НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
технічного сервісу та інженерного
менеджменту імені
М. П. Момотенка

_____ Іван РОГОВСЬКИЙ

«____» _____ 2025 р.

БАКАЛАВРАСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему «Розробка технології технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів у ФГ "Лілія" Київської області»_____

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор _____ Вячеслав БРАТІШКО
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

_____к.т.н., доц.____ _____ Євтушенко Володимир Дмитрович

Виконав _____ Плахотнюк Євген Миколайович

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
технічного сервісу та інженерного менеджменту
імені М. П. Момотенка
_____ Іван РОГОВСЬКИЙ
(підпис) (ПІБ)
«____» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту
_____ Плахотнюку Євгену Миколайовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 208 «Агроінженерія»_____
(код і назва)

Тема дипломного проєкту бакалавра «Розробка технології технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів у ФГ "Лілія" Київської області затверджена наказом ректора НУБіП України від «16» лютого 2026 р. № 510 «С»
Термін подання завершеної роботи на кафедру__20 травня 2026 року_____
(рік, місяць, число)
Вихідні дані до дипломного проекту бакалавра Матеріали первинного бухгалтерського обліку, нормативно-методичні матеріали, науково-технічна література_____
Перелік питань, які потрібно розробити:
1. Характеристика господарства «Ксаверівське "
2. Аналіз існуючих методів та засобів технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів._____
3. Розрахунок основних параметрів обслуговуючої майстерні_____
4. Конструктивна частина _____
5. Економічне обґрунтування проекту_____
6. Охорони праці_____

Перелік графічних документів: **електронна презентація на 14 слайдів**
Дата видачі завдання «06» січня 2026 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи _____ Євтушенко Володимир Дмитрович
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання Плахотнюк Євген Миколайович
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП……..……...……5
РОЗДІЛ 1. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ У СУЧАСНИХ УМОВАХ……9
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ СТРУКТУРА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ……...……13
РОЗДІЛ 3. ПРИНЦИП ТА ПРОЦЕС РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ……..……17
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБОВУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ……..…..26
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……..……...37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...……...……..38

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Аграрний сектор є однією з ключових галузей економіки України, забезпечуючи потреби внутрішнього ринку та значну частку експортної продукції. Вирощування та збирання зернових культур відіграє надзвичайно важливу роль у досягненні продовольчої безпеки країни. Основним засобом для механізованого збирання врожаю є зернозбиральний комбайн, який поєднує в собі низку технологічних операцій: зрізання, обмолот, очищення та транспортування зерна. Своєчасність і якість виконання цих процесів напряму залежать від технічного стану комбайна, що визначається ефективністю технічного обслуговування (ТО) та поточного ремонту (ПР).

Зернозбиральний комбайн є технічно складною машиною, що складається з великої кількості вузлів і агрегатів, які працюють у важких умовах: підвищене пилове навантаження, динамічні та вібраційні навантаження, тертя робочих органів. Інтенсивна експлуатація в умовах обмеженого часу (сезонність жнив) призводить до підвищеного зносу елементів комбайна, що вимагає високого рівня організації технічного обслуговування та оперативного поточного ремонту.

Застарілий технічний парк, недостатній рівень діагностики, низька кваліфікація обслуговуючого персоналу та відсутність інноваційних рішень у ТО та ПР значно знижують продуктивність аграрних підприємств. У сучасних умовах виникає необхідність підвищення ефективності процесів технічного обслуговування та ремонту зернозбиральних комбайнів для забезпечення безперебійної та продуктивної роботи машин у період жнив.

Актуальність дослідження обумовлена наступними чинниками:

Зношеність машинно-тракторного парку (МТП). Велика частка зернозбиральних комбайнів в Україні відпрацювала нормативні терміни експлуатації та потребує регулярного обслуговування і ремонту.

Сезонний характер навантаження. Високі вимоги до працездатності комбайнів у період жнив створюють необхідність оперативного виконання ТО і ПР.

Неефективна організація сервісного обслуговування. Багато сільськогосподарських підприємств не мають належної технічної бази та кваліфікованого персоналу для якісного технічного обслуговування.

Недостатнє впровадження сучасних методів діагностики та ремонту. Використання застарілих технологій не дозволяє виявляти та усувати несправності на ранніх етапах.

Висока вартість простоїв техніки. У разі виходу комбайна з ладу під час збирання врожаю підприємство зазнає значних фінансових втрат через недоотримання урожаю.

Таким чином, підвищення ефективності технічного обслуговування та поточного ремонту зернозбиральних комбайнів є важливим завданням, вирішення якого сприятиме зниженню простоїв техніки, підвищенню продуктивності машин та загальної ефективності аграрного виробництва.

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є підвищення ефективності технічного обслуговування та поточного ремонту зернозбиральних комбайнів шляхом удосконалення методів діагностики, організації сервісних процесів та впровадження інноваційних технологій.

Завдання дослідження:

- Провести аналіз сучасного стану технічного обслуговування та поточного ремонту зернозбиральних комбайнів;
- Визначити основні проблеми, що впливають на ефективність ТО та ПР;
- Обґрунтувати методи удосконалення організації процесів ТО і ПР;
- Дослідити можливість впровадження інноваційних технологій діагностики та ремонту комбайнів;

- Розробити рекомендації щодо оптимізації системи ТО та ПР на прикладі конкретних сільськогосподарських підприємств.

Об’єкт дослідження – процеси технічного обслуговування та поточного ремонту зернозбиральних комбайнів.

Предмет дослідження – методи, засоби та технології підвищення ефективності ТО і ПР комбайнів.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених завдань у дослідженні застосовуються наступні методи:

- Аналіз і синтез – для вивчення стану технічного обслуговування та ремонту комбайнів;
- Експериментальні дослідження – для оцінки ефективності впровадження нових методів діагностики;
- Статистичний аналіз – для виявлення закономірностей зношення та відмов робочих елементів комбайнів;
- Графоаналітичні методи – для наочного представлення результатів дослідження.

Наукова новизна дослідження. Наукова новизна полягає у розробці та обґрунтуванні методів підвищення ефективності технічного обслуговування та поточного ремонту зернозбиральних комбайнів шляхом оптимізації організаційно-технологічного процесу ТО і ПР.

Практичне значення дослідження полягає у впровадженні результатів у діяльність сільськогосподарських підприємств для підвищення працездатності зернозбиральних комбайнів, зниження витрат на ремонти, скорочення простоїв техніки та підвищення ефективності використання машинно-тракторного парку.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Потапчук Т. **Янченко О.** Використання засобів візуалізації тривимірних об'єктів віртуальної та доповненої реальності в АПК і системах технічного сервісу. Актуальні аспекти розвитку науки і освіти: збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників

та молодих науковців, 24 - 25 жовтня 2024 р., Одеса : Одеський державний аграрний університет, 2024. С. 175-178.

2. Дерев'янко Д. А., Потапчук Т. Ю., **Янченко О. О.** Теоретичне визначення відповідності віртуальної та реальної дійсності для оцінки продуктивності сільськогосподарської технічної одиниці. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 294-297.

3.Потачук Т.Ю., **Янченко О.О.** Аналіз наявних цифрових рішень для технічного сервісу мобільних енергетичних засобів. Студентські читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 23-25.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 20 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 35 сторінок комп'ютерного тексту, містить 10 рисунків та 3 таблиці.

РОЗДІЛ 1
СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ У СУЧАСНИХ УМОВАХ

1.1 Сучасний стан технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів

Зернозбиральні комбайни є ключовими елементами в аграрному секторі України та світу. Вони забезпечують своєчасне та ефективне збирання врожаю зернових культур, що напряму впливає на продуктивність агропідприємств. Проте стан технічного обслуговування цих машин залишається важливим аспектом, який визначає їхню ефективність, надійність та довговічність.

На сьогоднішній день технічний стан зернозбиральних комбайнів в Україні характеризується:

- великим зношенням парку техніки: середній вік зернозбиральних комбайнів становить 15-20 років, що значно перевищує термін їх ефективної експлуатації;
- низьким рівнем оновлення техніки: через фінансові обмеження аграрні підприємства часто використовують комбайни, які потребують інтенсивного технічного обслуговування;
- недостатньою якістю обслуговування: відсутність сучасних методів діагностики та кваліфікованих спеціалістів у сільськогосподарських регіонах негативно впливає на ефективність ТО;
- проблемою доступу до запасних частин: оригінальні запчастини мають високу вартість, що спонукає аграріїв використовувати неоригінальні аналоги.

Таким чином, нинішній стан технічного обслуговування потребує модернізації на всіх рівнях: від технологічних процесів до інфраструктурного забезпечення.

1.2 Основні проблеми технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів

Аналізуючи сучасний стан, можна виділити такі ключові проблеми в системі технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів:

- застаріла матеріально-технічна база: стан ремонтних майстерень не відповідає сучасним вимогам технічного обслуговування;
- дефіцит кваліфікованих кадрів: відсутність підготовлених фахівців для проведення високоякісного діагностування та ремонту;
- недостатнє використання сучасних технологій: обмежене впровадження цифрових рішень, таких як сенсорні системи діагностики, IoT (Інтернет речей), моніторинг у режимі реального часу;
- Сезонний характер навантаження: у період жнив навантаження на технічне обслуговування зростає в декілька разів, що створює ризики простоїв техніки;
- Проблеми з логістикою запасних частин: довготривалі терміни поставки запасних частин та їх вартість значно ускладнюють оперативне обслуговування.

