТНД комбайна при його роботі. Для цього може бути виготовлено найпростіший пристрій, що видає попереджувальний сигнал у разі ознак розрідження в паливоприводі.

4.4. Вивчення теплової похибки діагностування

Хід експерименту

1. Зняття залежності $\varepsilon = f(t)$ кутового прискорення вільного розгону колінчастого валу дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів від температури його блоку циліндрів
2. Охолодження дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів до температури навколишнього середовища
3. Зняття залежності $qT = f(n_d, T)$ годинної витрати палива від частоти обертання колінчастого валу та температури блоку циліндрів.

Результати експерименту

Отримані залежності відбито на графіках рис. 4.7. і 4.8.

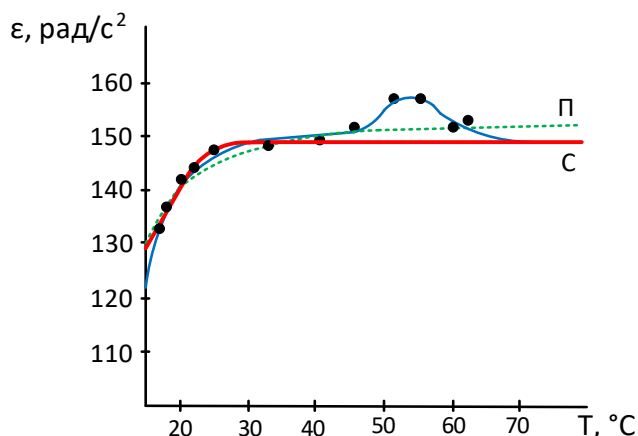


Рис. 4.7. Залежність кутового прискорення при розгоні колінчастого валу від температури двигуна, ІМД-Ц

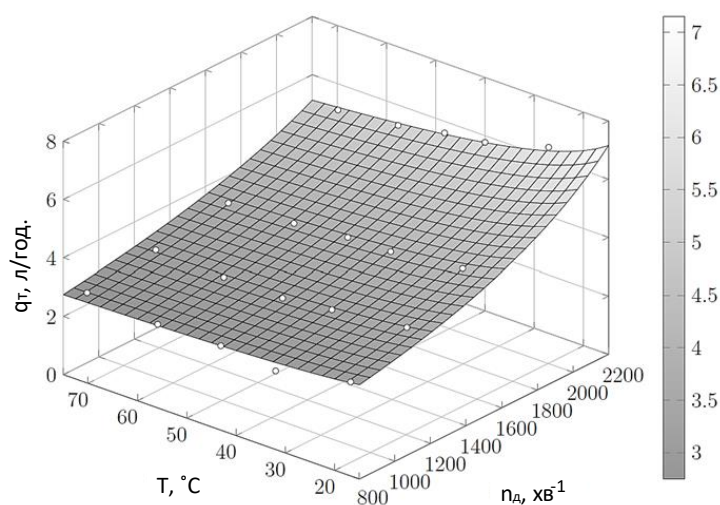


Рис. 4.8. Залежність витрати палива від оборотів та температури двигуна

Залежність $\varepsilon = f(t)$ є висхідною та асимптотичною. У діапазоні $T = 40 - 70^\circ\text{C}$ на ній спостерігається стрибок, який може бути пояснений нагріванням палива, сповільненням щодо нагрівання блоку циліндрів, що спричинено наявністю паразитного об'єму в паливній системі експериментальної установки. У свою чергу, меншій температурі палива відповідає його велика в'язкість, і, отже, велика циклова подача внаслідок менших витоків через нещільність плунжерних пар.

Апроксимація в програмному комплексі TableCurve 2D з відкиданням точок отриманого стрибка дозволила виразити залежність через «просту» та «складну» формули, позначені на рис. 4.7. як П і С відповідно:

$$\varepsilon = 152,7 - 4961T^{-2} \quad (4.1.)$$

$$\varepsilon = 1637 \ln(e^{0,3884T+0,007559} + 1133) - 1637 \ln(e^{0,3884T+1142}) + 136,6 \quad (4.2.)$$

Коефіцієнт детермінації R^2 для першого виразу дорівнює 0,9133, для другого 0,9907, що значно вище, але за рахунок ускладнення розрахункової формули.

Залежність $q_T = f(n_d, T)$ показує наростання витрати палива з підвищенням оборотів та зниження у міру прогріву двигуна. Дані факти є незаперечними, як і зростання потужності в міру прогріву дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів; інтерес тут також становить отримання апроксимуючого рівняння. З використанням TableCurve3D отримана наступна

залежність:

$$q_T = \frac{1}{0,2933 - 1,456 \cdot 10^5 \cdot n_d \cdot \ln n_d + 0,03436 \ln T}; \quad R^2 = 0,9873 \quad (4.3.)$$

З метою обліку теплових похибок діагностування знайдені залежності можуть бути приведені до відносного вигляду за такою формулою:

$$k_\varepsilon(T) = \frac{\varepsilon(T_{\text{номінал.}})}{\varepsilon(T)}, \quad (4.4.)$$

де $\varepsilon(T_{\text{номінал.}})$ - значення ε при номінальному тепловому режимі діагностування. Для залежності $q_T = f(n_d, T)$ отримуємо:

$$k_q(T, n_d) = \frac{q_{T_{\text{ном}}}(T_{\text{ном}}, n_{d_{\text{ном}}})}{q_T(T, n_d)}, \quad (4.5.)$$

Наведені залежності можуть бути виражені у вигляді таблиць, подібних табл. 4.6. Для знаходження значення діагностичного параметра, що відповідає нормативним умовам, необхідно помножити фактичне значення на табличний коефіцієнт, вибраний згідно з поточними умовами. Отримані залежності можуть бути використані для коригування теплових похибок діагностування за умов, що не дозволяють здійснити повне прогрівання двигуна. Незважаючи на те, що досягнення робочої температури ДВЗ, безперечно, є одним із пунктів діагностичного алгоритму, результати цього експерименту дозволяють скоротити витрати часу на діагностування.

