

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «другого (магістерського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТИВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ІОТ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н. головний інженер
_____ Віктор ДРОЗД

Виконав здобувач другого (магістерського) рівня
вищої освіти заочної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Сергій ШПАРТЮК

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання
на відповідне джерело.*

_____ Сергій ШПАРТЮК

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Сергій ШПАРТЮК

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Розробка системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів з використанням технологій IoT та прогнозування відмов»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 116 від « 27 » ____ 06 ____ 2026 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 17.09.2026.

3. **Об'єкт дослідження:** процеси зміни технічного стану сільськогосподарських агрегатів в умовах експлуатації та методи їх дистанційного моніторингу з використанням технологій Інтернету речей.

4. **Предмет дослідження:** методи та засоби побудови системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів на базі технологій IoT з використанням алгоритмів машинного навчання для прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ:

Проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку систем моніторингу технічного стану сільськогосподарської техніки. Дослідити статистику відмов сільськогосподарських агрегатів та визначити найбільш критичні об'єкти моніторингу. Проаналізувати технології IoT (сенсори, мікроконтролери, протоколи передачі даних, хмарні платформи) та їх застосування в агроінженерії.

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ:

Розробити математичні моделі процесів деградації технічного стану агрегатів.

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ:

Розробити та виготовити дослідний зразок системи дистанційного моніторингу.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:**6.1. До теоретико-методичного розділу:**

Схема класифікації методів технічного діагностування сільськогосподарської техніки.

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Графіки залежності контрольованих параметрів від напрацювання (лінійна, експоненційна моделі).

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

Складальне креслення загального компонування системи на тракторі.

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту):

Об'єкти моніторингу: двигун, трансмісія, гідравлічна система, ходова частина.

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

9. Дата видачі завдання: « 27 » 03 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1	2	3	4	5
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	27.04.2026		
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	15.05.2026		
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної	29.05. 2026		

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1	2	3	4	5
	роботи (кваліфікаційного проєкту)			
4.	Написання першого (теоретикометодичног о) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	18.06. 2026		
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	11.07.2026		
6.	Написання другого (дослідницькоаналітич ного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	01.08.2026		
7.	Написання третього (проектно- розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	11.08.2026		
8.	Написання висновків, списку літератури	21.08.2026		
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) науковим керівником	27.08.2026		

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1	2	3	4	5
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	07.09.2026		
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	10. 09.2026		
12.	Подання кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на кафедру	11. 09.2026		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на оригінальність	12. 09.2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	15. 09.2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	16. 09.2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	19.09.2026		
	Загальна кількість			

Здобувач ОС

_____ Сергій ШПАРТЮК

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Костянтин ДЯДЮРА

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: складається з 120 сторінок, 5 розділів, 28 рисунків, 20 таблиць, 24 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: процеси зміни технічного стану сільськогосподарських агрегатів в умовах експлуатації та методи їх дистанційного моніторингу.

Предмет дослідження: методи та засоби побудови системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів на базі технологій IoT з використанням алгоритмів прогнозування відмов.

Мета роботи: підвищення ефективності технічного обслуговування сільськогосподарської техніки шляхом розробки системи дистанційного моніторингу технічного стану агрегатів з використанням технологій IoT та прогнозування відмов.

Методи дослідження: методи системного аналізу (для огляду існуючих рішень), математичного моделювання (для опису процесів деградації технічного стану), машинного навчання (для прогнозування відмов), натурного експерименту (для валідації роботи системи в польових умовах) та методи математичної статистики (для обробки експериментальних даних).

Удосконалено метод дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів шляхом інтеграції IoT-сенсорів, бездротових мереж передачі даних та алгоритмів машинного навчання для прогнозування залишкового ресурсу, що, на відміну від існуючих систем періодичного обслуговування, забезпечує перехід до обслуговування за фактичним станом.

Ключові слова: ТЕХНІЧНИЙ СТАН, СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИЙ АГРЕГАТ, ІОТ, ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ, ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ.

					14.17 - КР. 010.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Шпартюк С.						
Перевір.		Дядюра К. О.					6	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

3MICT

	С
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМАТИКИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТІВ.....	12
1.1 Значення технічного обслуговування та моніторингу стану сільськогосподарської техніки для ефективності агровиробництва.....	12
1.2 Огляд існуючих систем діагностування та моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів	15
1.3 Аналіз технологій IoT та їх застосування в агроінженерії	22
1.4 Методи прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу обладнання	29
Висновки.....	44
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	46
2.1 Обґрунтування вибору об’єктів моніторингу та контрольованих параметрів сільськогосподарських агрегатів	46
2.2 Розробка архітектури системи дистанційного моніторингу на базі	49
2.3 Математичне моделювання процесів деградації технічного стану агрегатів	50
2.4 Методи та алгоритми прогнозування відмов на основі машинного навчання	56
2.5 Вибір сенсорного забезпечення та апаратної платформи системи	59
2.6 Програмна архітектура системи збору, передачі та обробки даних	63
Висновки.....	63

					14.17 - КР.010.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Шпартюк С.			ЗМІСТ			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								7	2
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ..	76
3.1 Розробка та виготовлення дослідного зразка системи моніторингу.	76
3.2 Результати лабораторних випробувань сенсорного забезпечення ..	80
3.3 Польові випробування системи моніторингу	84
3.4 Оцінка точності прогнозування відмов та залишкового ресурсу ...	87
3.5 Аналіз ефективності впровадження системи дистанційного моніторингу.....	89
Висновки.....	92
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	93
4.1 Аналіз небезпечних факторів при експлуатації сільськогосподарських агрегатів, оснащених системами моніторингу.....	93
4.2 Електробезпека при роботі з електронними системами моніторингу	97
4.3 Ергономічні вимоги до організації робочого місця оператора системи моніторингу.....	99
4.4 Пожежна безпека при експлуатації сільськогосподарської техніки.....	101
Висновки.....	103
РОЗДІЛ 5 КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АГРЕГАТІВ.....	104
5.1 Маркетинговий аналіз ринку систем моніторингу сільськогосподарської техніки.....	104
5.2 Розробка бізнес-моделі комерціалізації системи.....	108
5.3 Розрахунок собівартості розробки прототипу та терміну окупності.....	110
Висновки.....	114
ВИСНОВКИ.....	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку агропромислового комплексу характеризується переходом до концепції «Сільське господарство 4.0», де ключову роль відіграють цифровізація, автоматизація та інтелектуальні системи управління. Ефективність сільськогосподарського виробництва значною мірою залежить від надійності та працездатності технічних засобів, які використовуються для виконання польових робіт.

Раптові відмови сільськогосподарських агрегатів під час виконання польових робіт призводять до значних економічних втрат: порушення агротехнічних строків, зниження врожайності, додаткових витрат на ремонт та простої техніки. За статистичними даними, до 30–40% відмов сільськогосподарської техніки відбуваються раптово, що унеможливорює своєчасне планування ремонтних робіт.

Традиційна система планово-попереджувального обслуговування, яка базується на напрацюванні (мото-годинах) або календарних строках, не враховує фактичний технічний стан кожного конкретного агрегату та умови його експлуатації. Це призводить до передчасного обслуговування (надлишкові витрати) або до раптових відмов (недостатнє обслуговування).

Розвиток технологій Інтернету речей (IoT), бездротових мереж передачі даних та методів машинного навчання створює передумови для переходу до обслуговування за фактичним станом (Condition-Based Maintenance) та прогнозного обслуговування (Predictive Maintenance). Це дозволяє завчасно виявляти ознаки деградації технічного стану та планувати ремонтні роботи до виникнення відмови.

					14.17 - КР. 010.0.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Шпартюк С.			ВСТУП			Літ.		Аркуш		Архувів	
Перевір.		Дядюра К. О.								9	3		
Реценз.													
Н. Контр.													
Затверд.		Дядюра К. О.											

У зв'язку з цим, розробка системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів з використанням технологій IoT та прогнозування відмов є актуальним науково-технічним завданням агроінженерії.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності технічного обслуговування сільськогосподарської техніки шляхом розробки системи дистанційного моніторингу технічного стану агрегатів з використанням технологій IoT та прогнозування відмов.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

1. Проаналізувати стан питання та існуючі системи моніторингу технічного стану сільськогосподарської техніки.
2. Обґрунтувати вибір контрольованих параметрів та розробити архітектуру системи дистанційного моніторингу на базі IoT.
3. Розробити математичні моделі процесів деградації технічного стану основних агрегатів.
4. Розробити алгоритми прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу на основі методів машинного навчання.
5. Провести експериментальні дослідження працездатності розробленої системи в лабораторних та польових умовах.
6. Виконати техніко-економічне оцінювання впровадження системи дистанційного моніторингу.

Об'єкт дослідження – процеси зміни технічного стану сільськогосподарських агрегатів в умовах експлуатації.

Предмет дослідження – методи та засоби побудови системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів на базі технологій IoT з використанням алгоритмів прогнозування відмов.

Методи дослідження.

У роботі застосовано:

					14.17 - КР. 010.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- *аналітичні методи* – при огляді літературних джерел та патентному пошуку;
- *методи теорії надійності та технічної діагностики* – для моделювання процесів деградації;
- *методи машинного навчання* – для прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу;
- *методи 3D-моделювання (CAD)* – при розробці конструкції вузлів системи;
- *експериментальні методи* – для визначення похибок вимірювань та оцінки ефективності системи в польових умовах.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Дістало подальшого розвитку обґрунтування параметрів систем дистанційного моніторингу сільськогосподарської техніки, що відрізняється комплексним підходом до вибору контрольованих параметрів (вібрація, температура, тиск, електричні параметри) для різних типів агрегатів.

2. Удосконалено метод прогнозування відмов сільськогосподарських агрегатів на основі машинного навчання, який враховує історію експлуатації, умови роботи та результати періодичного діагностування, що дозволяє підвищити точність прогнозу залишкового ресурсу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено та виготовлено дослідний зразок системи дистанційного моніторингу, що дозволяє здійснювати безперервний контроль технічного стану сільськогосподарських агрегатів без участі оператора. Запропоноване рішення дозволяє агропідприємствам знизити витрати на технічне обслуговування на 20–30%, зменшити кількість раптових відмов на 40–50% та підвищити коефіцієнт готовності техніки.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати дослідження доповідалися та обговорювалися на науково-практичних конференціях.