1.3 Перспективи розвитку технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів

З огляду на наявні проблеми, розвиток технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів має відбуватися в таких напрямах:

- Впровадження інноваційних технологій.

Системи дистанційного моніторингу та діагностики: використання GPS, IoT-сенсорів та спеціального програмного забезпечення для автоматизованого діагностування технічного стану комбайнів.

Предиктивне обслуговування (Predictive Maintenance): аналіз зібраних даних для прогнозування можливих відмов та планування ремонтів заздалегідь.

Використання дронів та безпілотних технологій: для контролю якості обслуговування на великих агропідприємствах.

- Оновлення матеріально-технічної бази.

Створення сучасних ремонтно-обслуговуючих центрів з використанням автоматизованих стендів, сучасних інструментів та обладнання.

Модернізація існуючих майстерень для виконання ремонтних робіт у польових умовах.

- Підготовка та підвищення кваліфікації кадрів.

Організація навчальних програм та тренінгів для механіків з технічного обслуговування.

Співпраця з виробниками зернозбиральних комбайнів для підготовки фахівців з обслуговування нових моделей техніки.

- Інфраструктурний розвиток та логістика.

Оптимізація логістики постачання запасних частин та витратних матеріалів шляхом організації регіональних центрів обслуговування.

Створення мобільних сервісних бригад для швидкого обслуговування в польових умовах.

- Фінансова підтримка оновлення парку техніки.

Запровадження державних програм підтримки оновлення сільськогосподарської техніки.

Створення лізингових схем та програм кредитування для придбання сучасних комбайнів.

1.4 Висновки до розділу

Сучасний стан технічного обслуговування зернозбиральних комбайнів вимагає комплексного підходу до його модернізації. Основні перспективи розвитку полягають у впровадженні інноваційних технологій, оновленні інфраструктури обслуговування та підготовці кваліфікованих фахівців. Розвиток цієї галузі є критично важливим для забезпечення ефективності аграрного сектору України та досягнення високих показників урожайності.

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ СТРУКТУРА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

Комбінована система моніторингу несправностей комбайнів, що базується на комплексній експлуатації та технічному обслуговуванні, включала промисловий комп'ютер Senke SK-15GB, модуль збору даних Advantech (ADVANTECH) USB-4761, датчик швидкості SPH-318, датчик динамічного крутного моменту TYHC/Tianyu Hengchuang CYT-302, промисловий звуковий і світловий сигналізатор Hangya YS-BJ02, і т.п. Серед них датчик швидкості SPH-318 мав точність менше 1%, лінійність менше 0,1%, відстань виявлення 0,5…3 мм і частоту відгуку 10 кГц. Динамічний датчик крутного моменту мав точність ±0,3% в діапазоні температур навколишнього середовища -20~60 ◦C, діапазон крутного моменту 0~1000 Нм, частота відгуку 3 мс. Структура модуля діагностики та моніторингу несправностей зернозбирального комбайна показана на рис. 2.1.

Система діагностики несправностей комбайна в основному складалася з модуля збору даних і модуля діагностики несправностей. Зокрема, модуль збору даних в основному використовував датчики для збору інформації, такої як зміни швидкості і крутного моменту під час роботи комбайна, а також зберігав і обробляв зібрану інформацію; модуль діагностики несправностей в основному порівнював зібраний сигнал з нормальним сигналом шляхом вилучення характеристик сигналу, реалізовував автоматичну діагностику несправностей і виводив результат діагностики. Структура діагностики несправностей показана на рис. 2.2.

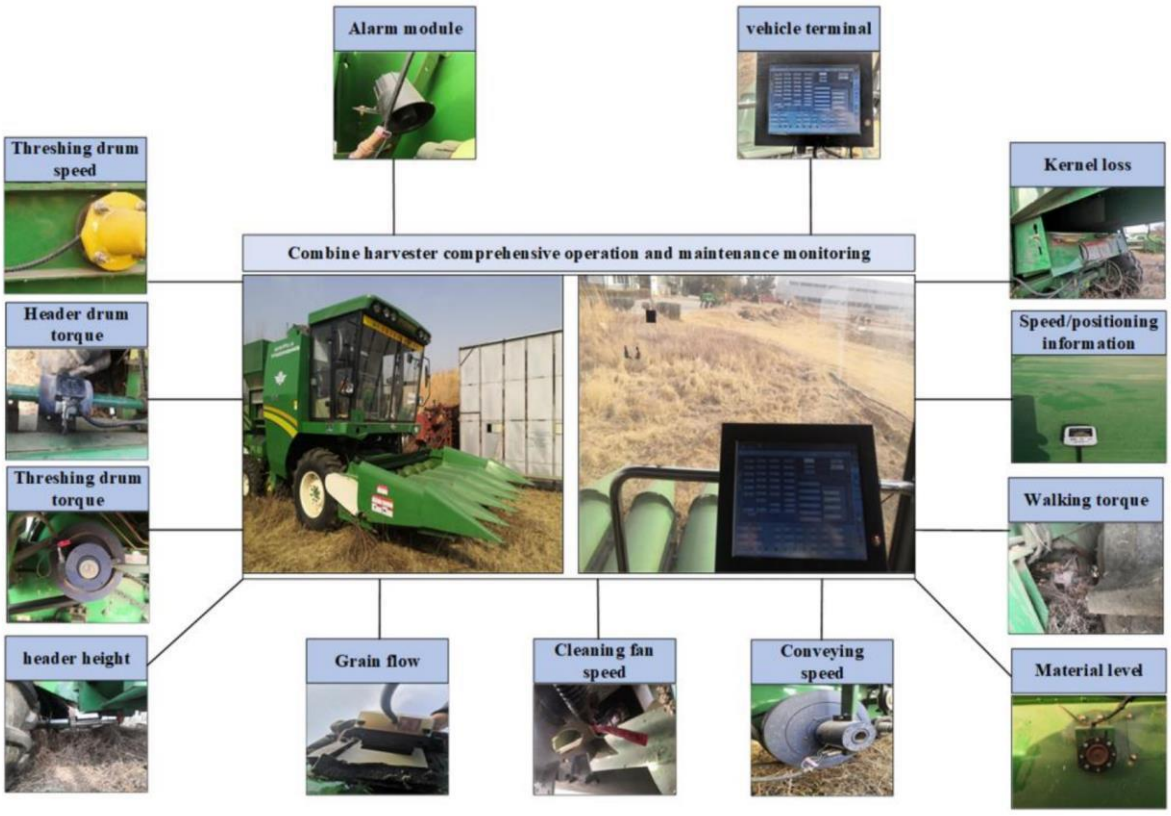


Рис. 2.1. Структура системи діагностики та моніторингу несправностей зернозбирального комбайна.

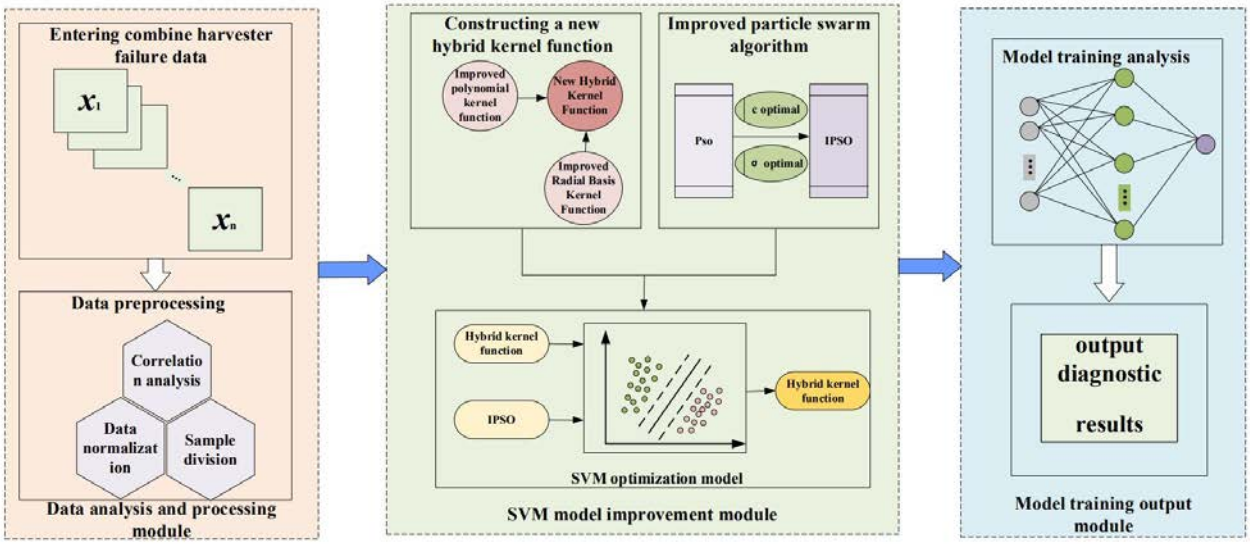


Рис. 2.2. Структурна схема діагностики несправностей зернозбирального комбайна.