Крім того, отримані подібним методом криві, імовірно, можуть використовуватися як самостійна діагностична інформація, і відхилення одержуваних на конкретному дизельному двигуні кривих від номінальних здатне бути ознакою тієї чи іншої несправності.

Таблиця 4.6.

Коефіцієнти для коригування теплових похибок діагностування

Для прискорення:

$T_i, ^\circ\text{C}$	15	20	25	30
$k_{\varepsilon i}$	1,218	1,054	1,017	1,007

Для витрат палива:

$T, ^\circ\text{C}$	20	25	30	35	40	50	60	70
$n_d = 800$	0,8699	0,8908	0,9079	0,9224	0,9349	0,9559	0,973	0,9875
$n_d = 1200$	0,8511	0,8751	0,8947	0,9112	0,9256	0,9495	0,9691	0,9857
$n_d = 1600$	0,8249	0,8531	0,8761	0,8956	0,9124	0,9406	0,9637	0,9831
$n_d = 2200$	0,7586	0,7975	0,8292	0,8561	0,8793	0,9182	0,9499	0,9768

4.5. Випробування комплексу ІМДЦ-2

Хід експерименту

1. Отримання за допомогою ІМДЦ-2 кривих вільного розгону двигуна.
2. Отримання за допомогою ІМДЦ-2 залежностей частоти обертання колінчастого валу двигуна від температури блоку циліндрів при постійному положенні ручки керування подачею палива
3. Зняття за допомогою ІМДЦ-2 залежності кутового прискорення вільного розгону колінчастого валу дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів від температури блоку циліндрів
4. Порівняння точності визначення середнього значення прискорення вільного розгону колінчастого валу приладами ІМД-Ц та ІМДЦ-2
5. Аналіз отриманих результатів

Результати випробувань

У режимі вільного розгону отримано криві, показані на графіках рис. 4.9. і 4.10.

Отримані криві дозволяють судити про те, що ІМДЦ-2 має деякий потенціал для діагностування, наприклад, регулятора частоти обертання за такими параметрами, як амплітуда перехідного процесу за частотою обертів та значення прискорень, які виникають при ньому. Також високу інформативність має залежність кутового прискорення розгону колінчастого валу від частоти обертання, форма якої може сприяти

локалізації несправностей механіки двигуна та його системи управління.

Для залежності частоти обертання колінчастого валу двигуна від температури блоку циліндрів отримано сімейство кривих, наведене на графіку рис. 4.9.

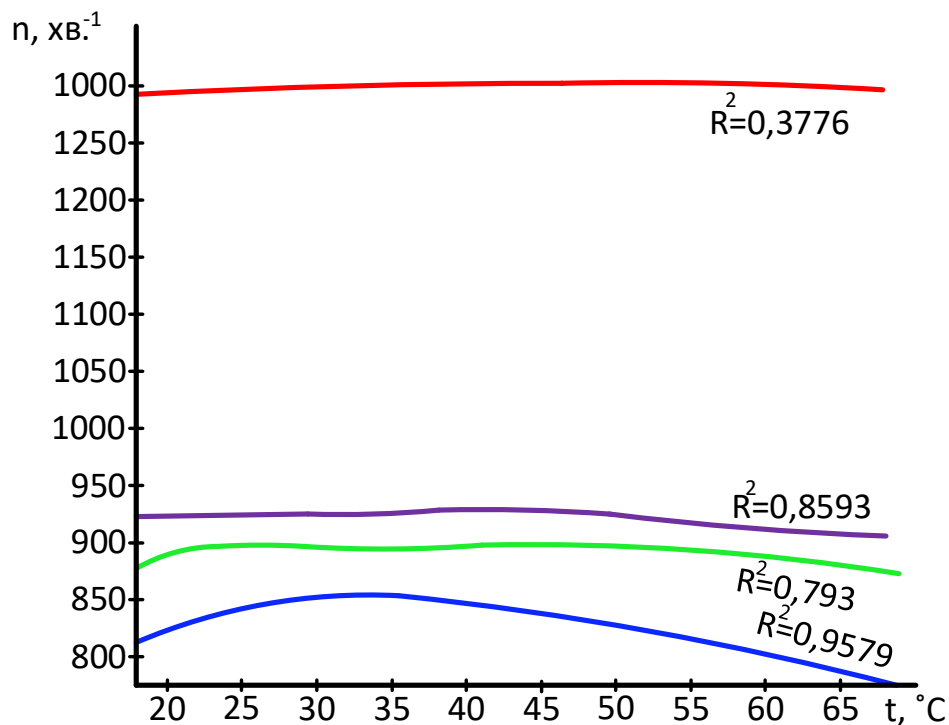


Рис. 4.9. Залежність обертів від температури двигуна, ІМДЦ-2

Як показано на графіках, коефіцієнти детермінації R^2 знаходяться в широкому діапазоні, приймаючи як високі (0,9579), так і низькі (0,3775) значення. Втім, оскільки маємо не завдання апроксимації отриманих кривих, а лише отримання приблизного уявлення про точність вимірювання частоти обертання колінчастого валу, низьким значенням коефіцієнтів детермінації можна знехтувати.