					14.17 - КР. 010.0.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМАТИКИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТИВ

1.1 Значення технічного обслуговування та моніторингу стану сільськогосподарської техніки для ефективності агровиробництва

Сучасне сільськогосподарське виробництво характеризується високим рівнем механізації та використанням складних технічних засобів, від надійності яких безпосередньо залежить своєчасність виконання польових робіт та кінцевий економічний результат господарства. В умовах обмежених агротехнічних строків будь-яка затримка, спричинена відмовою техніки, призводить до прямих фінансових втрат, які значно перевищують вартість самого ремонту [1]. Значення технічного обслуговування та моніторингу стану техніки визначається кількома ключовими факторами, які формують ефективність агровиробництва в цілому (рисунки 1.1).

Своєчасність виконання агротехнічних операцій. Агротехнічні строки є критичним фактором, що визначає врожайність сільськогосподарських культур. Дослідження показують, що затримка з виконанням польових робіт призводить до лінійного або нелінійного зниження врожайності залежно від культури та конкретної операції. Для такої культури, як ріпак, втрата лише одного дня в період посівної може становити до 1,5% урожаю. За врожайності 2,3 тонни з гектара та ціни 450 доларів за тонну щоденні збитки сягають 15 доларів з кожного гектара [2].

					14.17 - КР.010.1.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1			
Розроб.		Шпартюк С.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Архів	
						12	30	

Для господарств із земельним банком у сотні чи тисячі гектарів це може означати втрату десятків тисяч доларів лише через затримку старту робіт [2].

Структура відмов та їхній вплив на працездатність техніки. Аналіз відмов сільськогосподарської техніки свідчить про те, що найбільш вразливими елементами є електрообладнання, гідрообладнання та дизельні двигуни [5]. Дослідження надійності зернозбиральних комбайнів виявили, що найбільша кількість відмов припадає на різальний апарат (38,1%), тоді як відмови двигуна та ходової частини становлять лише 1,5% та 1,1% відповідно. Проте час усунення відмов у двигуні та ходовій частині є значно тривалішим — 5,8 та 4,2 години відповідно, порівняно з 30 хвилинами для різального апарату [3]. Це свідчить про необхідність диференційованого підходу до моніторингу різних вузлів та агрегатів.

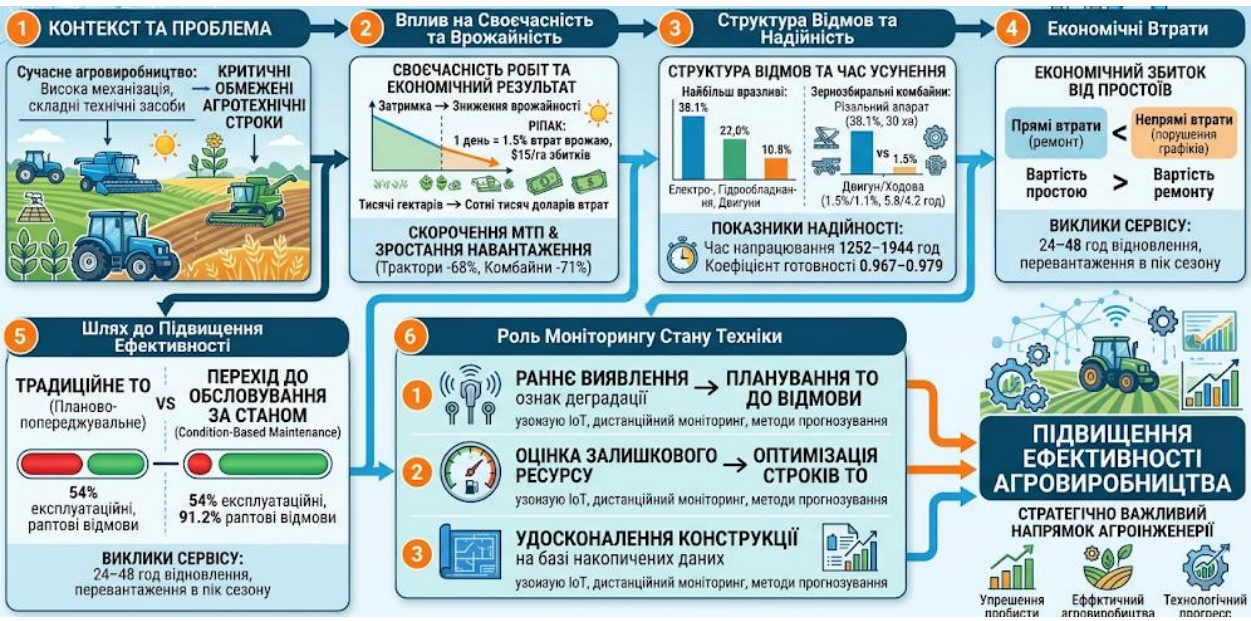


Рисунок 1.1 – Значення моніторингу стану та технічного обслуговування в сучасному сільському господарстві

Економічні втрати від простоїв. Економічний збиток від простою техніки має складну структуру і включає як прямі витрати на ремонт, так і непрямі втрати, пов'язані з порушенням графіків робіт. Вартість простою визначається тривалістю непрацездатного стану машини, доступністю запасних частин та кваліфікованого сервісного персоналу. Сервісні служби зазвичай здатні відновити техніку протягом 24–48 годин, однак у розпал

сезону навіть така затримка є критичною [4]. Додатковим викликом залишається перевантаження сервісних команд у піковий період, оскільки більшість господарств розпочинають польові роботи одночасно [4].

Вплив на структуру машинно-тракторного парку. В Україні за період з 1992 по 2023 рік спостерігалось суттєве скорочення машинно-тракторного парку аграрних підприємств. Кількість тракторів зменшилася на 68%, зернозбиральних комбайнів – на 71%, кормозбиральних – на 78%. Парк основних сільськогосподарських машин, таких як культиватори, косарки, плуги та сівалки, скоротився більш ніж на 70% [5]. Наслідком цього стало істотне зростання навантаження на наявні трактори, комбайни та обладнання, що підвищує ризик відмов та актуалізує потребу в ефективних системах моніторингу технічного стану.

Показники надійності сільськогосподарської техніки. Дослідження надійності тракторів різних виробників демонструють суттєві відмінності в показниках безвідмовності. Середній час напрацювання на відмову для тракторів різних марок коливається від 1252 до 1944 годин, а коефіцієнт готовності — від 0,967 до 0,979 . Водночас дослідження відмов агрегатів і систем сільськогосподарської техніки засвідчують, що найбільший середній наробіток на відмову характерний для трансмісії (1042,6 години) та ходової частини (858,6 години), тоді як електрообладнання має найнижчий показник – 336,5 години [6]. Ці дані підкреслюють необхідність пріоритезації об'єктів моніторингу з урахуванням як частоти відмов, так і тяжкості їхніх наслідків.

Перехід до обслуговування за фактичним станом. Традиційна система планово-попереджувального обслуговування, яка базується на напрацюванні або календарних строках, має суттєві недоліки. Вона не враховує фактичний технічний стан кожного конкретного агрегату та умови його експлуатації, що призводить або до передчасного обслуговування з надлишковими витратами, або до раптових відмов через недостатнє обслуговування. Дослідження показують, що 54% відмов зернозбиральних комбайнів класифікуються як

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатаційні, а 91,2% – як раптові. Це свідчить про необхідність переходу до стратегії обслуговування за фактичним станом (Condition-Based Maintenance), яка передбачає безперервний або періодичний моніторинг ключових параметрів технічного стану.

Роль моніторингу в підвищенні ефективності. Системи моніторингу технічного стану дозволяють вирішити комплекс взаємопов'язаних завдань. По-перше, вони забезпечують раннє виявлення ознак деградації технічного стану, що дозволяє планувати ремонтні роботи до виникнення відмови. По-друге, моніторинг дає можливість оцінити залишковий ресурс агрегатів та оптимізувати строки їхнього обслуговування. По-третє, накопичення даних про роботу техніки в реальних умовах експлуатації дозволяє вдосконалювати конструкцію та підвищувати надійність машин.

Таким чином, технічне обслуговування та моніторинг стану сільськогосподарської техніки є не просто допоміжними функціями, а ключовими елементами забезпечення ефективності агровиробництва. В умовах скорочення машинно-тракторного парку, зростання навантаження на техніку та посилення вимог до своєчасності виконання агротехнічних операцій, впровадження сучасних систем дистанційного моніторингу на базі технологій IoT та методів прогнозування відмов стає стратегічно важливим напрямом розвитку агроінженерії.

1.2 Огляд існуючих систем діагностування та моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів

Сучасний стан технічного діагностування сільськогосподарської техніки характеризується переходом від традиційних методів періодичного контролю до безперервного моніторингу з використанням різноманітних фізичних принципів та інформаційних технологій. Аналіз існуючих систем дозволяє класифікувати їх за фізичними методами діагностування, рівнем автоматизації та способом передачі даних (рисунок 1.2).