Інформація про несправності є основою діагностики несправностей, а комплексна експлуатація та технічне обслуговування є метою діагностики

несправностей. Це включає в себе клієнт користувача сільськогосподарської техніки, сервер технічного персоналу, термінал транспортного засобу, збір та експлуатацію інформації, а також платформу технічного обслуговування.

Що стосується попиту на послуги, то користувачі сільськогосподарської техніки в основному використовують APP для надсилання запитів на технічне обслуговування, резервування планів технічного обслуговування та перевірки інструкцій з технічного обслуговування на платформі експлуатації та обслуговування. Обслуговуючий персонал – це технічні спеціалісти компаній, що надають послуги з експлуатації та технічного обслуговування сільськогосподарської техніки, які надають послуги з технічного обслуговування комбайнів за принципом "від дверей до дверей", а також отримують та надсилають інструкції з технічного обслуговування.

Як бортовий комп'ютер сільськогосподарської техніки, бортовий термінал може переглядати робочі параметри, інформацію про позиціонування та інформацію про в режимі реального часу. Інформація, зібрана на комбайні, використовується для моніторингу та відправки інформації про ключові компоненти комбайна за допомогою встановлення датчиків.

Комплексна платформа експлуатації та технічного обслуговування надає прикладні послуги постачальникам послуг, персоналу з експлуатації та технічного обслуговування, а також користувачам сільськогосподарської техніки на виробничих підприємствах у вигляді веб-додатків, доступ до яких можна отримати через браузери. Таким чином, інформація про експлуатацію та технічне обслуговування може бути отримана та надіслана сільськогосподарським користувачам та технічним спеціалістам керівництвом в режимі реального часу.

Модель діагностики несправностей є основою діагностики несправностей комбайнів. Зібрані дані моніторингу та дані про робочий стан кожного модуля комбайна визначаються за допомогою моделі діагностики несправностей для визначення типу несправності. Статистика інформації про несправності

використовується для реалізації взаємодії з користувачами системи управління експлуатацією та технічним обслуговуванням, реалізації функцій статистики інформації про несправності, управління, відображення, сигналізації тощо, а також для надання таких послуг, як статистика несправностей та запити. Загальна архітектура експлуатації та технічного обслуговування комбайна показана на рис. 2.3.

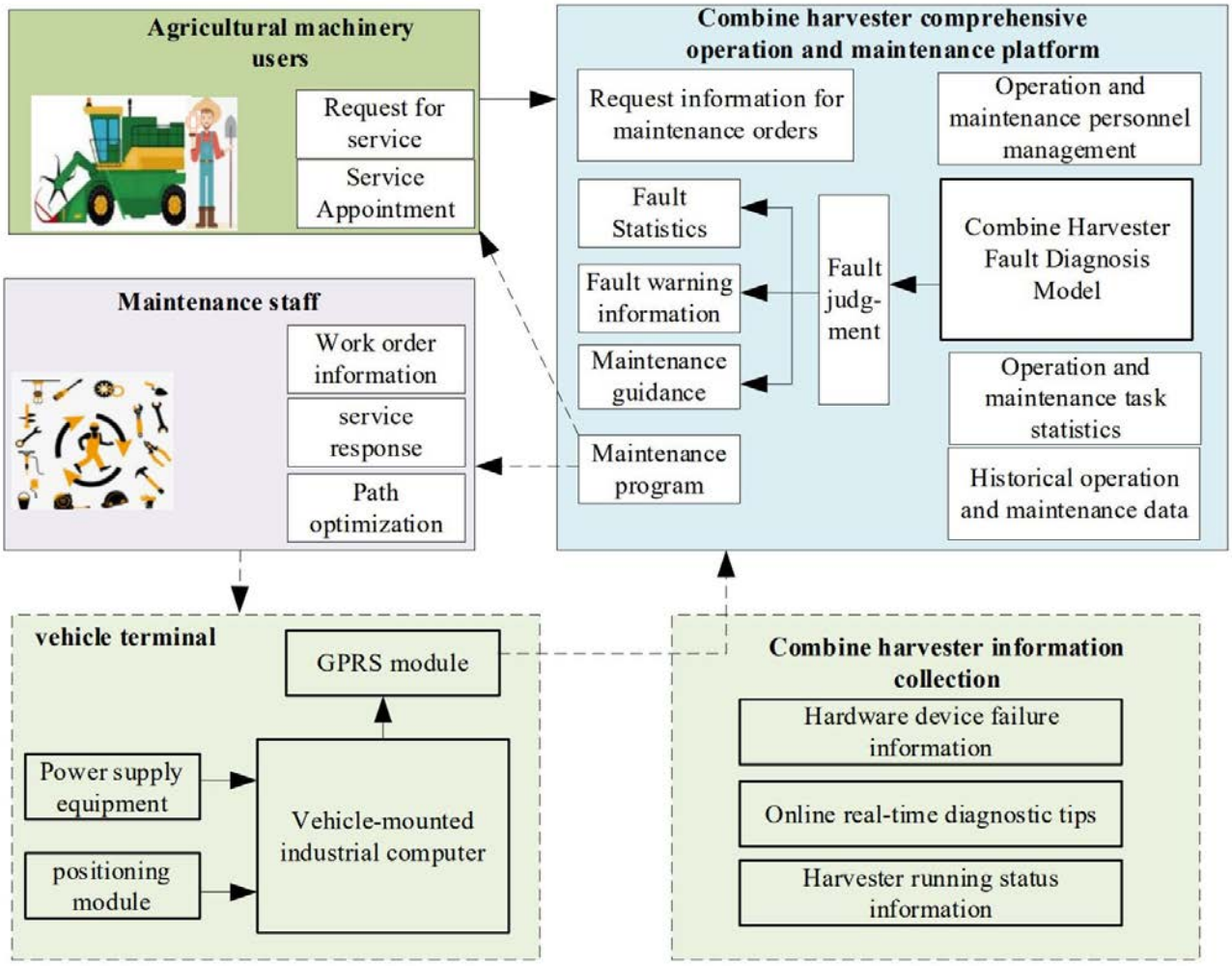


Рис. 2.3. Загальна схема експлуатації та обслуговування зернозбирального комбайна.

РОЗДІЛ 3

ПРИНЦИП ТА ПРОЦЕС РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ

SVM – це алгоритм машинного навчання, заснований на принципі мінімізації структурного ризику, який вперше був використаний у розпізнаванні образів. SVM має високі показники узагальнення при вирішенні задач діагностики несправностей з невеликою кількістю зразків, тоді як проблема діагностики несправностей в процесі експлуатації зернозбиральних комбайнів полягає в нестачі зразків несправностей. Тому SVM було обрано як алгоритм класифікації несправностей у реальній ситуації з невеликою кількістю зразків несправностей зернозбиральних комбайнів.

Основна ідея **нелінійної SVM (Support Vector Machine) моделі** полягає у **відображенні вхідних даних із простору низької розмірності в простір більш високої розмірності**, де можливо побудувати **лінійну роздільну гіперплощину** для класифікації або регресії.

1. Математичне відображення

- Нехай вхідний вектор даних $x \in \mathbb{R}^n$.
- Виконується відображення за допомогою функції ϕ:

$$\phi: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^N, N > n$$

- У новому просторі дані стають **лінійно роздільними**, навіть якщо у вихідному просторі вони перетинаються.

2. Використання ядрових функцій

Щоб не виконувати явне відображення у високорозмірний простір, застосовують **ядрові функції (kernel functions)**:

$$K(x_i, x_j) = \langle \phi(x_i), \phi(x_j) \rangle$$

- Приклади поширених ядер:
  - **Поліноміальне ядро:** $K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + c)^d$
  - **Радіальна базисна функція (RBF):** $K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \| x_i - x_j \|^2)$
  - **Сигмоїдне ядро:** $K(x_i, x_j) = \tanh(\kappa x_i^T x_j + \theta)$

3. Переваги нелінійного SVM

1. Дозволяє вирішувати **складні, нелінійно роздільні задачі** класифікації.
2. Використання ядрових функцій забезпечує **високу точність без явного підняття розмірності**.

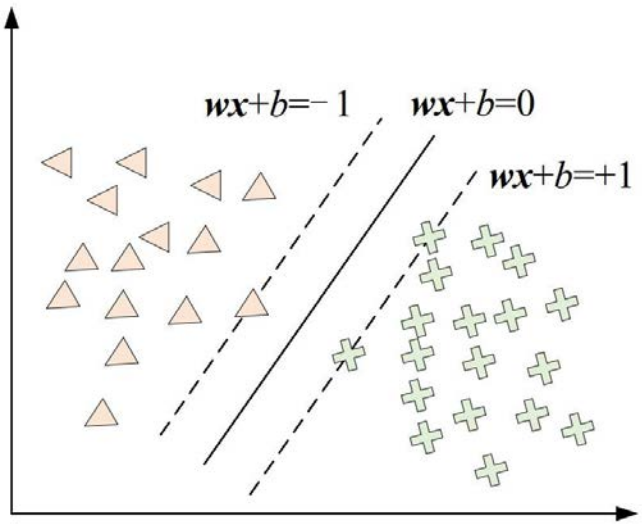


Рис. 3.1. SVM модель.