Відомо, що частота обертання колінчастого валу не може бути постійною навіть на короткому проміжку часу (у чому можна переконатися, спостерігаючи, наприклад, за стрілкою тахоспідометра), тому вважатимемо досягнуту точність вимірювання оборотів двигуна прийнятною для подібних умов.

Отримана за допомогою ІМДЦ-2 залежність кутового прискорення вільного розгону колінчастого валу від температури блоку циліндрів

показано на графіку рис. 4.10. Коефіцієнт детермінації для отриманих даних набуває значення 0,5405, що говорить про невисоку точність приладу ІМДЦ-2 для одиночних вимірів, тобто знижену стабільність його свідчень. Наприклад на графіці показані точки усереднених за кожним трьом суміжним значенням даних.

Повторний досвід за тих самих умов показав при апроксимації даних коефіцієнт детермінації, що дорівнює 0,1895, що ще раз підтверджує непридатність дослідної версії ІМДЦ-2 для одиничних вимірів.

Проаналізуємо відхилення експериментальних точок від апроксимуючої функції. Для цього визначимо середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{a i})^2}, \quad (4.6.)$$

де: $\varepsilon_{a i}$ - значення, що відповідають апроксимуючої функції:

n - кількість дослідних точок.

При розгляді всіх дослідних значень отримуємо значення СКО, що дорівнює 12,62. Насправді приймають граничне значення відхилень рівним 3σ . У поточних умовах $3\sigma = 37,86$, що становить 23,42% від встановленого значення.

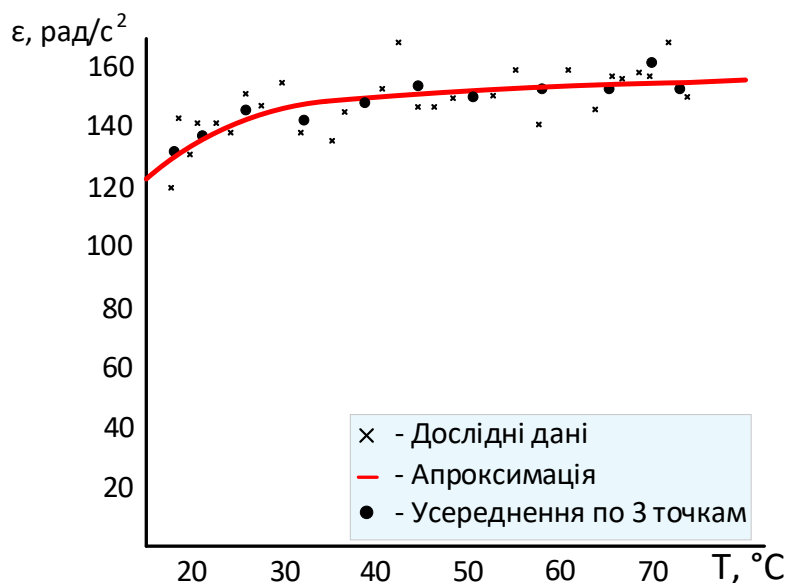


Рис. 4.10. Залежність кутового прискорення при розгоні колінчастого валу від температури двигуна, ІМДЦ-2

Аналіз усереднених точок з одержаним $3\sigma = 18,14$ (відповідно

11,22%) також дає розуміння того, що перша, експериментальна, реалізація ІМДЦ-2 недостатньо точна для наукових завдань, але може успішно застосовуватись у суто практичних цілях. У наступному етапі експерименту проведено порівняння ІМД-Ц і ІМДЦ-2 (на тепловому режимі роботи на встановлюємому двигуні) з метою обчислення зразкової похибки останнього.

За результатами п'яти вимірів рис. 4.11. модуль $|\Delta|$ відхилення середнього показника ε від аналогічного для ІМД-Ц становить близько 2%, причому ця помилка є статичною і, найімовірніше, пов'язана з неточністю налаштування самого ІМД-Ц, у той час як подібний фактор для ІМДЦ-2 повністю виключено.

Зменшення відсоткового значення похибки вимірювання порівняно з попереднім етапом експерименту, найімовірніше, пов'язане з виходом на тепловий встановлювальний режим.