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

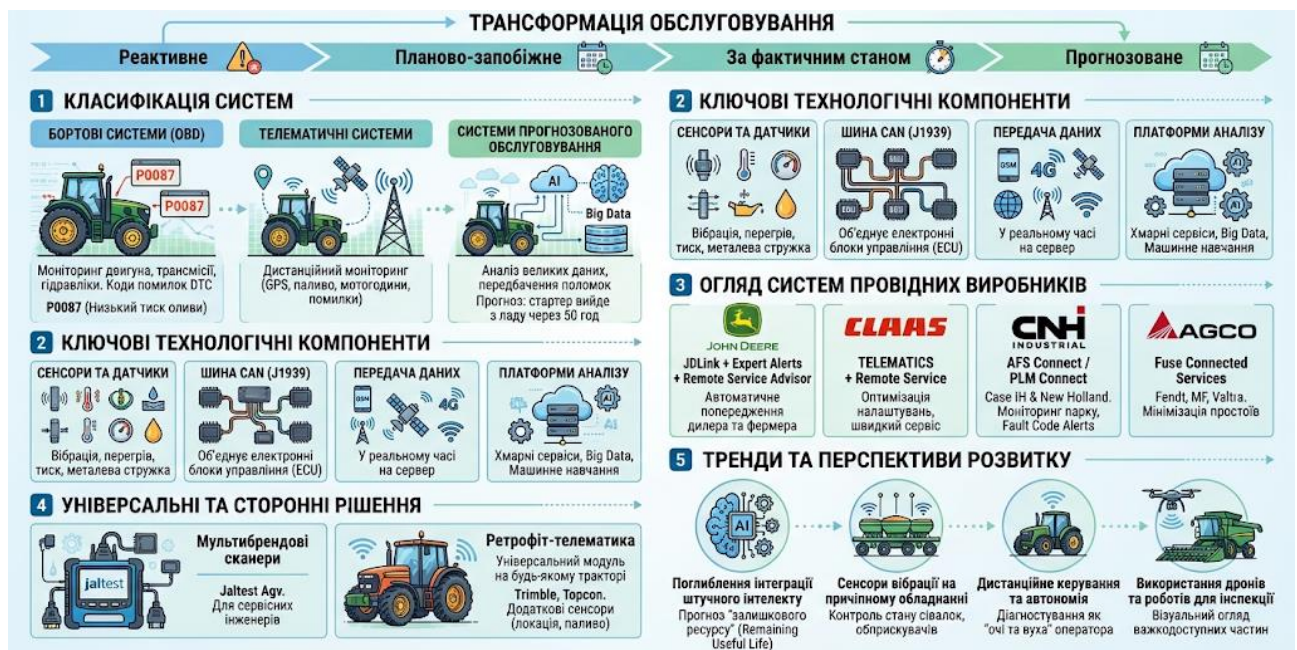


Рисунок 1.2 – Огляд наявних систем діагностування та моніторингу

Класифікація методів технічного діагностування.

Методи технічного діагностування сільськогосподарської техніки базуються на вимірюванні та аналізі фізичних параметрів, які змінюються в процесі деградації технічного стану агрегатів. Основними методами є вібраційна діагностика, термографія, аналіз мастил та електрична діагностика.

Вібраційна діагностика є одним з найбільш інформативних методів оцінки технічного стану обертових вузлів та механізмів. Вона базується на аналізі спектральних характеристик вібрацій, що виникають при роботі агрегатів. Дослідження показують, що зміна амплітудно-частотного спектра вібрацій дозволяє виявити такі дефекти, як дисбаланс, знос підшипників, порушення зачеплення зубчастих передач та розцентрування валів. Перевагами методу є висока чутливість до ранніх стадій деградації та можливість діагностування без розбирання агрегату. Недоліком залишається складність інтерпретації спектрів та необхідність кваліфікованого персоналу.

Термографія заснована на вимірюванні теплового випромінювання агрегатів у інфрачервоному діапазоні. Підвищення температури окремих вузлів свідчить про порушення процесів змащування, зростання сил тертя або погіршення умов охолодження. Метод дозволяє дистанційно виявляти

перегрів підшипників, гальмівних систем, електричних з'єднань та гідравлічних вузлів. Сучасні тепловізійні камери забезпечують точність вимірювання температури до 0,1 °С, що дозволяє виявляти навіть незначні відхилення від нормального теплового режиму.

Аналіз мастил є лабораторним методом, який дозволяє оцінити ступінь зносу деталей за вмістом продуктів зносу в мастилі. Визначається концентрація металів (залізо, мідь, хром, алюміній), наявність сторонніх домішок та зміна фізико-хімічних властивостей мастила. Метод є високоточним, але потребує відбору проб та лабораторного обладнання, що обмежує його застосування для оперативного моніторингу в польових умовах.

Електрична діагностика використовується для оцінки стану електричних систем, генераторів, стартерів, акумуляторних батарей та електронних блоків керування. Вимірюються напруга, струм, опір ізоляції та параметри електричних сигналів. Метод є критично важливим, оскільки дослідження надійності сільськогосподарської техніки свідчать, що електрообладнання має найнижчий середній наробіток на відмову серед основних систем.

Бортові системи моніторингу.

Бортові системи моніторингу встановлюються безпосередньо на сільськогосподарській техніці та забезпечують безперервний контроль параметрів її роботи. Сучасні дослідження в галузі діагностування сільськогосподарської техніки зосереджені на розробці пристроїв, що включають цифрові сенсори з фізичними модифікаторами (датчики тиску, температури, складу середовища та руху), аналого-цифрові перетворювачі з підсилювачами сигналів та програмне забезпечення для збору даних і формування рекомендацій [6].

Прикладом практичної реалізації є система дистанційного моніторингу, розроблена науковцями Федерального наукового агроінженерного центру ВІМ, яка була протестована на тракторі Kioti CK22.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система включала бортовий комп'ютер та вісім сенсорів, що дозволило отримати інформацію для оцінки поточного технічного стану трактора на основі динаміки восьми контрольованих параметрів, які характеризують поступову зміну функціональності машини та впливають на технічну й екологічну безпеку. Алгоритм дозволив забезпечити автоматичний контроль параметрів технічного стану агрегатів і вузлів машини шляхом документування фактів роботи в аварійних або передварійних режимах.

Дослідження ролі діагностики у підвищенні об'єктивності оцінки технічного стану сільськогосподарської техніки показують, що сучасні технічні пристрої все частіше оснащуються функцією безперервного моніторингу стану, що дає можливість постійно відслідковувати роботу машин та обладнання. Раннє виявлення несправностей включає комплекс заходів щодо виявлення виникаючих дефектів, визначення їхніх першопричин та ретельного аналізу характеру і ступеня розвитку цих проблем [7].

Супутникові системи моніторингу та телематичні платформи.

Супутникові технології відіграють дедалі важливішу роль у моніторингу сільськогосподарської техніки. Сучасні телематичні системи використовують супутникові мережі для геоприв'язки кожної механізованої операції, що дозволяє віддалено відслідковувати та контролювати переміщення машин, аналізуючи такі критичні параметри, як позиція, швидкість руху, навантаження двигуна та витрата пального [8].

Одним з найбільш значущих досягнень у цій сфері є впровадження стандарту ISOBUS, який забезпечує універсальну комунікацію між тракторами та обладнанням різних виробників. Протокол CANBUS, що лежить в основі ISOBUS, дозволяє зменшити складність кабельних з'єднань та підвищити надійність обміну даними між блоками керування [9]. Це створює передумови для інтеграції систем моніторингу технічного стану в єдиний інформаційний простір господарства.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження, присвячені використанню телематичних даних для оцінки пошкоджень трансмісії та залишкового ресурсу, демонструють можливість використання параметрів двигуна (крутний момент, швидкість) для розрахунку накопичених циклів навантаження та оцінки втомних пошкоджень зубчастих передач [10]. Такий підхід дозволяє не лише виявляти варіації пошкоджень між різними машинами, але й пов'язувати особливості експлуатації з інтенсивністю зносу.

Інтеграція супутникових даних з наземними IoT-сенсорами стає основою для створення комплексних систем моніторингу. Дослідження пропонують нову модель обслуговування сільськогосподарського виробництва на основі тривимірного просторово-часового моніторингу, яка поєднує дані супутників, безпілотних літальних апаратів та IoT-технологій для забезпечення точного й своєчасного моніторингу сільськогосподарських умов та оперативного керування технікою [11].

Австралійський досвід демонструє практичне застосування супутникового IoT для моніторингу сільськогосподарських активів. Компанія Mynriota розробила модуль, який інтегрується з масштабованим рішенням для моніторингу та підключається безпосередньо до наносупутникової мережі, забезпечуючи передачу IoT-даних з низькою вартістю та низьким енергоспоживанням. У сільськогосподарському контексті технологія дозволяє моніторити рівень і об'єм резервуарів, потік насосів, місцезнаходження активів, вологоміри та газові балони [12].

Системи прогнозування відмов на основі машинного навчання.

Сучасний напрям розвитку систем моніторингу технічного стану пов'язаний із застосуванням методів прогнозування відмов на основі машинного навчання. Традиційні підходи, які є реактивними або базуються на напрацюванні, визнаються недостатніми для сучасної сільськогосподарської техніки [16].

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосування IoT-сенсорів на тракторах, комбайнах та іншому обладнанні дозволяє відслідковувати такі критичні операційні параметри, як температура, вібрація, витрата пального та інші характеристики використання в режимі 24/7. Моделі машинного навчання аналізують ці дані для виявлення аномалій, прогнозування відмов компонентів та формування графіків обслуговування .

Дослідження підтверджують, що застосування машинного навчання до IoT-пристроїв дозволяє фермерам приймати рішення на основі даних, які стосуються сталості та оптимізації поточних операційних практик у сільському господарстві. Виявлено підвищення операційної ефективності, зниження витрат та покращення доступу до обладнання .

Фреймворк прогностики та управління станом (PHM) для сільськогосподарської техніки використовує передові технології збору даних та аналітики для моніторингу таких критичних параметрів, як напруга, струм, температура та операційні цикли, а також польові дані, прив'язані до GPS-координат та умов навколишнього середовища. Це дозволяє виявляти аномалії та потенційні відмови на ранніх стадіях . Дані, зібрані з машини, періодично передаються на сервер, де алгоритми штучного інтелекту аналізують інформацію для ідентифікації можливих відмов або оцінки безпеки машини. Переваги такого підходу включають значне скорочення незапланованих простоїв, зниження витрат на обслуговування та підвищення безпеки операторів .

Аналіз переваг та недоліків існуючих систем.

Узагальнюючи проведений огляд, можна виділити основні переваги та недоліки існуючих систем моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів.

Переваги сучасних систем:

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По-перше, вони забезпечують безперервний моніторинг стану техніки в реальному часі, що дозволяє виявляти відхилення від нормальних режимів роботи на ранніх стадіях. По-друге, інтеграція з супутниковими навігаційними системами та телематичними платформами дозволяє віддалено контролювати місцезнаходження та стан техніки. По-третє, застосування машинного навчання відкриває можливості для прогнозування залишкового ресурсу та планування обслуговування за фактичним станом .

Недоліки та обмеження:

Складність інтеграції різнорідних систем та відсутність єдиних стандартів обміну даними залишаються суттєвою проблемою. Висока вартість впровадження повних комплексів моніторингу обмежує їхнє застосування для малих та середніх господарств. Недостатня надійність бездротового зв'язку в сільській місцевості створює проблеми для передачі даних у реальному часі. Крім того, існує потреба в кваліфікованому персоналі для налаштування та обслуговування систем, а також у розвитку цифрових навичок у фермерів .