У SVM основна мета — знайти **гідну роздільну гіперплощину**, яка максимально відокремлює два класи вхідних даних.

Для **лінійного SVM** функція рішення має вигляд:

$$f(x) = \text{sign}(\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b)$$

де:

- $\mathbf{x}$ – вектор вхідних ознак;
- $\mathbf{w}$ – вектор ваг гіперплощини;
- b – зсув гіперплощини;
- $\text{sign}(\cdot)$ – функція знаку, що визначає клас об’єкта.

Для **нелінійного SVM** з використанням ядра:

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b)$$

де:

- n– кількість опорних векторів;
- α_i– множники Лагранжа для опорних векторів;
- y_i– клас і-го опорного вектора ($+1$ або -1);
- $K(x_i, x)$– ядрова функція (наприклад, RBF, поліноміальна);
- b– зсув гіперплощини.

Ця функція дозволяє визначити, до якого класу належить новий об'єкт x, та забезпечує **максимальне розділення класів** у просторі ознак.

Функція рішення оптимальної класифікаційної гіперплощини має наступний вигляд:

$$= \text{sgn}[(\text{w} - x) + b]. \quad (3.1)$$

У формулі: sgn(-) - символьна функція, w – ваговий вектор, x – вхідний вектор, b – константа.

Після того, як дані відображені у високорозмірний простір ознак за допомогою нелінійної функції відображення $\varphi(x)$, функція рішення класифікації має вигляд.

Після того, як дані відображені у **високорозмірний простір ознак** за допомогою нелінійної функції відображення $\phi(x)$, функція рішення класифікації SVM набуває вигляду:

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i \langle \phi(x_i), \phi(x) \rangle + b)$$

де:

- x– вхідний вектор ознак нового об'єкта;
- x_i– і-й опорний вектор у вихідному просторі;
- α_i– множник Лагранжа, визначений при навчанні SVM;
- y_i– клас і-го опорного вектора ($+1$ або -1);

- $\langle \phi(x_i), \phi(x) \rangle$– скалярний добуток у високорозмірному просторі (може бути замінений ядровою функцією $K(x_i, x)$);
- b– зсув гіперплощини.

Використання ядрової функції

Щоб уникнути обчислень у високорозмірному просторі, замість явного $\phi(x)$застосовують **ядрову функцію** $K(x_i, x)$:

$$f(x) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b\right)$$

Це дозволяє ефективно проводити класифікацію навіть для складних нелінійних задач.

- Популярні ядра: RBF (Gaussian), поліноміальне, сигмоїдне.

Відповідно до теорії розмірності VC, для мінімізації структурного ризику за вищезазначених обмежень математичний процес можна виразити у вигляді наступної задачі квадратичного програмування:

$$\min \phi(w) = w \cdot w^{\mathrm{T}}/2 \quad (3.4)$$

Гіперплощина класифікації повинна максимізувати мінімальну відстань між двома типами зразків і гіперплощиною, тому оптимізована цільова функція виглядає наступним чином:

$$\max W(\alpha) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} a_j - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_i a_j y_i y_j (x_i, x_j) \quad (3.6)$$

У рівнянні (6) штрафний коефіцієнт C представляє ступінь покарання за неправильно класифіковані зразки. У процесі мінімізації використовуються множники Лагранжа та методи оптимізації квадратичного програмування, а перетворена двоїста задача має вигляд

$$\max W(\alpha) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} a_j - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_i a_j y_i y_j (x_i, x_j)$$

(3.7)

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{n} a_i y_i = 0, 0 \le a_i \le C(i = 1, 2, \ldots, n)$$

(3.9)

У формулі I - кількість опорних векторів. Для нелінійних задач необхідно відобразити дані у вимірний простір ознак за допомогою нелінійного відображення. Припускаючи, що функція ядра K (xi, x) є нелінійною функцією відображення, функція рішення для:

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^{I} y_i a_i K(x_i, x) + b\right)$$

(3.10)

Оскільки радіально-базисна функція ядра (RBF) потребує визначення лише одного параметра, що є вигідним для оптимізації параметрів, RBF обрано як функцію ядра в цій роботі:

$$K(x_i, x) = \exp\left(-\frac{x - x_i^2}{\sigma^2}\right)$$

(3.11)

де σ – параметр функції ядра.

Показано, що штрафний параметр c і параметр функції ядра σ є основними факторами, які впливають на продуктивність SVM. Для отримання кращої узагальнюючої здатності SVM використано алгоритм рою частинок на основі глобальної оптимізації для знаходження оптимальних параметрів штрафної функції та параметрів функції ядра.

Алгоритм оптимізації рою частинок – це алгоритм глобального пошуку, що походить від алгоритму пошуку їжі для пташиних зграй. Метод пошуку "швидкість- позиція", прийнятий в POS, розглядає частинки як точки, що мають тільки швидкість і положення, ігноруючи вплив їх маси і об'єму. Завдяки своїй простій концепції і швидкій збіжності, він успішно застосовується в багатьох

областях [1]. Основна ідея полягає в тому, що кожна частинка летить з певною швидкістю в D-вимірному просторі пошуку, а її власна швидкість і оптимальне положення динамічно коригуються функцією пристосованості, індивідуальним досвідом польоту частинки та досвідом польоту інших частинок, щоб отримати оптимальний розв'язок оптимізаційної задачі.

Стандартний алгоритм PSO лінійно зменшує інерційну вагу w під час роботи. В цей час розмір кроку пошуку стає меншим, і ітерація поступово наближається до екстремальної точки. Однак, лише лінійно зменшуючи w, алгоритму буде важко вискочити з неї, як тільки він увійде в околицю локального екстремального значення, що ускладнить глобальну оптимізацію. Щоб вирішити цю проблему, в ітераційному процесі здатність до глобального пошуку та здатність до локального пошуку в процесі оптимізації можна збалансувати за допомогою нелінійного зменшення параметра W. Вагу інерції w покращують наступним чином:

$$w = \frac{s_{\max}^2 w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \times s_{\max}^2 s^2}{s_{\max}^2} \quad (3.12)$$

де: *wmax* – початкова інерційна вага, *wmin* – кінцева інерційна вага, *s* - поточна кількість ітерацій, $s_{\max}$ – максимальна кількість ітерацій.

Алгоритм оптимізації PSO-SVM широко використовувався в діагностиці несправностей зернозбиральних комбайнів, але після багатьох експериментів було виявлено, що частинки в алгоритмі оптимізації PSO-SVM схильні до явища "передчасності", тобто в процесі класифікації та діагностики несправностей частинки будуть збиратися в певному положенні. Процес реалізації IPSO-SVM показано на рис. 3.2.

За допомогою алгоритму IPSO 1 отримують оптимальні значення штрафного параметра c та параметра функції ядра σ, що мінімізують похибку ШНМ, які використовуються для навчання ШНМ та прогнозування класифікації.

Алгоритм 1 Кроки:

Крок 1: Штрафний параметр c та параметр ядра σ SVM використовуються як змінні, що оптимізуються, і виконується реальне кодування.

Крок 2: У *d*-вимірному просторі параметрів випадковим чином ініціалізуються m частинок, визначаються їхні положення та швидкості, тобто визначаються параметри SVM, і вибираються певні вхідні вибірки для побудови SVM-моделі.

Крок 3: Визначається, чи виконується умова припинення. Якщо так, то виводиться оптимальна особина, якій присвоюється штрафний параметр c та параметр ядра σ SVM.

Крок 4: Якщо він не підходив, SVM навчали обчислювати та оцінювати значення придатності частинок. Після того, як умова суспензії виконана, оптимальні параметри виводяться і класифікуються.

Крок 5: Якщо оптимальні параметри не виводяться, швидкість і положення частинок будуть ітеративно шукатися і оновлюватися, ШНМ буде перенавчатися, і придатність частинок буде оцінюватися повторно. Після того, як умови суспензії будуть виконані, оптимальні параметри будуть виведені і класифіковані; в іншому випадку швидкість і положення частинок будуть ітеративно перебиратися і оновлюватися весь час.