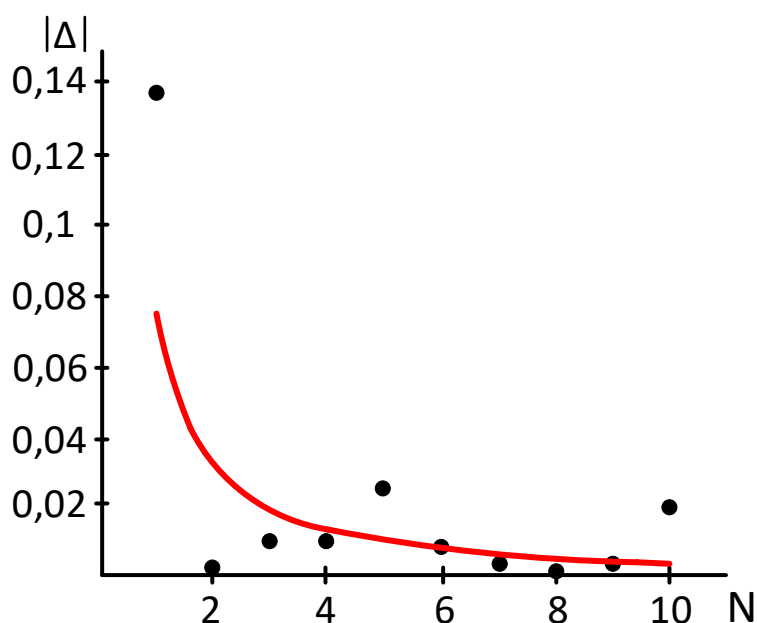


Рис. 4.11. Результати порівняння точності ІМДЦ-2 з ІМД-Ц

Визначити точність розробленого апаратно-програмного комплексу динамічного діагностування «ІМДЦ-2». Точність приладу недостатня для наукового застосування, але прийнятна для використання на підприємствах сервісу та рядовими власниками технічних засобів.

РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ СИСТЕМНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

5.1. Економічне обґрунтування ефективності системного діагностування

Розглянемо передбачуваний економічний ефект від деяких елементів системного діагностування для обслуговуючих підприємств сільського господарства.

У загальному вигляді економічний ефект за розглядаємий період, визначається як різниця сумарних витрат при старій E_0 і при новій E_1 технологіях. Як нову технологію розглянемо застосування комплексу ІМДЦ-2 з метою виявлення зниження потужності дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів, а для перевірки та регулювання форсунок без зняття їх з двигуна - механотестера паливної апаратури МТА-2.

Витрати на експлуатацію, ТО та ремонт зернозбиральних комбайнів складаються, у свою чергу, з великої кількості показників, яка при розрахунку може і повинна бути обмежена доцільним чином. Для цієї ситуації прийmemo до розрахунку такі фактори:

- вартість діагностичного обладнання $C_{\text{обл.}}$;
- витрати на заробітну платню діагностів;
- витрати на запасні частини та витратні матеріали;
- Витрати на паливо.

Основний алгоритм розрахунку представлений наступним рівнянням, вираженим щодо моторесурсу t , мото-год.

$$E_i(t) = C_{\text{обл. } i} + \sum_{i=0}^{n_{\text{Tp}}} \left(t \cdot (e_{\text{зарп.}i} + e_{\text{з.ч.м } i}) + \int_0^t e_{\text{пал } i}(t) dt \right), \quad (5.1.)$$

де:

n_{Tp} - загальна кількість тракторів для підприємства;

$e_{\text{зарп.}i}$ - питомі витрати на заробітну плату, що приведені до моторесурсу;

$e_{\text{з.ч.м } i}$ - питомі витрати на запасні частини та матеріали, приведені до

моторесурсу;

$e_{\text{пал } i}$ - Питомі витрати на паливо, що приведені до моторесурсу.

Строго кажучи, $e_{\text{зарп.}i}$ і $e_{\text{з.ч.м } i}$ в цій формулі також можуть перебувати під оператором інтеграла, однак у прийнятій математичній моделі прийнято припущення про сталість даних показників за часом, що зводить їх інтегрування до множення на t .

Вартість діагностичного обладнання для старої технології приймаємо рівної нулю, вважаючи, що стенди для випробування форсунок для підприємства вже є. Це припущення знижує теоретичне числове значення економічного ефекту, що є позитивним для розрахунку, оскільки допускає завищення розрахункового ефекту.

Для нової технології у вартість обладнання входять:

$c_{\text{МТА}}$ – кошти на закупівлю МТА-2 з комплектом перехідників та $c_{\text{ІМДЦ}}$ – кошти на закупівлю ІМДЦ-2 для кожного типу зернозбирального комбайна з їх загальної кількості $n_{\text{ТТ}}$. Отже, вартість обладнання для нової технології дорівнюватиме, грн.:

$$C_{\text{обл.}i} = c_{\text{МТА}} + n_{\text{ТТ}} \cdot c_{\text{ІМДЦ}} \quad (5.2.)$$

Витрати на заробітну плату діагностів розрахуємо за такою формулою:

$$e_{\text{зат. зп } i} = e_{\text{год.ст.}} \cdot \sum L_i f_i \quad (5.3.)$$

де: $e_{\text{год.ст.}}$ - годинна ставка оплати праці, грн.;

L_i - тривалість i -го виду діагностичних робіт, год;

f_i - Частота i -го виду діагностичних робіт, мото-год.⁻¹, приведена до моторесурсу.

Витрати на запасні частини та витратні матеріали складаються з вартості елементів двигуна, що замінюються при ТО і Р, і вартості витратних матеріалів, що використовуються при діагностуванні. Незважаючи на зазначене у розділі 1 недовикористання ресурсу замінних вузлів, приймемо припущення про те, що при новій технології витрати на запасні частини не знизяться, а залишаться колишніми. Цей факт, як і вище, попереджає

завищення розрахункового економічного ефекту.