Дослідження наголошують на важливості доступності та простоті використання технологій для їхнього широкого впровадження. Відзначається, що впровадження точного землеробства залежить від таких факторів, як розмір господарства, обмін знаннями та фінансова підтримка, що підкреслює необхідність економічно ефективних, зручних для користувача технологій, освіти та підтримки, спеціально адаптованих для малих господарств .

Таким чином, проведений аналіз існуючих систем діагностування та моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів свідчить про наявність розвинених методів та технологій, які, однак, потребують подальшого вдосконалення в напрямку інтеграції, зниження вартості та підвищення доступності для широкого кола агровиробників.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Аналіз технологій IoT та їх застосування в агроінженерії

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) є однією з ключових технологій, що забезпечують цифрову трансформацію сільськогосподарського виробництва. За визначенням, IoT означає здатність пристроїв до машинно-машинної комунікації (Device-to-Machine, D2M), що є критично важливим компонентом розвитку цифрової економіки [10]. Інтеграція IoT з людиною забезпечує прийняття рішень у реальному часі в комунікації, співпраці та технологічній аналітиці [11]. У контексті агроінженерії IoT забезпечує безперервний збір даних про стан техніки, параметри навколишнього середовища та операційні характеристики агрегатів, що створює основу для переходу від планово-попереджувального обслуговування до обслуговування за фактичним станом (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Аналіз технологій IoT та їх застосування в агроінженерії
Стек технологій IoT для агроінженерії.

Технологічна архітектура IoT-систем для моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів включає чотири основні рівні: рівень сенсорів, рівень мікроконтролерів та обробки даних, рівень передачі даних та рівень хмарних платформ і аналітики.

Сенсорне забезпечення є фундаментом будь-якої IoT-системи. Для моніторингу технічного стану сільськогосподарської техніки

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

використовуються різноманітні типи сенсорів, що вимірюють фізичні параметри роботи агрегатів. Сучасні дослідження виділяють такі категорії сенсорів: температурні (термопари, термістори, інфрачервоні датчики), вібраційні (акселерометри, п'єзоелектричні датчики), тиску (тензометричні, п'єзорезистивні), витрати рідини та газу, а також електричні (датчики струму, напруги, опору) . Для моніторингу параметрів навколишнього середовища використовуються сенсори температури, вологості та атмосферного тиску. Дослідження демонструють, що інтегровані сенсори, такі як BME280 від Bosch, здатні одночасно вимірювати температуру, вологість та атмосферний тиск з низьким енергоспоживанням (до 4,2 мкА в ультранизькому режимі) . Для ґрунтового моніторингу застосовуються датчики вологості, температури та електропровідності ґрунту [12].

Мікроконтролери виконують функції збору, попередньої обробки та передачі даних від сенсорів. Аналіз наукової літератури свідчить, що найбільш популярними платформами для кінцевих пристроїв у смарт-фермерстві є Arduino, ESP32, NodeMCU, ESP8266, ARM Cortex-A та Libelium . Ці платформи використовуються завдяки їхній економічній ефективності, відкритому коду та здатності зчитувати дані з сенсорів і виконувати попередньо визначені відповіді . Для прототипування широко застосовуються плати на базі STM32, зокрема STM32F411CEU6 на платі BlackPill, які забезпечують баланс між універсальністю, продуктивністю та низьким енергоспоживанням (близько 8 мА при частоті 80 МГц) . ESP32-CAM є популярним вибором для систем, що потребують відеоспостереження та передачі зображень, завдяки вбудованому Wi-Fi модулю та камері [13].

Протоколи передачі даних визначають можливості IoT-систем щодо дальності зв'язку, енергоспоживання та пропускної здатності. Аналіз мережевих технологій для IoT виділяє такі основні протоколи: Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRaWAN та NB-IoT . Кожен з них має свої характеристики та сфери оптимального застосування.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Wi-Fi забезпечує високу пропускну здатність (до 100 Мбіт/с і більше) та широку розповсюдженість, однак має високе енергоспоживання та обмежену дальність (до 100 м у приміщенні, до 300 м на відкритому просторі). Цей протокол доцільно використовувати для систем, що працюють у безпосередній близькості до точки доступу, наприклад, для стаціонарних пунктів моніторингу або передачі великих обсягів даних (відеопотоків).

ZigBee є енергоефективним протоколом з підтримкою mesh-топології, що дозволяє створювати самовідновлювані мережі з великою кількістю вузлів. Дальність передачі становить до 100 м, швидкість — до 250 кбіт/с. ZigBee широко використовується в сільськогосподарському IoT завдяки низькому енергоспоживанню та економічній ефективності. Цей протокол оптимальний для створення локальних мереж сенсорів у межах однієї ферми або комплексу будівель.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) є представником технологій LPWAN (Low Power Wide Area Network), що забезпечують дальність передачі до 10–15 км на відкритій місцевості при надзвичайно низькому енергоспоживанні. Швидкість передачі даних становить від 0,3 до 50 кбіт/с, що є достатнім для передачі телеметричних даних (температура, вібрація, тиск) з періодичністю від кількох секунд до годин. Дослідження показують, що використання LoRaWAN набуло широкого розповсюдження в сільському господарстві в останні роки [14]. Цей протокол є оптимальним вибором для моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів, що працюють на значній відстані від інфраструктури зв'язку.

NB-IoT (Narrowband IoT) використовує ліцензований стільниковий спектр і забезпечує швидкість передачі близько 55 кбіт/с при середньому енергоспоживанні та дальності до 10 км. Цей протокол має перевагу високої надійності та безпеки завдяки використанню ліцензованого спектру, однак потребує покриття стільникової мережі, що може бути обмеженим у віддалених сільських районах.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хмарні платформи забезпечують зберігання, обробку та візуалізацію даних, що надходять від IoT-пристроїв. Сучасні дослідження підкреслюють важливість використання хмарних технологій та предиктивної аналітики в агроінженерії . Хмарна архітектура включає такі компоненти: шлюзи для агрегації даних, сервіси повідомлень реального часу (MQTT, CoAP), сховища часових рядів для зберігання телеметричних даних та інтерактивні сервіси візуалізації . Інтеграція хмарних платформ з моделями машинного навчання дозволяє реалізувати прогнозу аналітику для оцінки залишкового ресурсу агрегатів [15].

Приклади застосування IoT в агроінженерії.

Практичне застосування IoT в агроінженерії охоплює широкий спектр завдань, від моніторингу стану техніки до управління технологічними процесами.

Моніторинг технічного стану сільськогосподарської техніки є одним з найбільш перспективних напрямів. Дослідження демонструють розробку систем дистанційного моніторингу, що включають бортовий комп'ютер та вісім сенсорів, які дозволяють оцінювати поточний технічний стан трактора на основі динаміки контрольованих параметрів . Алгоритми забезпечують автоматичний контроль параметрів технічного стану агрегатів шляхом документування фактів роботи в аварійних або передварійних режимах . Інтеграція IoT-сенсорів з моделями машинного навчання дозволяє прогнозувати відмови компонентів та формувати графіки обслуговування за фактичним станом [16].

Моніторинг параметрів навколишнього середовища є ще однією важливою сферою застосування IoT. Системи, що включають сенсори температури, вологості, якості повітря та вологості ґрунту, забезпечують безперервний моніторинг умов вирощування сільськогосподарських культур .

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження пропонують інтегровану архітектуру IoT та сенсорних мереж для моніторингу та адаптивного контролю в сільському господарстві, що включає багатопараметричні сенсорні вузли, бездротовий зв'язок з низьким енергоспоживанням, агрегацію даних на шлюзах та хмарну аналітику [17]. Така архітектура забезпечує перехід від ізольованих вимірювань до безперервної ситуаційної обізнаності та контекстно-залежного втручання [18].

Системи точного землеробства використовують IoT для оптимізації використання ресурсів та підвищення врожайності. Дослідження показують, що IoT-технології дозволяють фермерам приймати рішення на основі даних, які стосуються сталості та оптимізації поточних операційних практик. Системи моніторингу вологості ґрунту, погодних станцій та стану рослин забезпечують точне управління зрошенням, внесенням добрив та захистом рослин. Інтеграція IoT з супутниковими навігаційними системами дозволяє створювати карти врожайності та диференційовано застосовувати агротехнічні заходи [19].

Моніторинг якості сільськогосподарської продукції також використовує IoT-технології. Дослідження демонструють застосування IoT для моніторингу міжзернових змінних у кукурудзі та соєвих бобах під час транспортування, сушіння та зберігання, з інтеграцією сенсорів з моделями штучного інтелекту для прогнозування якості зерна. Це дозволяє мінімізувати втрати продукції та забезпечити її відповідність вимогам якості.

Енергоефективність та сталість є важливими аспектами застосування IoT в агроінженерії. Дослідження підкреслюють, що в умовах зміни клімату, екстремальних погодних умов та екологічних обмежень інтелектуальне сільське господарство на базі IoT може зменшити відходи та підвищити продуктивність для виробників. Оптимізація використання палива, води та добрив на основі даних IoT сприяє зниженню вуглецевого сліду та підвищенню сталості агровиробництва.

Проблеми та виклики впровадження IoT в агроінженерії.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Незважаючи на значний потенціал, впровадження IoT в агроінженерії стикається з низкою проблем та викликів, які необхідно враховувати при розробці систем моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів.

Проблема енергоспоживання є однією з найбільш критичних для автономних систем, що працюють на мобільній техніці. Обмеженість енергетичних ресурсів вимагає використання енергоефективних сенсорів та протоколів передачі даних. Дослідження підкреслюють, що енергоефективність є ключовим фактором для забезпечення тривалої автономної роботи IoT-пристроїв у польових умовах. Використання протоколів LPWAN, таких як LoRaWAN, дозволяє досягти значного зниження енергоспоживання порівняно з традиційними стільниковими технологіями [20].

Проблема надійності зв'язку в сільській місцевості є суттєвим викликом. Віддалені поля часто не мають покриття стільникових мереж, що обмежує використання NB-IoT та інших технологій, що залежать від інфраструктури операторів. LoRaWAN та ZigBee з підтримкою mesh-топології забезпечують можливість створення автономних мереж, однак вимагають розгортання шлюзів та ретрансляторів [21]. Дослідження розробляють програмні рішення для подолання обмежень дальності передачі шляхом ретрансляції повідомлень через мережу, де кожен модуль виконує функції вузла маршрутизації [21].