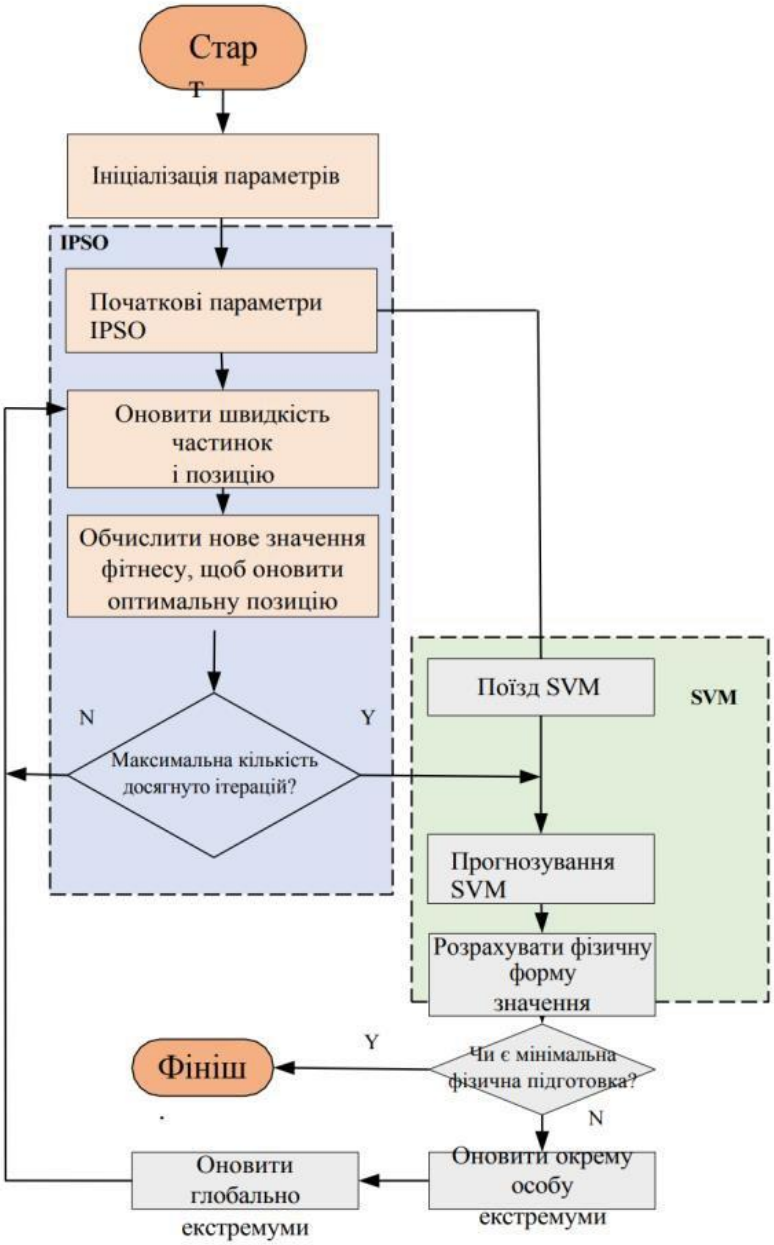


Рис. 3.2. Блок-схема діагностики несправностей IPSO-SVM.

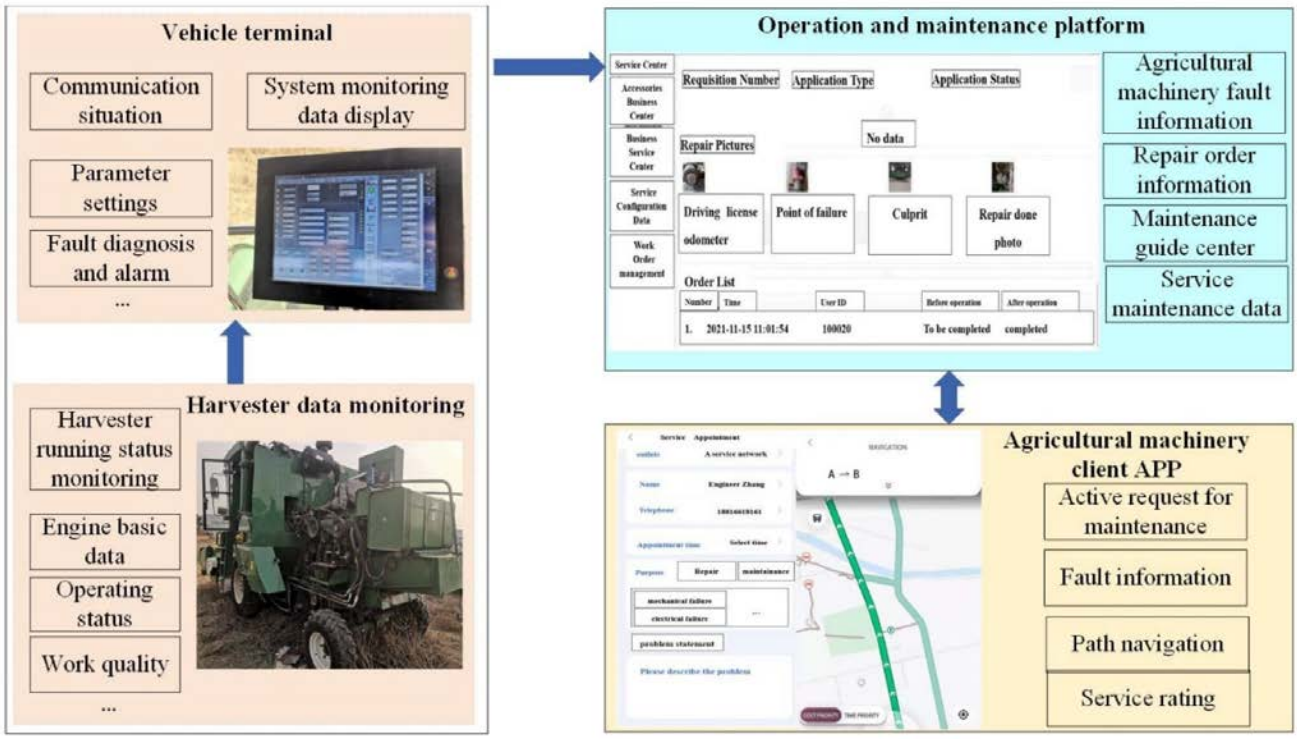
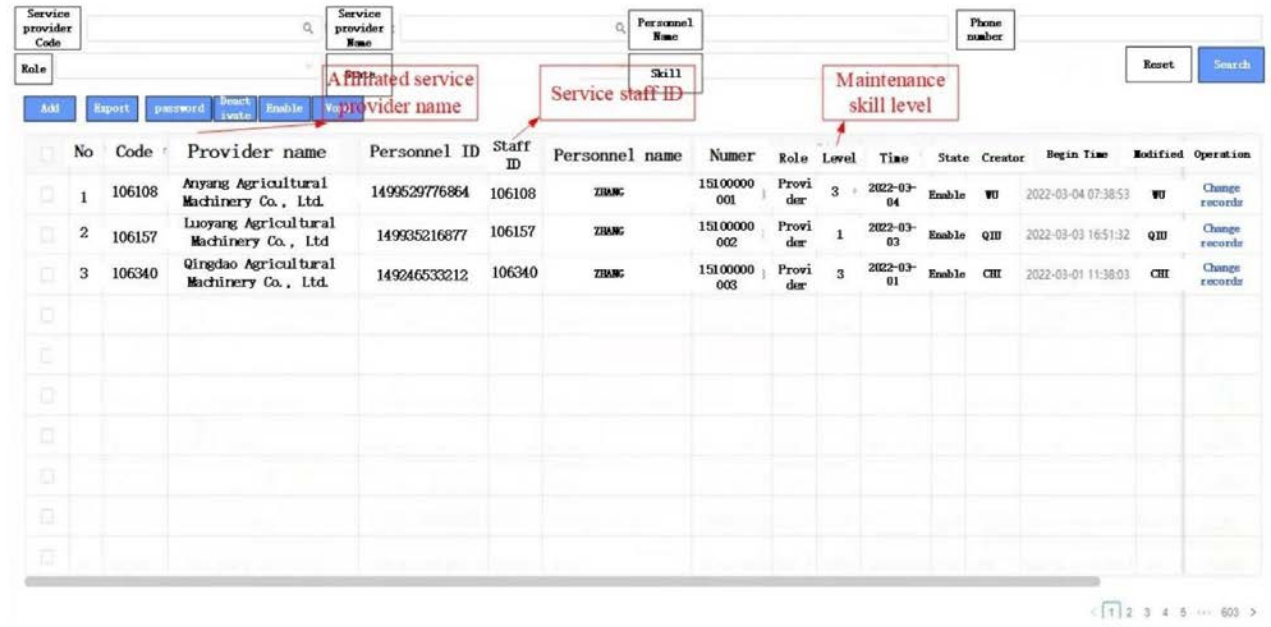