Для регулювання форсунок на стенді (стара технологія) потрібне їхнє зняття з двигуна. При наступній установці в більшості випадків необхідна заміна мідних ущільнювальних шайб форсунок вартістю кожного комплекту c_m .

Спростивши формулу та вихідні дані, отримаємо приведені до моторесурсу витрати на запасні частини та матеріали для старої технології:

$$e_{з.ч.м} = c_m \cdot f_{ст.діагн.форс.}, \quad (5.4.)$$

де $f_{ст.діагн.форс.}$ - частота f_i для стендового діагностування форсунок, мото-год.⁻¹.

Витрати палива - є найбільшими з перерахованих витрат. Більше того, вони не статичні, а знаходяться в деякій зростаючій залежності від часу: цей ефект має назву прогресуючих паливних витрат. Прогресуючі витрати, зазвичай, бувають викликані несправностями форсунок; однак існують інші причини, пов'язані з порушенням режимів експлуатації та принципів обслуговування, неякісними ПММ, несправностями різних вузлів та систем дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів.

Відомо, що при експлуатації дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів з механічним упорскуванням його форсунки не тільки зношуються, а й розрегульовуються. Сумарно дані фактори призводять до підвищення витрат палива від номінального $q_{ном.}$ до деякої величини.

$$q_{\Sigma i} = q_{ном.} + q_{дод.}, \quad (5.5.)$$

де $q_{дод.}$ - додатковий, паразитний, витрата палива.

Зростання $q_{дод.}$ можна приблизно вважати лінійним. Встановимо, що при кожному налаштуванні форсунок дизельного двигуна зернозбиральних комбайнів $q_{дод.}$ стає рівним нулю.

Темп зростання додаткової витрати палива може бути обчислений як $q'_{дод.}/T_{пр.}$, де $q'_{дод.}$ визначається після періоду $T_{пр.}$ між поточними ремонтами.

Представимо сумарне значення витрати палива у вигляді виразу:

$$q_{\Sigma i} = q_{\text{ном.}} + q'_{\text{дод.}} \cdot \frac{\frac{t}{T_{\text{нал.}i}} - \left\lfloor \frac{t}{T_{\text{нал.}i}} \right\rfloor}{\frac{T_{\text{пр}}}{T_{\text{нал.}i}}}, \quad (5.6.)$$

де: $T_{\text{нал.}i}$ - періодичність налаштування форсунок,

$\left\lfloor \frac{t}{T_{\text{нал.}i}} \right\rfloor$ - Оператор відкидання дробової частини числа.

Графічно прогресуючі паливні витрати можуть бути схематично представлені як графік рис. 5.1. де q_0 - витрата палива з налаштуванням форсунок тільки при ТР; q_1 - відповідно з налаштуванням при ТО-2.

Паливні витрати визначаються як

$$e_{\text{пал.}} = q_{\Sigma} \cdot c_{\text{дт}}, \quad (5.7.)$$

де $c_{\text{дт}}$ – вартість 1 л дизельного палива, грн..

Підсумкове значення економічного ефекту визначимо, виходячи з перерахованих вище залежностей та заданих вихідних величин, табл. 5.1.

Відомо, що середнє річне напрацювання комбайнів становить 1000-1250 мото-годин. Прийнявши це значення рівним 1100 мото-год, отримуємо річні експлуатаційні витрати, грн.:

$$E_0(t = 1100) = 1248150 \text{ грн.};$$

$$E_1(t = 1100) = 1214000 \text{ грн.};$$

$$\Delta E = 341500 \text{ грн.}$$

Таким чином, навіть з урахуванням лише частини витрат, що змінюються, можливий річний економічний ефект у прийнятих умовах досягає 339000 грн., тобто термін окупності пропонованого обладнання знаходиться в межах двох місяців.

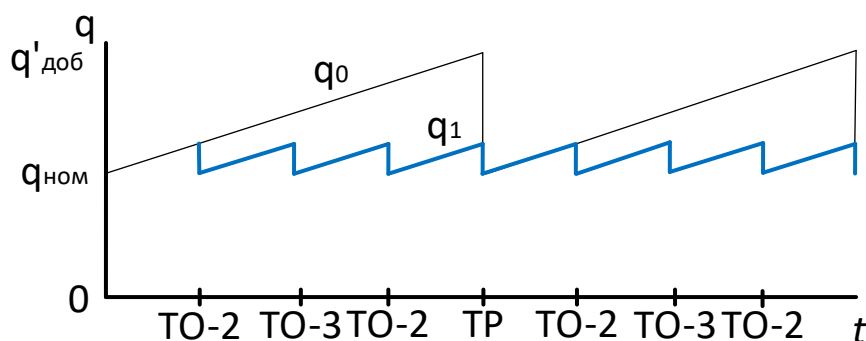


Рис. 5.1. Графічне подання прогресуючих витрат

Таблиця 5.1.