Проблема інтероперабельності виникає через використання різномірних сенсорів, протоколів та платформ від різних виробників. Відсутність єдиних стандартів обміну даними ускладнює інтеграцію IoT-систем у єдиний інформаційний простір господарства [20]. Стандарт ISOBUS (ISO 11783) забезпечує універсальну комунікацію між тракторами та обладнанням, однак його підтримка не є загальною для всіх виробників [22].

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проблема вартості обмежує впровадження IoT-систем для малих та середніх господарств. Дослідження підкреслюють, що існуючі IoT-системи часто мають високу вартість через використання дорогих сенсорів та пропрієтарних технологій, що робить їх недоступними для дрібних фермерів. Розробка низьковартісних рішень на базі ESP32 та LoRa є перспективним напрямом, що дозволяє знизити вартість впровадження. Дослідження також вказують на важливість доступності та простоти використання технологій для їхнього широкого впровадження [3].

Проблема кваліфікації персоналу є суттєвою перешкодою для впровадження IoT-систем. Ефективне використання IoT-рішень вимагає від фермерів та технічного персоналу цифрових навичок, які часто відсутні. Дослідження наголошують на необхідності освіти та підтримки, спеціально адаптованих для малих господарств [19]. Розробка інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів та автоматизація процесів налаштування є важливими напрямками подолання цього виклику.

Проблема кібербезпеки стає дедалі більш актуальною в міру зростання кількості підключених пристроїв та обсягів даних. IoT-системи в агроінженерії збирають конфіденційну інформацію про технологічні процеси, продуктивність техніки та врожайність, що робить їх потенційною мішенню для кібератак. Забезпечення безпеки передачі даних, автентифікації пристроїв та захисту від несанкціонованого доступу є критично важливими для довіри користувачів до IoT-систем [20].

Проблема масштабованості виникає при розширенні IoT-систем на великі господарства з сотнями або тисячами підключених пристроїв. Забезпечення стабільної роботи мережі при високій щільності сенсорів вимагає ретельного планування топології, вибору протоколів та архітектури обробки даних. Дослідження аналізують пропускну здатність бездротових мереж в умовах високої щільності сенсорів та моделюють вплив щільності пристроїв на продуктивність мережі [21].

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проблема інтеграції з існуючими системами управління господарством (ERP, FMIS) є важливою для забезпечення практичної цінності IoT-даних. Інтеграція IoT-систем з платформами управління фермою вимагає стандартизації форматів даних та розробки відповідних API. Стандарт ISO 11783 (ISOBUS) визначає обмін даними між системами управління фермою (FMIS) у форматі ISO-XML, однак його впровадження залишається обмеженим [22].

Таким чином, технології IoT мають значний потенціал для підвищення ефективності моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів. Існуючі проблеми та виклики, такі як енергоспоживання, надійність зв'язку, інтероперабельність, вартість та кваліфікація персоналу, визначають напрями подальших досліджень та розробок. Для успішного впровадження IoT-систем в агроінженерії необхідний комплексний підхід, що поєднує технологічні інновації, економічну доступність та освітню підтримку.

1.4 Методи прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу обладнання

Прогнозування відмов та оцінка залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) є ключовими компонентами системи обслуговування за фактичним станом. Відповідно до ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016, прогнозування в системі технічного обслуговування і ремонту (ТОiP) являє собою оцінку часу до відмови та ймовірності виникнення відмови, яка ґрунтується на підтверджених досвідом знаннях про процеси розвитку несправностей різного виду. Ефективність прогнозу залежить від того, наскільки добре відомі та описані моделлю види несправностей і відмов для машин даного виду, як вони залежать від строку служби та конструктивного виконання конкретної машини, яким чином вони розвиваються у часі. Прогнозування є третім етапом повного циклу контролю технічного стану машин (після виявлення відхилення

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та виявлення несправностей) і повинно передувати прийняттю рекомендацій щодо коригувальних дій.

Сучасні методи прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу обладнання можна класифікувати за трьома основними підходами: статистичні (моделі на основі даних), фізичні (моделі на основі фізичних процесів) та методи машинного навчання. Гібридні моделі поєднують переваги різних підходів для підвищення точності прогнозування (рисунок 1.4).

Статистичні методи прогнозування. Статистичні методи базуються на аналізі даних про поведінку групи однотипних елементів та побудові ймовірнісних моделей відмов. Вони не вимагають глибокого розуміння фізичних процесів деградації, однак потребують значних обсягів статистичних даних.

Аналіз виживаності (Survival Analysis) є одним з найбільш поширених статистичних методів для оцінки надійності сільськогосподарської техніки. Дослідження, присвячені аналізу телеметричних даних сільськогосподарських машин, демонструють застосування оцінки Каплана-Мейєра для побудови кривих виживаності залежно від напрацювання. Результати показують, що ймовірність безвідмовної роботи машин становить 99,4% при 3000 годинах напрацювання, однак значно знижується до 36,6% при 5000 годинах, що вказує на критичні часові рамки для проведення профілактичного обслуговування. Такий підхід дозволяє визначити оптимальні моменти для планового обслуговування та виявити моделі шасі, які потребують більш частого моніторингу.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.4 – Методи прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу обладнання

Моделі Вейбулла та експоненційні моделі використовуються для опису розподілу напрацювання до відмови. Ці моделі дозволяють оцінити параметри форми та масштабу розподілу, що характеризують інтенсивність відмов на різних етапах життєвого циклу обладнання. Для сільськогосподарської техніки характерним є зростаючий параметр форми (більше одиниці), що свідчить про збільшення інтенсивності відмов з часом внаслідок зносу та старіння.

Регресійні моделі встановлюють залежність між показниками надійності та факторами, що впливають на неї. Дослідження показують, що такі фактори, як вік машини, частота обслуговування, умови експлуатації та навантаження, суттєво впливають на довговічність сільськогосподарської техніки. Регресійні моделі дозволяють кількісно оцінити вплив кожного фактора та побудувати прогнозні моделі для конкретних умов експлуатації.

Методи часових рядів, зокрема ARIMA та Bayesian Inference, використовуються для аналізу та прогнозування часових рядів діагностичних сигналів. Ці методи дозволяють виявляти тренди деградації та прогнозувати

їхній розвиток у часі. Дослідження підтверджують ефективність методів часових рядів для прогнозування залишкового ресурсу обладнання.

Фізичні методи прогнозування. Фізичні методи базуються на математичному описі процесів деградації, що відбуваються в обладнанні. Вони дозволяють отримати більш точні прогнози, ніж статистичні методи, однак вимагають глибокого розуміння фізики процесів та значних обчислювальних ресурсів.

Аналіз втомної довговічності є ключовим фізичним методом для оцінки ресурсу деталей сільськогосподарської техніки, що працюють під дією циклічних навантажень. Дослідження втомної довговічності зернозбиральних комбайнів включають збір та обробку спектрів навантажень, аналіз напружень та деформацій, прогнозування втомної довговічності та оцінку надійності . Загальна процедура прогнозування втомної довговічності включає інтеграцію віртуального моделювання (метод скінченних елементів, FEA) з емпіричними даними (криві S-N матеріалів та спектри навантажень польових випробувань) та теоретичними основами (теорія кумулятивного пошкодження) для отримання прогнозу довговічності критичних компонентів .

Метод скінченних елементів (FEA) використовується для моделювання напружено-деформованого стану ключових компонентів сільськогосподарської техніки, таких як рама шасі, мости, жатка, молотильний барабан та інші. FEA дозволяє визначити розподіл напружень, ідентифікувати зони концентрації напружень та визначити місця максимальних напружень . Для систем, де необхідно враховувати зв'язок між гнучкістю компонентів та рухом твердого тіла, застосовується спільне моделювання багатотілової динаміки (MBD) та FEA.

Експериментальний аналіз напружень за допомогою тензодатчиків використовується для вимірювання структурних напружень безпосередньо та для валідації точності моделей FEA.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Експериментальний модальний аналіз застосовується для визначення модальних параметрів (власних частот, коефіцієнтів демпфування, форм коливань) та валідації моделей FEA.

Моделі деградації на основі фізичних процесів включають опис процесів в елементах машини як у нормальних умовах, так і в умовах несправностей. Ці моделі дозволяють прогнозувати розвиток деградації в часі на основі фундаментальних фізичних законів (знос, втома, корозія, деформація). Однак складність сільськогосподарської техніки та різноманітність умов експлуатації обмежують застосування чисто фізичних моделей для комплексного прогнозування.

Методи машинного навчання для прогнозування.

Методи машинного навчання (ML) набули широкого розповсюдження для прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу завдяки здатності виявляти складні нелінійні залежності в даних без необхідності явного опису фізичних процесів. Дослідження показують, що за останнє десятиліття спостерігається стійке зростання публікацій на тему застосування штучного інтелекту в сільському господарстві, причому Китай (26,77%), США (13,35%) та Індія (12,37%) забезпечують понад 50% публікацій.

Штучні нейронні мережі (ANN) є одним з найбільш потужних інструментів для прогнозування залишкового ресурсу. Згорткові нейронні мережі (CNN) ефективно застосовуються для обробки одновимірних сигналів вібрації та струму, автоматично витягуючи просторові ознаки деградації. Дослідження демонструють, що гібридна архітектура CNN-LSTM дозволяє досягти похибки прогнозування залишкового ресурсу в діапазоні 3–4%, що вважається хорошим результатом. Гібридні моделі CNN-LSTM лідирують за точністю прогнозу залишкового ресурсу (97–98%) та виявленням аномалій.

Рекурентні нейронні мережі (RNN) та їхній різновид – довготривала короткочасна пам'ять (LSTM) – є особливо ефективними для аналізу часових рядів діагностичних сигналів. LSTM-мережі здатні зберігати довгострокову

пам'ять про характеристики використання машини, а не лише про останні					Аркуш
					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
					33

вимірювання [13]. Дослідження підтверджують ефективність LSTM для прогнозування залишкового ресурсу роторного обладнання. Гібридні моделі, що поєднують CNN та LSTM, демонструють найкращі результати для прогнозування деградації в часі [12].