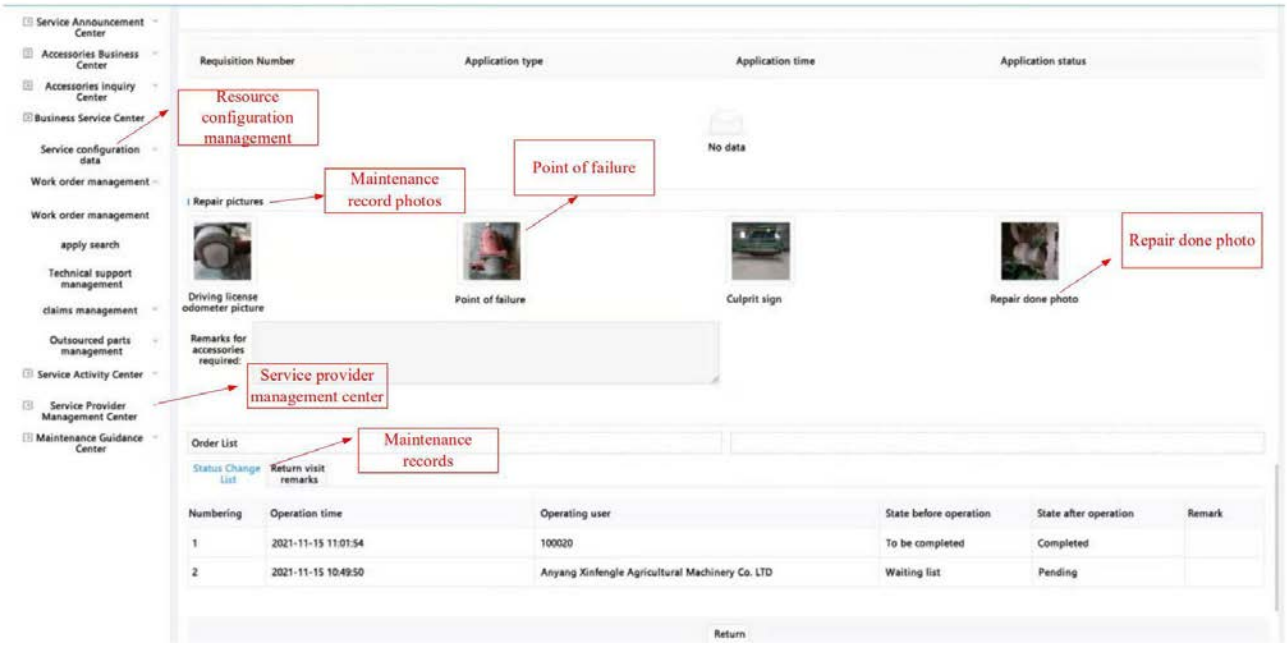
Рис. 3.3. Загальна схема системи експлуатації та обслуговування.

Рівень сприйняття: датчик був встановлений на об'єкті моніторингу зернозбирального комбайна для моніторингу стану роботи, якості роботи, статусу роботи та інших даних комбайна.

Мережевий рівень: Платформа експлуатації та технічного обслуговування сільськогосподарської техніки була розгорнута в центрі надання послуг підприємств сільськогосподарського машинобудування, включаючи систему баз даних oracle, операційне середовище JRE та обладнання для контролю безпеки. Як показано на Рисунку 7, платформа була надана у вигляді прикладної системи B/S і реалізована за допомогою багаторівневої ієрархічної структури, яка в основному включала: управління замовленнями на обслуговування, управління мережею технічного обслуговування, управління роботою персоналу з технічного обслуговування, управління звітністю користувачів сільськогосподарської техніки, завантаження даних про експлуатацію та технічне обслуговування, автоматичне управління інструкціями з технічного обслуговування, а також модулі імпорту та експорту даних.



(а)

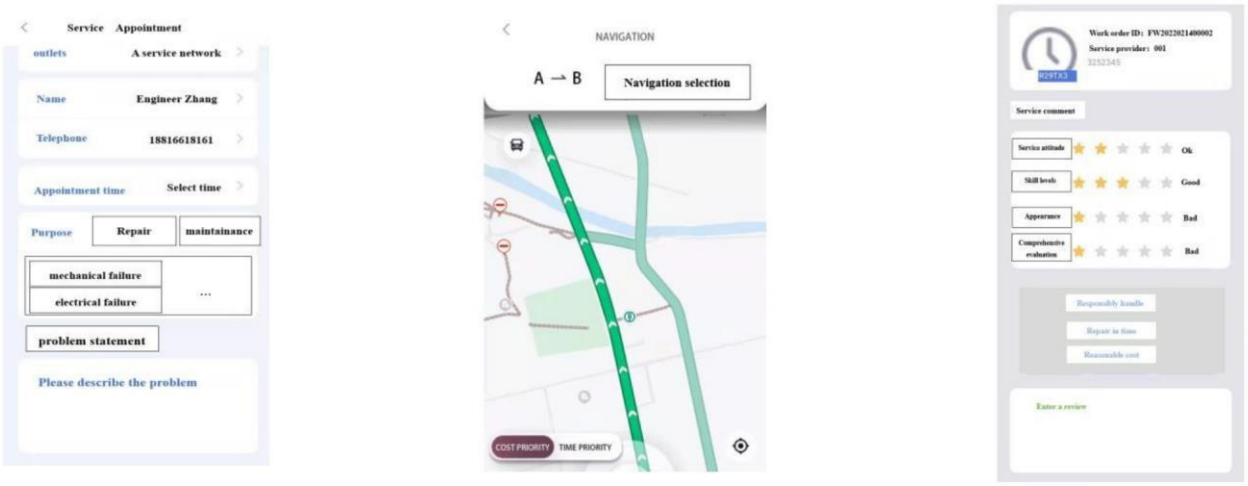


(б)

Рис. 3.4. Система управління інформацією платформи експлуатації та технічного обслуговування: (а) Управління інформацією про технічний персонал; (б) Історія замовлень на ремонт.

Система працює на основі сервісу, що надається оператором мобільного зв'язку. Термінал користувача сільськогосподарської техніки може активно звертатися до платформи для ремонту, отримання інформації про стан комбайна, перегляду сервісної мережі, планування маршрутів, оцінки сервісного обслуговування тощо, що було зручно для користувачів сільськогосподарської

техніки для розуміння стану комбайна в режимі реального часу і, в той же час, він може отримувати інформацію про платформу експлуатації та обслуговування і оптимальну програму технічного обслуговування. У поєднанні з результатами моніторингу та діагностики стану, а також самостійно обраними методами та часом обслуговування, він може взаємодіяти з інформацією платформи в режимі реального часу для отримання оптимальних планів обслуговування та надання технічних гарантій на експлуатацію, технічне обслуговування, капітальний ремонт та нагляд за обладнанням.



а) б) в)

Рис. 3.5. Функції ручного терміналу для користувачів сільськогосподарської техніки: (а) – звіт користувача про ремонт; (б) – планування маршруту обслуговування на СТО; (в) – оцінка сервісу після обслуговування.

РОЗДІЛ 4
РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБОВУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ

Для того, щоб перевірити продуктивність моделі в реальних умовах експлуатації, у вересні 2024 року Житомирському районі було проведено випробування комбінованого механізму збирання врожаю, як показано на рисунку 9. Тестовою моделлю є кукурудзозбиральний комбайн Wuzheng 4YZP-4X, сорт R1377, співвідношення зерна до незернової маси 1,06, вологість зерна 23,7%, вологість стебел 32,4%. Ширина захвату комбайна становить 4,75 м, а швидкість подачі – 6 кг/год. Через непередбачуваність і нечасте виникнення природних відмов, під час випробувань було застосовано ручне втручання, що призвело до конкретних відмов комбайна, відповідно до дорожньої карти трансмісії та ситуації з відмовами комбайна. Відповідно до GB/T 8097-2008 "Метод випробування комбайнів для збиральної техніки" було досліджено продуктивність розробленої моделі IPSO-SVM, а також В якості тестового показника було обрано точність ідентифікації несправностей.

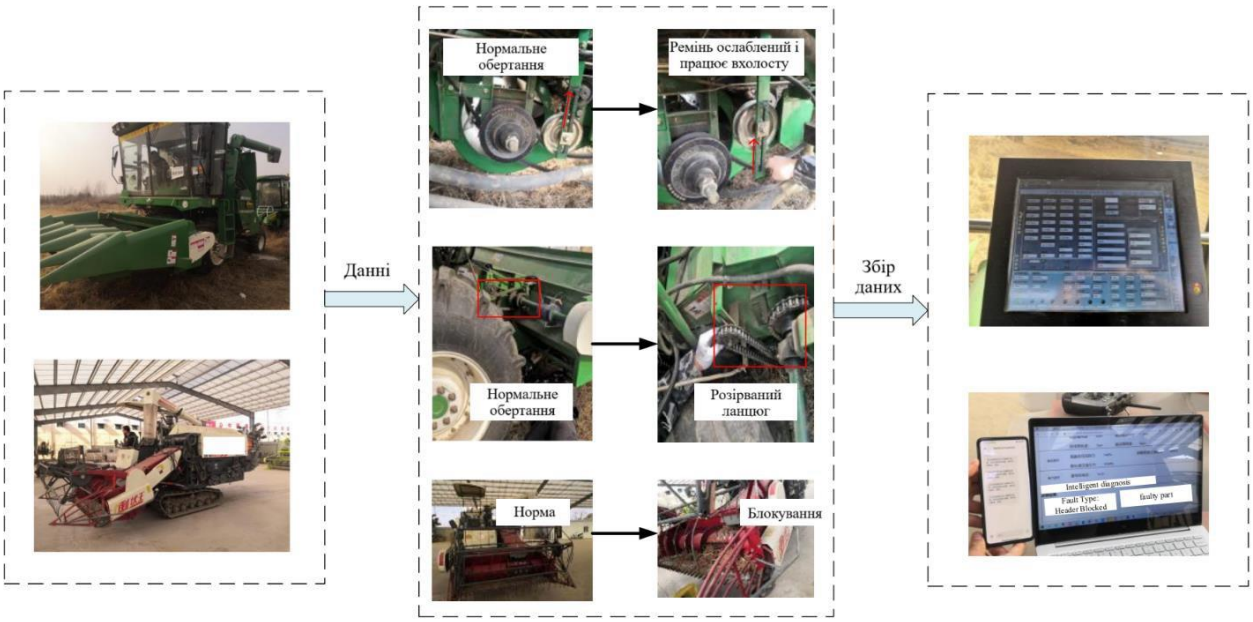


Рис. 4.1. Діагностика несправностей та моніторинговий тест зернозбирального комбайна.