Вихідні дані щодо визначення економічного ефекту

Показник	Ум.позн.	Од. вим.	Стара технол.	Нова технол.
Кількість комбайнів на підприємстві			6	
Кількість типів комбайнів для підприємства			5	
Вартість механотестера МТА-2	$c_{\text{МТА}}$	Грн.		60000
Вартість комплексу ІМДЦ-2	$c_{\text{ІМДЦ}}$	Грн.		500
Годинна ставка оплати праці з урахуванням податків	$e_{\text{год.ст.}}$	Грн.	200	
Тривалість діагностування з МТА	$L_{\text{МТА}}$	Год.		0,5
Тривалість діагностування з ІМДЦ-2	$L_{\text{ІМДЦ}}$	Год.		0,1
Тривалість діагностування дизельних форсунок на стенді	$L_{\text{ст.діагн.фор}}$	Год.	1.5	
Частота діагностування з МТА	$f_{\text{МТА}}$	мото-год ₁		1/500
Частота діагностування з ІМДЦ-2	$f_{\text{ІМДЦ}}$	мото-год ₁		1/125
Частота діагностування дизельних форсунок на стенді	$f_{\text{ст.діагн.фор}}$	мото-год ₁	1/2000	
Вартість комплекту ущільнювальних шайб	$c_{\text{м}}$	Грн.	150	
Номінальна витрата палива	$q_{\text{ном.}}$	л/год	10	
Додаткова витрата палива на момент поточного ремонту	$q'_{\text{дод.}}$	л/год	2	
Період між поточними ремонтами	$T_{\text{пр}}$	мото-год	2000	
Періодичність налаштування форсунок	$T_{\text{нал.і}}$	мото-год	2000	500
Вартість дизельного палива	$c_{\text{дт}}$	Грн./л	75	
Річний наробіток		мото-год	1100	

ВИСНОВКИ

Проведена науково-дослідницька робота призвела до таких результатів:

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

2. Створено експертну систему (ЕС) технічного діагностування «Exsys» на відкритих базах, яка застосовується для широкого спектру технічних засобів агропромислового комплексу. Застосування відкритих баз дає широкий потенціал самонавчання системи; для цього в її складі є компонент, за допомогою якого оператор вносить до баз знань ЕС дані про виникаючі несправності. В системі також реалізовано облік зовнішніх факторів 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 прийнято.

3. Розроблено апаратно-програмний комплекс динамічного діагностування дизельних двигунів зернозбиральних комбайнів «ІМДЦ-2». Комплекс дозволяє визначати дійсну потужність двигуна з кутового прискорення колінчастого валу при розгоні. Крім того, за допомогою ІМДЦ-2 можуть бути отримані характеристики розгону та вибігу двигуна, що мають високу інформативність для діагностування. Застосована апаратна основа, є низькобюджетною, що дає можливість широкого застосування описаних розробок в рамках єдиної концепції системного діагностування.

4. Розроблено принципи синтезу 1 та 2 рівнів діагностування, у тому числі й методи представлення реалізовані на практиці.

5. Вперше для двигунів зернозбиральних комбайнів випробувано такі методи діагностування: аналіз пульсацій абсолютного тиску у впускному

колекторі, аналіз пульсацій картерних газів.

6. Проведено аналіз низки індикаторних методів діагностування на їх застосування для дизельних двигунів зернозбиральних комбайнів. Найбільш успішно показав себе аналіз осцилограм та показників тиску в різних точках паливної системи низького тиску.

7. Експериментальні дослідження проводилися на двигунах зернозбиральних комбайнів, використані методи застосовні і для сучасних двигунів з електронною системою керування, в тому числі інтегрованою в бортову систему. Розроблено підхід до застосування даних від бортових систем для діагностування спільно з індикаторними та іншими методами інтегрального характеру, що дозволяє при комплексному застосуванні досягти підвищення точності встановлення діагнозу.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yata V.K., Tiwari B.C., Ahmad, I. Nanoscience in food and agriculture: research, industries and patents. *Environmental Chemistry Letters*. 2018. Vol. 16. P. 79-84.
2. Masek J., Novak P., Jasinskas A. Evaluation of combine harvester operation costs in different working conditions. *Proceedings of 16th International Scientific Conference “Engineering for rural development”*. Jelgava, Latvia, May 24-26, 2017, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16. P. 1180-1185.
3. Роговський І. Л. Алгоритмічність визначення періодичності відновлення працездатності сільськогосподарських машин за ступенем витрат їх ресурсу. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. No 1. P. 155-162.
4. Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V. Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for Rural Development*. 2019. Vol. 18. P. 291-298.
5. Kalinichenko D., Rogovskii I. Decision for technical maintenance of combine harvesters in system of RCM. *MOTROL. An International Quarterly Journal on Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin. 2017. Vol. 19. No 3. P. 179-184.
6. Kalinichenko D., Rogovskii I. Modeling technology in centralized technical maintenance of combine harvesters. *ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. 2017. Lublin–Rzeszów. Vol. 17. No 3. P. 93-102.
7. Kalinichenko D., Rogovskii I. Method for determining time of next maintenance of combine harvesters. *ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. 2018. Lublin–Rzeszów. Vol. 18. No 1. P. 105-115.
8. Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л. Аналіз систем і стратегій технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів та їх складових частин.

Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2017. Вип. 258. С. 380–390.

9. Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л. Штучні когнітивні системи в процесах технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2017. Вип. 262. С. 353–361.

10. Rogovskii I. L. Probability of preventing loss of efficiency of agricultural machinery during exploitation. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2017. Вип. 258. С. 399–407.

11. Роговський І. Л. Методологічність виконання технологічних операцій відновлення працездатності сільськогосподарських машин при обмежених ресурсах. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2015. Вип. 212. Ч. 1. С. 314–322.