Дерева рішень та ансамблеві методи (Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost) добре працюють на табличних та розріджених даних. Ці методи забезпечують інтерпретованість результатів та стійкість до перенавчання. Дослідження показують, що Random Forest та XGBoost широко використовуються для прогнозування залишкового ресурсу та виявлення аномалій у сільськогосподарській техніці.

Методи опорних векторів (SVM) застосовуються для класифікації станів обладнання та виявлення аномалій. Дослідження демонструють використання SVM для діагностування несправностей роторного обладнання на основі аналізу вібраційних сигналів. One-Class SVM ефективно використовується для виявлення рідкісних аномалій, коли дані про відмови обмежені.

Автоенкодери та методи виявлення аномалій використовуються для виявлення відхилень від нормального стану без необхідності розмічених даних про відмови. Autoencoder, Isolation Forest та One-Class SVM є популярними методами для виявлення аномалій у складних системах. Дослідження демонструють використання автоенкодерів для виявлення аномалій у часових рядах промислового IoT.

Трансформерні мережі є сучасним напрямом у прогнозуванні залишкового ресурсу. Дослідження пропонують інтегровану модель Transformer та ядерної оцінки щільності (KDE) для ймовірнісного прогнозування залишкового ресурсу. Ця модель дозволяє отримати функцію щільності ймовірності часу відмови системи, що забезпечує цінну інформацію для подальшого прийняття рішень щодо обслуговування. Порівняно з існуючими дослідженнями, запропонована інтегрована модель дозволяє підвищити точність прогнозування.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Гібридні моделі поєднують переваги різних підходів для підвищення точності прогнозування. Дослідження підкреслюють ефективність гібридних моделей, що поєднують фізичні моделі для найбільш критичних несправностей та моделі на основі даних для інших. Ensemble Modelling використовується для аналізу часових рядів та підвищення надійності прогнозів.

Метрики оцінки точності прогнозування.

Оцінка точності прогнозування залишкового ресурсу вимагає використання комплексу метрик, які характеризують різні аспекти якості прогнозу.

Середня абсолютна похибка (MAE) вимірює середнє абсолютне відхилення прогнозованого залишкового ресурсу від фактичного значення. Ця метрика є інтуїтивно зрозумілою та стійкою до викидів. Для сільськогосподарської техніки прийнятним вважається значення MAE в межах 5–10% від номінального ресурсу.

Середня квадратична похибка (MSE) та корінь із середньої квадратичної похибки (RMSE) надають більшої ваги великим похибкам, що важливо для критичних компонентів, де велика похибка може призвести до раптової відмови. RMSE вимірюється в тих самих одиницях, що й прогнозована величина (години, цикли), що полегшує інтерпретацію.

Коефіцієнт детермінації (R^2) характеризує частку дисперсії фактичних значень, яка пояснюється моделлю. Значення R^2 близьке до одиниці свідчить про високу якість прогнозу. Для прогнозування залишкового ресурсу сільськогосподарської техніки дослідження демонструють значення R^2 понад 0,9 для найкращих моделей.

Похибка в межах допустимого інтервалу (α - λ accuracy) є спеціалізованою метрикою для прогнозування залишкового ресурсу, яка визначає, чи потрапляє прогноз у заданий довірчий інтервал. Ця метрика дозволяє оцінити надійність прогнозу та його придатність для прийняття рішень щодо обслуговування.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ		Аркуш
							35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Метрики раннього виявлення аномалій включають точність, повноту та F1-міру для задач класифікації станів обладнання. Дослідження показують, що для виявлення аномалій у сільськогосподарській техніці досягається точність понад 95%.

Час випередження прогнозу (Prognostic Horizon) визначає, наскільки завчасно система може попередити про майбутню відмову. Ця метрика є критично важливою для планування обслуговування та закупівлі запасних частин. Дослідження демонструють, що сучасні системи прогнозування здатні забезпечити час випередження від кількох днів до кількох тижнів залежно від типу обладнання та швидкості розвитку деградації.

Економічні метрики оцінюють ефективність прогнозування з точки зору зниження витрат на обслуговування та підвищення доступності обладнання. Дослідження показують, що впровадження прогнозного обслуговування дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування і ремонт на 25–30% та підвищити продуктивність на 20–25%.

Таким чином, методи прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу обладнання становлять розвинену галузь знань з широким спектром підходів, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Для сільськогосподарської техніки найбільш перспективними є гібридні підходи, що поєднують фізичні моделі деградації з методами машинного навчання, що дозволяє досягти високої точності прогнозування в умовах обмежених даних про відмови.

Проблематика традиційного технічного обслуговування: раптові відмови, простої техніки та економічні втрати.

Традиційна система технічного обслуговування сільськогосподарської техніки, заснована на планово-попереджувальному принципі, має низку суттєвих недоліків, які призводять до значних економічних втрат та зниження ефективності агровиробництва. Аналіз цих недоліків дозволяє обґрунтувати необхідність переходу до обслуговування за фактичним станом (Рисунок 1.5).

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.5 – Проблематика традиційного технічного обслуговування (ТТО).

Недоліки планово-попереджувального обслуговування.

Планово-попереджувальне обслуговування (Planned Preventive Maintenance, PPM) базується на напрацюванні (мото-годинах) або календарних строках і передбачає виконання регламентних робіт через визначені інтервали. Незважаючи на простоту та передбачуваність, цей підхід має фундаментальні обмеження.

Неврахування фактичного стану обладнання. Планово-попереджувальне обслуговування не враховує фактичний технічний стан кожного конкретного агрегату та умови його експлуатації. Дослідження підкреслюють, що традиційні регламентовані або реактивні підходи до обслуговування, засновані на періодичності або усуненні наслідків, часто виявляються надлишковими або, навпаки, не встигають запобігти аваріям. Це призводить до двох протилежних проблем: передчасного обслуговування з надлишковими витратами або недостатнього обслуговування з ризиком раптових відмов.

Фіксовані інтервали не відображають реальну швидкість деградації.

Швидкість зносу та деградації обладнання залежить від багатьох факторів: умов експлуатації, навантаження, якості палива та мастил, кваліфікації оператора, погодних умов. Два однакових агрегати, що працюють у різних умовах, можуть мати суттєво різний фактичний стан при однаковому напрацюванні. Планово-попереджувальне обслуговування не враховує цієї варіабельності.

Надлишкове обслуговування. Дослідження показують, що значна частина регламентних робіт виконується передчасно, коли обладнання ще не досягло граничного стану. Це призводить до надлишкових витрат на запасні частини, мастильні матеріали та оплати праці. Крім того, передчасне втручання в роботу обладнання може призвести до порушення припрацювання деталей та зниження їхнього ресурсу.

Недостатнє обслуговування. З іншого боку, фіксовані інтервали можуть бути занадто довгими для обладнання, що працює в інтенсивних умовах. Це призводить до того, що обладнання досягає граничного стану до проведення чергового обслуговування, що підвищує ймовірність раптової відмови. Дослідження підкреслюють, що 54% відмов зернозбиральних комбайнів класифікуються як експлуатаційні, а 91,2% — як раптові.

Обмежена ефективність для складних систем. Сучасна сільськогосподарська техніка є складною системою, що включає механічні, гідравлічні, електричні та електронні компоненти. Для таких систем планово-попереджувальне обслуговування є недостатньо ефективним, оскільки різні компоненти мають різні механізми деградації та різні оптимальні інтервали обслуговування.

Статистика раптових відмов сільськогосподарської техніки.

Раптові відмови є однією з найбільш серйозних проблем традиційного технічного обслуговування. Вони виникають без попереджувальних ознак і

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводять до незапланованих простоїв техніки, порушення агротехнічних строків та значних економічних втрат.

Класифікація відмов за характером виникнення. Дослідження надійності зернозбиральних комбайнів показують, що 91,2% відмов виникають раптово, тоді як лише 8,8% відмов можна класифікувати як поступові. При цьому 54% відмов мають експлуатаційний характер, тобто пов'язані з умовами експлуатації, а не з конструктивними дефектами або виробничими недоліками.

Розподіл відмов за компонентами. Аналіз відмов сільськогосподарської техніки свідчить про нерівномірний розподіл відмов між різними системами та компонентами. Дослідження виявили, що найбільша кількість відмов припадає на різальний апарат (38,1%), тоді як відмови двигуна та ходової частини становлять лише 1,5% та 1,1% відповідно. Однак час усунення відмов у двигуні та ходовій частині є значно тривалішим — 5,8 та 4,2 години відповідно, порівняно з 30 хвилинами для різального апарату.

Показники безвідмовності. Дослідження надійності тракторів різних виробників демонструють суттєві відмінності в показниках безвідмовності. Середній час напрацювання на відмову для тракторів різних марок коливається від 1252 до 1944 годин, а коефіцієнт готовності — від 0,967 до 0,979. Водночас дослідження відмов агрегатів і систем сільськогосподарської техніки засвідчують, що найбільший середній наробіток на відмову характерний для трансмісії (1042,6 години) та ходової частини (858,6 години), тоді як електрообладнання має найнижчий показник — 336,5 години.

Сезонність відмов. Відмови сільськогосподарської техніки мають виражений сезонний характер. Пік відмов припадає на періоди найбільш інтенсивного використання техніки — весняно-польові роботи та збирання врожаю. У ці періоди навантаження на техніку зростає в кілька разів, а наслідки відмов є найбільш критичними через жорсткі агротехнічні строки.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Економічні втрати від простоїв техніки.

Економічні втрати від простоїв сільськогосподарської техніки мають складну структуру і включають як прямі витрати на ремонт, так і непрямі втрати, пов'язані з порушенням графіків робіт.

Прямі витрати на ремонт. Прямі витрати включають вартість запасних частин, мастильних матеріалів, оплату праці ремонтного персоналу та вартість послуг сервісних організацій. Дослідження показують, що вартість ремонту складних компонентів, таких як двигун або трансмісія, може сягати 10–30% від вартості нової машини. При цьому раптові відмови вимагають більш термінового ремонту, що часто супроводжується підвищеними витратами через необхідність залучення додаткових ресурсів.

Втрати від порушення агротехнічних строків. Агротехнічні строки є критичним фактором, що визначає врожайність сільськогосподарських культур. Дослідження показують, що затримка з виконанням польових робіт призводить до лінійного або нелінійного зниження врожайності залежно від культури та конкретної операції. Для такої культури, як ріпак, втрата лише одного дня в період посівної може становити до 1,5% урожаю. За врожайності 2,3 тонни з гектара та ціни 450 доларів за тонну щоденні збитки сягають 15 доларів з кожного гектара. Для господарств із земельним банком у сотні чи тисячі гектарів це може означати втрату десятків тисяч доларів лише через затримку старту робіт.