За допомогою системи збору даних була зібрана інформація про основні робочі органи комбайна в полі, в основному включаючи швидкість подавального шнека, швидкість ланцюгового транспортера, швидкість молотильного барабана, швидкість вентилятора і швидкість тягового органу. У таблиці 1 наведені робочі дані під час експерименту з відмовами.

Параметр	Позначення та опис
Вхідний вектор ознак нового об’єкта	x
Опорний вектор	x_i
Множник Лагранжа	α_i, визначається при навчанні SVM
Клас опорного вектора	y_i (+1 або -1)
Скалярний добуток у високорозмірному просторі	⟨φ(x_i), φ(x)⟩ або ядрова функція K(x_i, x)
Зсув гіперплощини	b
Функція рішення	f(x) = sign(Σ α_i y_i K(x_i, x) + b)

Таблиця 4.1. – Зібрані дані задач діагностики несправностей.

Номер	Швидкість подачі шнека (об/хв-1)	Швидкість обертання вентилятора (об/хв-1)	Швидкість руху ланцюгового конвеєра (об/хв-1)	Частота обертання молотильного барабана (об/хв-1)	Швидкість кроку (об/хв-1)
1.0	247.79	1544.45	559.72	748.91	174.78
2.0	244.59	1485.25	581.22	758.44	174.18
3.0	259.48	1497.25	545.44	749.45	174.78
4.0	242.75	1280.44	521.45	759.44	175.18
5.0	241.44	1752.15	529.12	744.52	175.78
6.0	248.74	1445.95	545.18	759.74	171.18
7.0	247.24	1499.17	547.75	724.97	177.78
8.0	141.19	1544.45	159.71	147.18	48.24
9.0	85.81	1544.45	77.12	0.0	14.28
10.0	41.22	1544.45	0.0	0.0	24.57
11.0	241.18	1507.44	544.18	755.84	177.15

12.0	249.94	1518.75	545.18	721.07	177.71
13.0	258.49	1529.54	541.75	747.44	177.07
14.0	244.24	1540.14	554.98	751.54	177.54
15.0	245.57	1551.74	524.41	748.22	177.99
16.0	240.44	1572.47	545.18	725.24	178.45
17.0	41.22	1521.45	0.0	0.0	24.85
18.0	245.81	1584.75	527.98	742.48	179.47
19.0	244.44	1495.28	571.78	747.44	179.84
20.0	242.82	1707.54	541.14	742.82	180.29

Через втручання системи в тест, зібрані сирі дані про швидкість мали 0 значень, аномальні значення та відсутні значення, тому необхідно було попередньо обробити дані тестові дані. Якщо всі атрибути у вибірці дорівнювали 0, вибірка видалялася; для викидів, що перевищували максимальну швидкість відповідної деталі, вони замінювалися лінійною інтерполяцією; для пропущених значень заповнювалися сплайн- інтерполяцією. Зібрані дані були розділені на п'ять типів вибірок несправностей. Після попередньої обробки даних було отримано загалом 2700 вибірок, включаючи 1650 вибірок нормальної роботи комбайнів, 178 вибірок засмічення подавального шнека, 163 вибірок засмічення вентилятора, 229 вибірок засмічення граблин конвеєра, 180 вибірок засмічення молотильного барабана та 300 вибірок прослизання скребкової стрічки.

Розподіл даних показано в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розподіл кількості навчальних та тестових наборів.

Подача	Всього	Нормал.	Шнек забито	Вентилятор	Конвеєрний ланцюг	Молотьба/Бара засмічений
Навчальний набір	2000	1450	150	128	186	140
Тестовий набір	700	300	38	37	45	40

Пояснення колонок:

Подача — вид набору (Навчальний або Тестовий).

Всього — загальна кількість об’єктів або робіт, які виконувались.

Нормал. — ймовірно нормалізоване значення або кількість успішних операцій.

Шнек забито, Вентилятор, Конвеєрний ланцюг, Молотьба/Барабан засмічений, Скребок/Ремінь ослаблений — кількість несправностей чи проблемних випадків по кожному вузлу.

Невдача, Граблі засмічені — додаткові показники відмов або непрацездатності.

Ці дані зазвичай використовуються для:

Аналізу надійності вузлів комбайна;

Розрахунку трудомісткості усунення несправностей;

Складання плану ТО та прогнозування відмов.

Для шести типів даних було зібрано по 100 груп зразків для кожної категорії, і загалом було відібрано 600 зразків. Потім вони були випадковим чином розділені на дві частини, 60 з кожного типу даних були відібрані як навчальні вибірки, а решта 40 - як тестові вибірки, і нормалізовані. Було встановлено п'ять основних типів даних про несправності комбайнів, а для збору

та тестування було обрано шість типів даних, а саме: зламаний ланцюг приводу шнека, зламаний відривний барабан, зламаний скребок, зламаний ланцюг трансмісії та ланцюг приводу граблів, а ремінь шківа вентилятора був вільним та нормальним.

Для діагностики несправностей були відібрані вибіркові дані, зібрані за допомогою інформації про несправності водного комбайна в програмному забезпеченні Matlab R2018a. Всього було відібрано 300 зразків, які були випадковим чином розділені на дві частини, з яких 30 зразків були обрані як навчальні, а решта 20 зразків - як тестові. З рисунку 10 видно, що діагностичні помилки в основному виникали для другого-шостого типів несправностей. Серед них помилки діагностики класифікатора IPSO-SVM траплялися тричі, відповідно, одна помилка даних другого типу несправності була помилково віднесена до третього типу, одна помилка даних третього типу несправності була помилково віднесена до четвертого типу, і одна помилка даних п'ятого типу несправності була помилково віднесена до шостої категорії, що в основному покращило точність діагностики четвертої та шостої категорій несправностей порівняно з класифікаторами GA-SVM і PSO-SVM.

Результати тестування моделі IPSO-SVM на тестовому наборі експериментальних даних наведені в таблиці 4.3. Два зразки засмічення подавального шнека були помилково сприйняті як засмічення молотильного барабана, а одна поломка вентилятора була сприйнята як засмічення граблин ланцюгового конвеєра. Причиною помилки ідентифікації було те, що подавальний шнек і відбійний барабан належали до однієї і тієї ж трансмісійної конструкції, а вентилятор і граблини – до однієї і тієї ж пасової трансмісії.

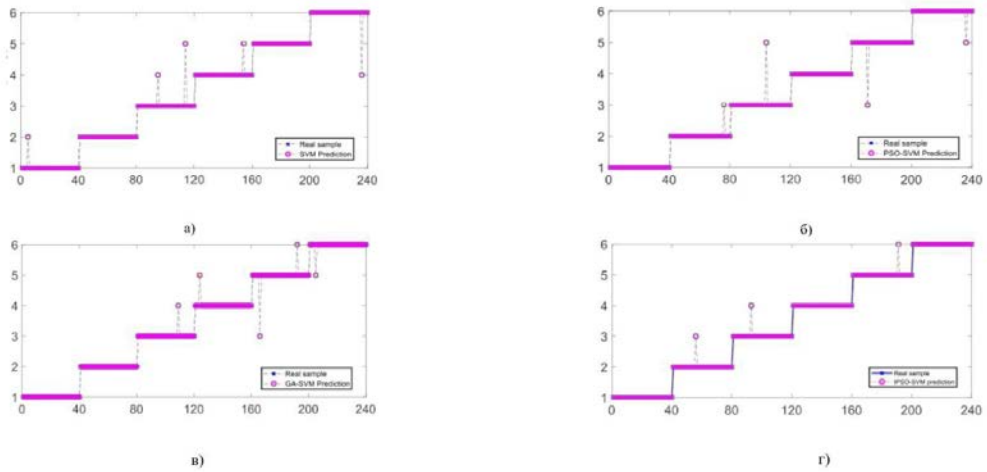


Рис. 4.2. Результати класифікації чотирьох класифікаторів відмов зернозбиральних комбайнів. (а) Результат діагностики SVM, (б) результат діагностики PSO-SVM, (в) результат діагностики GA-SVM та (г) результат діагностики IPSO-SVM.

Таблиця 4.3 – Результати ідентифікації несправностей моделлю IPSO-SVM на даних тестового набору.