12. Rogovskii Ivan. Graph-modeling when the response and recovery of agricultural machinery. MOTROL. Lublin. 2016. Vol. 18. No 3. P. 155–164.

13. Роговський І. Л. Модель стохастичного процесу відновлення працездатності сільськогосподарської машини в безінерційних системах із запізненням. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research

14. Ahumada O., Villalobos J. R. Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products. International Journal of Production Economics. 2011. No 133. P. 677–687.

15. Ala-Risku T., Kärkkäinen M. Material delivery problems in construction projects: A possible solution, International Journal of Production Economics, Volume 104, Issue 1, 2006, 19–29.

16. Alphonse S., Etsibah K. Effective cargo and vehicle storage in distribution centers : a case study of Copenhagen Malmö. Port World Maritime University, Malmö, 2002, 113.

17. Aung M., Chang Y. Temperature management for the quality assurance of a perishable food supply chain. *Food Control*. Elsevier, 2014. 40. 198-207.
18. Загурський О.М. Аналіз ефективності транспортних процесів у ланцюгах постачань. *Машинобудування та енергетика*. 2018 Т. 9. № 4. 43-48.
19. Загурський О. М. Оцінка соціально-екологічної ефективності автотранспортних підприємств з урахуванням транзакційних витрат. *Менеджмент та підприємництво: тренди розвитку*, 2019, (07), 120-129.
20. Oleg Zagurskiy, Svitlana Rogach, Ivan Rogovskii, Liudmyla Titova, Tadeusz Pokusa «Green» supply chain as a path to sustainable development. Mechanisms of stimulation of socio-economic development of regions in conditions of transformation. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2019; ISBN 978-83-946765-7-5; pp. 199-213. pp. 330.
21. Oleg Zagurskiy, Tadeusz Pokusa, Svitlana Zagurska, Liudmyla Titova, Mikola Ohienko, Ivan Rogovskii, Alona Ohienko, Kateryna Razumova, Liudmyla Berezova. Current trends in development of transport and logistics systems of delivery of fast perishable foodstuffs. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2021; ISBN 978-83-66567-35-1; pp. 238, illus., tabs., bibls. https://www.wszia.opole.pl/wp-content/uploads/2020/05/Mon_Zagurskiy.pdf
22. Ivan Grygoryuk, Victor Teslyuk, Raisa Kovbasenko, Vasyl Kovbasenko, Mikola Ohienko, Jadwiga Ratajczak, Katarzyna Syrytczyk, Ivan Rogovskiy, Liudmyla Titova. Ecologization systems for protection of cultural plants. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2020; ISBN 978-83-66567-12-2; pp. 312. http://test.wszia.opole.pl/wp-content/uploads/2020/07/Monograph_Teslyuk.pdf
23. Матухно Н.В., Роговський І. Л. Тітова Л. Л. Синтез механізмів приводу висівних апаратів посівних машин. : монографія. Київ. АграрМедіаГруп. 2018. 356 с. ISBN 979-617-7397-44-3

24. Матухно Н.В., Роговський І. Л. Тітова Л. Л. Механіко-технологічні передумови розвитку технологій і комплексів зернозбиральних машин. : монографія. Київ. АграрМедіаГруп. 2018. 356 с. ISBN 979-619-7397-44-3

25. Матухно Н.В., Роговський І. Л. Тітова Л. Л. Синтез механізмів приводу висівних апаратів посівних машин. : монографія. Київ. АграрМедіаГруп. 2018. 356 с. ISBN 979-617-7397-44-3

26. Матухно Н.В., Роговський І. Л. Тітова Л. Л. Механіко-технологічні передумови розвитку технологій і комплексів зернозбиральних машин. : монографія. Київ. АграрМедіаГруп. 2018. 356 с. ISBN 979-619-7397-44-3

27. Ivan Rogovskii, Liudmyla Titova, Mikola Ohienko, Olga Snezhko, Oleksandr Nadtochiy, Ferdynand Raiss, Liudmyla Berezova. Methodology of engineering management of agrotechnics of grain production by agricultural enterprises. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2021; ISBN 978-83-66567-37-5; pp. 214, illus., tabs., bibls. https://www.wsia.opole.pl/wp-content/uploads/2020/09/Mon_Rogovskii.pdf

28. Iwona Mastowska, Józef Kaczmarek, Ivan Rogovskiy, Liudmyla Titova, Mikola Ohienko, Oleksandr Nadtochiy. Engineering management of agrotechnics of grain production by agricultural enterprises. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2020; ISBN 978-83-66567-11-5; pp. 180. https://www.wsia.opole.pl/wp-content/uploads/2020/07/Monograph_Rogovskii.pdf

29. Oleg Zagurskyi, Tadeusz Pokusa, Svitlana Zagurska, Liudmyla Titova, Mikola Ohienko, Ivan Rogovskii, Alona Ohienko, Kateryna Razumova, Liudmyla Berezova. Current trends in development of transport and logistics systems of delivery of fast perishable foodstuffs. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2021; ISBN 978-83-66567-35-1; pp. 238, illus., tabs., bibls. https://www.wsia.opole.pl/wp-content/uploads/2020/05/Mon_Zagurskyi.pdf

30. Ivan Grygoryuk, Victor Teslyuk, Raisa Kovbasenko, Vasyl Kovbasenko, Mikola Ohienko, Jadwiga Ratajczak, Katarzyna Syryczyk, Ivan Rogovskiy, Liudmyla Titova. Ecologization systems for protection of cultural plants. Monograph.

Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2020; ISBN 978-83-66567-12-2; pp. 312. http://test.wszia.opole.pl/wp-content/uploads/2020/07/Monograph_Teslyuk.pdf

31. Viatcheslav Loveikin, Yuriy Romasevych, Lyubov Shymko, Mikola Ohienko, Wojciech Duczmal, Witold Potwora, Ivan Rogovskiy, Liudmyla Titova. Agrotechnics and optimal control of cranes and hoisting machines. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2020; ISBN 978-83-66567-10-8; pp. 164. http://pedagogika.wszia.opole.pl/ebook/8_2020.pdf

32. O. Ye. Semenovskiy, L. L. Titova, O. V. Mykhniian. Hardness – volumetric characteristic of material Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2021, Vol. 12, No 4, P. 139-144 ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica

33. Тітова Л.Л., Г. Собчук Типологічність засобів технічного контролю фізіологічних і ергономічних показників машин для лісотехнічних робіт. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2022, Vol. 13, No 1, P. 40-48 ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.technicalscience.com.ua/uk/archive
<http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2022.01.040>

34. Д. М. Можарівський, Л. Л. Тітова, О. В. Надточій, П. Дасіч. Аспекти експертної системи інженерного менеджменту технічним станом зернозбиральних комбайнів. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2022, Vol. 13, No 1, P. 60-66 ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.technicalscience.com.ua/uk/archive
<http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2022.01.060>

35. Задорожнюк Д.В., Тітова Л.Л. МЕТОД СТРУКТУРНИХ СХЕМ ОЦІНЮВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ ГІДРОСИСТЕМ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Випуск 30(44). С. 55-62 [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30\(44\)-5](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-5)

36. Wacław Romaniuk, Andrzej Marczuk, Ivan Rogovskiy, Liudmyla Titova, Kinga Borek Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. *Agricultural Engineering* (wir.ptir.org). Krakow. Poland. 2018. Vol. 22. №1. P. 105—125. doi:10.1515/agriceng-2018-0010.

37. Oleksandr Nadtochiy, Liudmyla Titova. Optimal width of reapers combine harvesters. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. Lublin-Rzeszow. 2018. Vol. 18. No 1. P. 87—93.

38. Oleksandr Nadtochiy, Liudmyla Titova. Simulation of agricultural processes. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. Lublin-Rzeszow. 2018. Vol. 18. No 2. P. 55—62.

39. Oleksandr Nadtochiy, Liudmyla Titova. Analysis of multi-channel system of mass service with. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. Lublin-Rzeszow. 2018. Vol. 18. No 3. P. 11—18.

40. Liudmyla Titova. Simulation Models of Agricultural Processes. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. Lublin-Rzeszow. 2018. Vol. 18. No 3. P. 39—47.

41. I M Kuzmich, I. L. Rogovskii, L .L. Titova, O V Nadtochiy. Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2021 Vol 677. 052002 doi:10.1088/1755-1315/677/5/052002. Scopus. WoS. Q3.

42. Rogovskii, I. L, Titova L .L., Trokhaniak V.I., Borak K.V., Lavrinenko O.T., Bannyi O.O. Research on a grain cultiseeder for subsoil-broadcast sowing. *INMATEH. Agricultural Engineering*. 2021. Bucharest. Vol. 63. No 1. P. 385-396. DOI: 10.35633/INMATEH-63-39. Scopus. WoS

43. Rogovskii, I. L, Titova L .L., Gumenyuk Y.O.,

44. Nadtochiy O.V. Technological effectiveness of formation of planting furrow by working body of passive type of orchard planting machine. 5th International Scientific Conference on Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies, AGRITECH-V 2021 Krasnoyarsk 16 June 2021 до 19 June 2021 Код 172484

45. Rogovskii, I., Titova, L., Shatrov, R., Bannyi, O., Nadtochiy, O. Technological effectiveness of machine for digging seedlings in nursery grown on vegetative rootstocks. *Engineering for Rural Development*, 2022, 21, pp. 924–929

46. Waclaw Romaniuk, Ivan Rogovskii, Victor Polishchuk, Kinga Borek, Witold Jan Wardal, Serhiy Shvorov, Yevgen Dvornyk, Ihor Sivak, Semen Drahniev, Dmytro Derevjanko, Kamil Roman Study of Methane Fermentation of Cattle Manure in the Mesophilic Regime with the Addition of Crude Glycerine Energies 2022, 15(9), 3439; <https://doi.org/10.3390/en15093439>

47. Antonov A. I. (2011). Transient process in a two-dimensional extremal system in the presence of forbidden regions and a random search method. *Statistical optimization problems*. Riga: Zintane. 69-81.

48. Medvedev G. A., Ryzhakov A. P. (2011). On the application of random search algorithms in automatic optimization systems. *Statistical optimization problems*. Riga. Zintane. 81-92.

49. Rastrigin L. A., Ripa K. K. (2013). *Automatic theory of random search*. Riga. Zintane. 342.

50. Taev I. S., Egorov E. G., Gorshkov Yu. E., Popova E. P. (2011). Optimization of parameters of the electric apparatus arc-extinguishing chamber. *Moscow. Low voltage devices*. 1(92). 24-32.

ДОДАТКИ