Втрати від зниження якості продукції. Порушення агротехнічних строків призводить не лише до зниження врожайності, але й до погіршення якості продукції. Для овочевих культур, таких як перець, томати, баклажани, затримка зі збиранням може призвести до перезрівання, зниження товарного вигляду та вмісту поживних речовин. Це призводить до зниження ціни реалізації та втрати частини доходу.

Витрати на оренду техніки. Для компенсації простоїв власної техніки господарства часто змушені орендувати техніку в сторонніх організацій.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вартість оренди в піковий сезон значно зростає, а доступність техніки може бути обмеженою. Це створює додаткове фінансове навантаження на господарство.

Втрати від понаднормових робіт. Для компенсації затримок, спричинених простоями, господарства змушені організовувати понаднормові роботи, що призводить до додаткових витрат на оплату праці та підвищеного зносу техніки. Крім того, робота в понаднормовий час підвищує ймовірність помилок операторів та виникнення аварійних ситуацій.

Кумулятивний ефект простоїв. Економічні втрати від простоїв мають кумулятивний характер: затримка на одній операції призводить до затримки всіх наступних операцій, що може призвести до порушення всього технологічного циклу вирощування культури. Особливо критичними є простої під час збиральної кампанії, коли втрати врожаю зростають експоненційно з кожним днем затримки.

Обґрунтування переходу до обслуговування за фактичним станом.

Аналіз недоліків традиційного технічного обслуговування та масштабів економічних втрат від раптових відмов обґрунтовує необхідність переходу до обслуговування за фактичним станом (Condition-Based Maintenance, CBM) та прогнозного обслуговування (Predictive Maintenance, PdM).

Сутність обслуговування за фактичним станом. Обслуговування за фактичним станом передбачає виконання ремонтних робіт на основі даних про фактичний технічний стан обладнання, отриманих шляхом безперервного або періодичного моніторингу. Це дозволяє виконувати обслуговування тоді, коли воно дійсно необхідне, уникаючи як передчасного, так і запізненого втручання.

Переваги обслуговування за фактичним станом. Дослідження показують, що впровадження обслуговування за фактичним станом дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування і ремонт на 25–30% та підвищити продуктивність на 20–25%. Це досягається за рахунок зниження

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кількості незапланованих простоїв, оптимізації використання запасних частин та зменшення обсягу надлишкових регламентних робіт.

Технологічна основа переходу. Перехід до обслуговування за фактичним станом став можливим завдяки розвитку технологій IoT, сенсорів, бездротових мереж передачі даних та методів машинного навчання. Дослідження підкреслюють, що інтеграція IoT та edge computing технологій забезпечує віддалений моніторинг та автономне прийняття рішень для польового обладнання.

Економічна доцільність. Економічна доцільність переходу до обслуговування за фактичним станом підтверджується розрахунками, які показують, що інвестиції в системи моніторингу окупаються протягом 1–2 років за рахунок зниження витрат на обслуговування та зменшення втрат від простоїв. Для господарств із значним парком техніки економічний ефект є особливо суттєвим.

Виклики впровадження. Незважаючи на очевидні переваги, впровадження обслуговування за фактичним станом стикається з низкою викликів, включаючи високу вартість сенсорів та систем моніторингу, складність інтеграції з існуючими системами управління, необхідність накопичення даних для навчання моделей прогнозування та потребу в кваліфікованому персоналі. Дослідження наголошують на важливості доступності та простоти використання технологій для їхнього широкого впровадження.

Таким чином, аналіз проблематики традиційного технічного обслуговування свідчить про необхідність переходу до обслуговування за фактичним станом. Раптові відмови, які становлять понад 90% відмов сільськогосподарської техніки, призводять до значних економічних втрат, пов'язаних з порушенням агротехнічних строків, зниженням врожайності та якості продукції. Впровадження систем дистанційного моніторингу технічного стану на базі технологій IoT та методів прогнозування відмов

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє суттєво знизити ці втрати та підвищити ефективність агровиробництва.

Обґрунтування напрямку дослідження. На основі проведеного аналізу встановлено, що існуючі системи моніторингу та прогнозування відмов сільськогосподарської техніки потребують подальшого вдосконалення в напрямку інтеграції IoT-технологій, розробки ефективних алгоритмів прогнозування на основі машинного навчання та зниження вартості впровадження для широкого кола агровиробників. Це обґрунтовує необхідність розробки системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів з використанням технологій IoT та прогнозування відмов, що є метою даної магістерської роботи.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Значення технічного обслуговування та моніторингу. Встановлено, що технічне обслуговування та моніторинг стану сільськогосподарської техніки є ключовими факторами забезпечення ефективності агровиробництва. Своєчасність виконання агротехнічних операцій безпосередньо впливає на врожайність культур, а затримка навіть одного дня в критичні періоди може призвести до втрати до 1,5% урожаю. В умовах скорочення машинно-тракторного парку України (кількість тракторів зменшилася на 68%, комбайнів — на 71%) навантаження на наявну техніку суттєво зросло, що підвищує ризик відмов та актуалізує потребу в ефективних системах моніторингу.

2. Аналіз існуючих систем діагностування. Проведено класифікацію методів технічного діагностування сільськогосподарської техніки, серед яких виділено вібраційну діагностику, термографію, аналіз мастил та електричну діагностику. Встановлено, що найбільш вразливими елементами техніки є електрообладнання (середній наробіток на відмову 336,5 години), тоді як трансмісія та ходова частина мають значно вищі показники (1042,6 та 858,6 години відповідно). Аналіз бортових, супутникових та телематичних систем моніторингу показав, що сучасні рішення забезпечують безперервний контроль параметрів роботи техніки, однак мають обмеження щодо інтеграції, вартості та доступності для малих і середніх господарств.

3. Аналіз технологій IoT. Досліджено стек технологій IoT для агроінженерії, що включає сенсорне забезпечення (температурні, вібраційні, тензOMETричні датчики), мікроконтролери (Arduino, ESP32, STM32), протоколи передачі даних (Wi-Fi, ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT) та хмарні платформи. Встановлено, що LoRaWAN є оптимальним вибором для моніторингу сільськогосподарської техніки завдяки дальності передачі до 10–15 км при низькому енергоспоживанні.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначено основні проблеми впровадження IoT: енергоспоживання, надійність зв'язку в сільській місцевості, інтероперабельність, вартість, кваліфікація персоналу та кібербезпека.

4. Методи прогнозування відмов. Проаналізовано три основні підходи до прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу: статистичні (аналіз виживаності, моделі Вейбулла, регресійні моделі), фізичні (аналіз втомної довговічності, метод скінченних елементів, експериментальний аналіз напружень) та методи машинного навчання (нейронні мережі, дерева рішень, SVM, ансамблеві методи, трансформерні мережі). Встановлено, що гібридні моделі, які поєднують CNN та LSTM, демонструють найкращі результати для прогнозування деградації в часі з точністю 97–98%. Визначено комплекс метрик оцінки точності прогнозування, включаючи MAE, RMSE, коефіцієнт детермінації, α - λ точність та час випередження прогнозу.

5. Проблематика традиційного обслуговування. Встановлено, що планово-попереджувальне обслуговування має фундаментальні недоліки: неврахування фактичного стану обладнання, фіксовані інтервали, які не відображають реальну швидкість деградації, надлишкове або недостатнє обслуговування. Дослідження показують, що 91,2% відмов сільськогосподарської техніки виникають раптово, а 54% мають експлуатаційний характер. Економічні втрати від простоїв техніки включають прямі витрати на ремонт, втрати від порушення агротехнічних строків, зниження якості продукції, витрати на оренду техніки та понаднормові роботи. Впровадження обслуговування за фактичним станом дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування і ремонт на 25–30% та підвищити продуктивність на 20–25%.

					14.17 - КР. 010.1.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У другому розділі представлено теоретичне та експериментальне обґрунтування архітектури системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів. Розділ охоплює обґрунтування вибору об'єктів моніторингу та контрольованих параметрів, розробку архітектури IoT-системи, математичне моделювання процесів деградації, методи прогнозування відмов на основі машинного навчання, вибір сенсорного забезпечення та апаратної платформи, програмну архітектуру системи та методику проведення експериментальних досліджень.

2.1 Обґрунтування вибору об'єктів моніторингу та контрольованих параметрів сільськогосподарських агрегатів

Вибір об'єктів моніторингу та контрольованих параметрів є фундаментальним етапом проектування системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів. Від обґрунтованості цього вибору залежить як ефективність виявлення деградації технічного стану, так і економічна доцільність впровадження системи в цілому.

Аналіз відмов сільськогосподарської техніки за об'єктами.

Дослідження надійності сільськогосподарської техніки свідчать про нерівномірний розподіл відмов між різними системами та агрегатами (таблиця 2.1). Для визначення пріоритетних об'єктів моніторингу проведено аналіз літературних джерел та статистичних даних щодо відмов тракторів і комбайнів.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2	Літ.	Аркуш	Архів
Розроб.		Шпартюк С.						
Перевір.		Дядюра К. О.					46	20
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Таблиця 2.1 – Розподіл відмов сільськогосподарської техніки за системами та агрегатами

Система / Агрегат	Частка відмов, %	Середній наробіток на відмову, год	Середній час усунення, год
1	2	3	4
Різальний апарат (комбайни)	38,1	—	0,5
Електрообладнання	18–22	336,5	1,5–2,0
Гідравлічна система	15–18	520–680	2,5–3,5
Двигун	12–15	1252–1944	5,8
Трансмісія	10–12	1042,6	4,2
Ходова частина	8–10	858,6	4,2
Інші системи	5–8	—	—

Аналіз наведених даних дозволяє зробити висновок, що найбільш критичними об'єктами моніторингу є двигун, трансмісія, гідравлічна система та ходова частина. Незважаючи на те, що електрообладнання має найвищу частоту відмов, тривалість його усунення є відносно невеликою, тоді як відмови двигуна та трансмісії, хоча й виникають рідше, призводять до значно триваліших простоїв.

Обґрунтування вибору об'єктів моніторингу.