Несправності в роботі	**Кількість зразків**	**Правильна класифікація**	**Класифікація помилок**	**Точність (%)**
Нормально	365	365	0	100
Шнек подачі засмічений	56	54	2	96.37
Несправність вентилятора	38	37	1	97.32
Засмічення ланцюгових граблин конвеєра	26	26	0	100
Молотильний барабан засмічений	18	17	1	94.12
Скребкова стрічка	73	73	0	100

Несправності в роботі	**Кількість зразків**	**Правильна класифікація**	**Класифікація помилок**	**Точність (%)**
ослаблена				
Середня точність розпізнавання	—	—	—	98.97

Пояснення колонок:

- **Кількість зразків** — скільки разів була зафіксована конкретна несправність;
- **Правильна класифікація** — скільки випадків було правильно розпізнано;
- **Класифікація помилок** — кількість випадків неправильної класифікації;
- **Точність (%)** — відношення правильно класифікованих випадків до загальної кількості зразків, у відсотках;
- **Середня точність** — середнє значення точності для всіх видів несправностей.

Результати експерименту показали, що середня швидкість розпізнавання системи склала 97,96%. Серед них коефіцієнт розпізнавання несправностей молотильного барабана склав лише 94,11%, що в основному було пов'язано з прискореним підйомом і раптовим зниженням оборотів двигуна комбайна під час процесу збору даних і процесом холостого ходу швидкості молотильного барабана, що призводило до нечіткого судження. Для вентилятора та подавального шнека показники розпізнавання становили 97,30% та 96,36% відповідно. Вентилятор приводився в дію шківом вентилятора, а подаючий шнек

- проміжним валом жатки, відносно незалежним.

Точність класифікації була обрана як показник оцінки ефективності, і чотири методи SVM, PSO-SVM, GA-SVM та IPSO-SVM були використані для класифікації несправностей обраного набору даних. Параметр m було встановлено рівним 20, максимальне значення ваги інерції w - 1.40, мінімальне

значення w - 0.4, параметр прискорення c1 - 1.6, c2 - 1.8, кількість ітерацій X - 4, Y - 6, покращені параметри оптимізації IPSO були кращими, ніж у алгоритму PSO, а результати оптимізації IPSO були найкращими. Коли оптимальні параметри c і σ становили 3,281 і 0,407 відповідно, модель IPSO-SVM мала найкращу продуктивність, а точність розпізнавання становила 97,96%, що краще, ніж у моделі PSO-SVM.

У цьому дослідженні для класифікації несправностей вибраного набору даних було використано SVM, PSO-SVM, GA-SVM та IPSO-SVM. Для забезпечення точності експериментальних результатів для експерименту було відібрано 2700 вибірок даних.

Розроблена система діагностики несправностей комбайнів та дистанційної експлуатації та обслуговування, а також проведена діагностика несправностей роботи комбайна. У той же час, на основі інтелектуального сільськогосподарського сценарію, була розроблена комплексна платформа експлуатації та обслуговування зернозбиральних комбайнів, а також реалізований метод експлуатації та обслуговування сходового типу на основітехнології діагностики несправностей, включаючи поштовх обслуговування несправностей і т.д., щоб забезпечити основу для подальшого розвитку комплексної технології експлуатації та обслуговування зернозбиральних комбайнів.

З огляду на запропонований у цій статті метод діагностики несправностей, заснований на розробленому датчику швидкості для системи моніторингу та збору даних про роботу комбайна, перевірка застосування та порівняльний аналіз були проведені за допомогою набору даних, що ефективно підвищило точність діагностики несправностей зернозбирального комбайна, а також покращило метод. Однак є деякі проблеми, такі як: в процесі діагностики тип несправності був неправильно оцінений, а проблеми відділення від барабана і шнека були помилково оцінені як один і той же тип несправності. Основна проблема полягала в тому, що враховувався лише один фактор.

Оскільки трансмісійна структура комбайна була з'єднана, в майбутньому процесі дослідження слід використовувати різноманітні датчики для вивчення

проблем несправностей комбайна, а алгоритм машинного навчання може бути використаний для коригування типів даних моніторингу та вагового співвідношення для досягнення кращої дискримінації.

У цьому дослідженні було проведено проектування системи збору даних комбайна, проектування системи діагностики несправностей та побудову комплексної платформи експлуатації та обслуговування комбайна. На основі технології повного циклу експлуатації та технічного обслуговування зернозбирального комбайна подальші дослідники можуть в основному здійснювати передачу інформації про несправності, розподіл та планування ресурсів обслуговування та технічного обслуговування, що буде найважливішою частиною майбутніх досліджень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Метою цього дослідження було створення системи діагностики несправностей зернозбиральних комбайнів, а також розробка платформи з експлуатації та технічного обслуговування для передачі інформації в центр управління виробника в режимі реального часу, щоб заздалегідь забезпечити надійні заходи з технічного обслуговування для операторів сільськогосподарської техніки, точно діагностувати несправності зернозбиральних комбайнів, швидко надсилати інформацію про несправності та надавати плани технічного обслуговування користувачам сільськогосподарської техніки.

SVM-класифікатор широко використовується в дослідженнях діагностики несправностей, але його точність класифікації значною мірою пов'язана з вибором параметра *c* та параметра функції ядра *g*. У цій роботі вдосконалений алгоритм рою частинок для оптимізації штрафного коефіцієнта SVM та ширини функції ядра. В удосконаленому алгоритмі вагу інерції поступово зменшували на кожній ітерації, щоб збалансувати здатність до глобального пошуку та здатність до локального пошуку популяції. Кінцевий показник діагностики несправностей IPSO-SVM склав 95,58%. Алгоритм IPSO-SVM підвищив точність прогнозування несправностей зернозбиральних комбайнів, а ефективність алгоритму була перевірена на практиці.

На основі комплексної платформи системи експлуатації та технічного обслуговування методу діагностики несправностей кукурудзозбирального комбайна було проведено моделювання та порівняння IPSO-SVM з SVM, GA-SVM та PSO-SVM.

Верифікація показала, що точність прогнозування несправностей зернозбирального комбайна була покращена і був розроблений новий метод для дослідження діагностики несправностей зернозбирального комбайна. Однак ми використовували лише штучні несправності для імітації польових умов. У порівнянні з польовими операціями може бути певна похибка точності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вовк О.С., Бондаренко А.М. Технічний сервіс машин у сільськогосподарському виробництві: навч. посіб. Харків: ХНАУ. 2019. 275 с.

2. Писаренко П.М. Ремонт сільськогосподарських машин і обладнання. Вінниця: Нова книга. 2016. 290 с.

3. Єременко В.І. Сільськогосподарські машини: будова, налаштування, обслуговування. Київ: Вища школа. 2020. 400 с.

4. Мороз О.Г. Технічна експлуатація машин і обладнання АПК. Полтава: РВЦ ПДАА. 2017. 318 с.

5. Чернов О.І., Гаврилюк В.М. Діагностика та технічне обслуговування комбайнів: навч. посіб. Одеса: ОНАХТ. 2020. 265 с.

6. Степаненко І.Л., Ковальчук А.В. Сучасні технології ремонту машин і обладнання. Львів: ЛНАУ. 2019. 282 с.

7. Трегубов В.І., Гончаренко І.А. Організація технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. Харків: Колегіум. 2017. 324 с.

8. Кузьменко В.О. Розробка і впровадження новітніх методів ТО сільгоспмашин. Київ: Аграрна освіта. 2021. 300 с.

9. Бойко А.І., Захарченко І.В. Поточний ремонт сільськогосподарської техніки. Вінниця: Нова книга. 2018. 250 с.

10. Грінченко І.П., Лапін В.В. Експлуатаційна надійність та діагностика машин. Суми: СумДУ. 2016. 275 с.

11. Мінаєв О.О. Основи організації технічного сервісу машин. Київ: Освіта України. 2020. 243 с.

12. Мельник В.Ф. Зернозбиральні комбайни: конструкція, ремонт та обслуговування. Тернопіль: Економічна думка. 2019. 320 с.

13. Петров О.М., Самойленко Ю.В. Сучасні технології технічного обслуговування комбайнів. Дніпро: ДДАЕУ. 2018. 290 с.

14. Жук Г.Л., Коваленко П.П. Ефективне використання та ремонт зернозбиральної техніки. Житомир: Полісся. 2017. 305 с.

15. Смірнов М.І. Ресурсозбереження в технічному обслуговуванні сільськогосподарських машин. Київ: Аграрна наука. 2021. 270 с.

16. Дорошенко Л.А., Чумак В.М. Відновлення деталей машин у сі

17. Грищук П.О. Методи та засоби діагностування машин АПК. Черкаси: ЧДТУ. 2020. 240 с.

18. Буркацький В.П. Сучасні системи ТО і ремонту комбайнів. Львів: УкрНДІМ. 2019. 280 с.

19. Ковтун А.І. Надійність та довговічність сільськогосподарської техніки. Харків: ТОР. 2017. 210 с.

20. Мірошниченко В.В., Левченко О.П. Діагностика і технічний стан машин. Київ: Агроосвіта. 2018. 300 с.