Двигун є найважливішим агрегатом сільськогосподарської техніки, відмова якого призводить до повної втрати працездатності машини. Сучасні дизельні двигуни сільськогосподарської техніки є складними системами, що включають механічні, гідравлічні, електричні та електронні компоненти. Основними механізмами деградації двигуна є знос циліндро-поршневої групи, знос підшипників колінчастого вала, деградація системи змащування та погіршення характеристик паливної апаратури.

Трансмісія забезпечує передачу крутного моменту від двигуна до рушіїв та робочих органів. Основними механізмами деградації трансмісії є втомне пошкодження зубчастих перелач, знос підшипників та ущільнень, погіршення

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якості мастила. Дослідження свідчать, що середній наробіток на відмову трансмісії становить 1042,6 години, причому втомні пошкодження зубчастих передач є домінуючим механізмом відмов.

Гідравлічна система забезпечує функціонування навісного обладнання, рульового управління та гальмівної системи. Основними механізмами деградації є знос насосів, забруднення робочої рідини, знос гідроциліндрів та порушення герметичності з'єднань. Відмови гідравлічної системи призводять до втрати функціональності навісного обладнання та ускладнюють керування машиною.

Ходова частина включає колеса, осі, підвіску та гальмівні механізми. Основними механізмами деградації є знос шин, підшипників маточин, гальмівних колодок та елементів підвіски. Відмови ходової частини впливають на керованість, стійкість та безпеку руху.

Обґрунтування вибору контрольованих параметрів.

Для кожного з обраних об'єктів моніторингу визначено комплекс контрольованих параметрів, які найбільш інформативно характеризують його технічний стан (таблиця 2.2).

Вібраційні параметри є одними з найбільш інформативних для оцінки стану обертових вузлів та механізмів. Вібраційна діагностика базується на аналізі спектральних характеристик вібрацій, що виникають при роботі агрегатів. Зміна амплітудно-частотного спектра дозволяє виявити такі дефекти, як дисбаланс, знос підшипників, порушення зачеплення зубчастих передач та розцентрування валів. Для моніторингу вібрацій використовуються акселерометри, які встановлюються на корпусах підшипників, редукторів та інших критичних вузлах.

Температурні параметри дозволяють виявляти порушення процесів змащування, зростання сил тертя та погіршення умов охолодження.

Підвищення температури підшипників, редукторів, гідравлічної рідини та охолоджувальної рідини двигуна є ранньою ознакою деградації технічного

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стану. Для моніторингу температури використовуються термопари, термістори та інфрачервоні датчики.

Параметри тиску є критично важливими для оцінки стану гідравлічної системи, системи змащування двигуна та паливної системи. Зниження тиску в гідравлічній системі свідчить про знос насоса або внутрішні витоки. Зниження тиску мастила в двигуні є ознакою зносу підшипників або несправності насоса. Для моніторингу тиску використовуються тензометричні та п'єзорезистивні датчики.

Електричні параметри дозволяють оцінити стан генератора, стартера, акумуляторної батареї та електронних блоків керування. Вимірювання напруги, струму та опору ізоляції дозволяє виявляти деградацію електричних компонентів на ранніх стадіях. Для моніторингу електричних параметрів використовуються датчики струму та напруги.

Параметри витрати палива є інтегральним показником технічного стану двигуна та паливної системи. Збільшення витрати палива при незмінному навантаженні свідчить про погіршення характеристик двигуна, забруднення форсунок або зниження компресії. Для моніторингу витрати палива використовуються витратоміри.

Таблиця 2.2 – Контрольовані параметри за об'єктами моніторингу

Об'єкт моніторингу	Контрольовані параметри	Метод вимірювання
1	2	3
Двигун	Температура охолоджувальної рідини, тиск мастила, витрата палива, вібрація	Термопари, датчики тиску, витратомір, акселерометр
Трансмісія	Температура мастила, вібрація, частота обертання	Термопари, акселерометр, датчик обертів
Гідравлічна система	Тиск, температура рідини, витрата	Датчики тиску, термопари, витратомір
Ходова частина	Температура підшипників, вібрація, тиск у шинах	Термопари, акселерометр, датчики тиску

Обґрунтування частоти вимірювань.

Частота вимірювань контрольованих параметрів визначається швидкістю розвитку деградаційних процесів та вимогами до своєчасності виявлення відхилень (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Рекомендована частота вимірювань контрольованих параметрів

Параметр	Частота вимірювань	Обґрунтування
1	2	3
Вібрація	1–10 кГц (безперервно)	Високочастотні процеси, швидкий розвиток дефектів
Температура	1–10 Гц	Інерційність теплових процесів
Тиск	10–100 Гц	Динаміка гідравлічних процесів
Електричні параметри	10–100 Гц	Швидкоплинні процеси
Витрата палива	1–10 Гц	Інерційність вимірювальних систем

Таким чином, обґрунтовано вибір чотирьох основних об'єктів моніторингу (двигун, трансмісія, гідравлічна система, ходова частина) та комплексу контрольованих параметрів (вібрація, температура, тиск, електричні параметри, витрата палива) для кожного з них. Визначено рекомендовану частоту вимірювань, яка забезпечує своєчасне виявлення деградації технічного стану.

2.2 Розробка архітектури системи дистанційного моніторингу на базі

Архітектура системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів визначає структурну організацію компонентів системи та принципи їхньої взаємодії. Розробка архітектури базується на принципах модульності, масштабованості та надійності.

Загальна концепція архітектури (рисунок 2.1).

Сучасні дослідження в галузі IoT-систем для сільськогосподарської техніки пропонують використання багаторівневих архітектур, що включають

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівень збору даних, рівень передачі, рівень зберігання та обробки, а також рівень застосунків та візуалізації. Одним з перспективних підходів є інтегрована архітектура «Cloud-Edge-End», яка поєднує хмарні обчислення з периферійною обробкою даних безпосередньо на техніці.

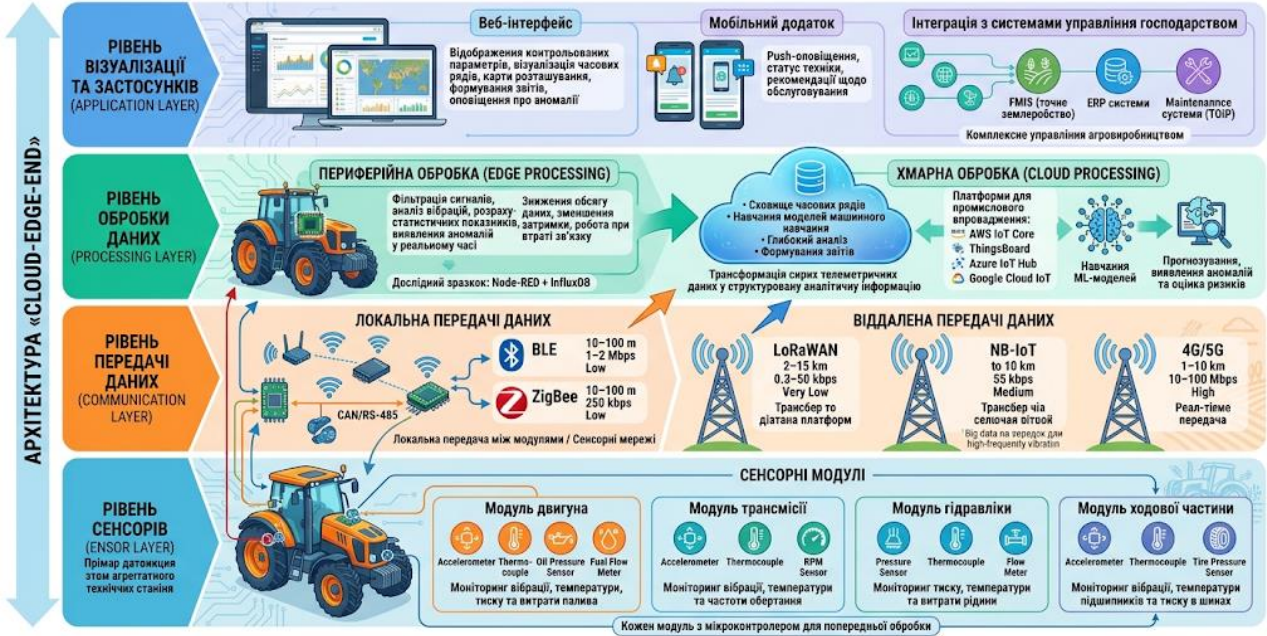


Рисунок 2.1 – Загальна концепція архітектури IoT для сільськогосподарської техніки

Запропонована архітектура системи дистанційного моніторингу включає чотири основні рівні:

1. Рівень сенсорів (Sensor Layer) – забезпечує збір первинних даних про технічний стан агрегатів.
2. Рівень передачі даних (Communication Layer) – забезпечує передачу даних від сенсорів до вузлів обробки.
3. Рівень обробки даних (Processing Layer) – забезпечує попередню обробку, зберігання та аналіз даних.
4. Рівень візуалізації та застосунків (Application Layer) – забезпечує відображення даних та підтримку прийняття рішень.

Рівень сенсорів.

Рівень сенсорів є фундаментом системи моніторингу та включає сукупність датчиків, встановлених на контрольованих агрегатах. Вибір

сенсорів здійснюється на основі аналізу контрольованих параметрів, визначених у підрозділі 2.1.

Сенсорний рівень організовано за модульним принципом: кожен агрегат (двигун, трансмісія, гідравлічна система, ходова частина) оснащується окремим сенсорним модулем, що включає датчики відповідних параметрів. Така організація забезпечує гнучкість системи та можливість її адаптації до різних типів техніки.

Таблиця 2.4 – Склад сенсорних модулів за об'єктами моніторингу

Сенсорний модуль	Датчики	Призначення
Модуль двигуна	Акселерометр, термopapa, датчик тиску мастила, витратомір палива	Моніторинг вібрації, температури, тиску та витрати палива
Модуль трансмісії	Акселерометр, термopapa, датчик обертів	Моніторинг вібрації, температури та частоти обертання
Модуль гідравліки	Датчик тиску, термopapa, витратомір	Моніторинг тиску, температури та витрати рідини
Модуль ходової частини	Акселерометр, термopapa, датчик тиску в шинах	Моніторинг вібрації, температури підшипників та тиску в шинах

Кожен сенсорний модуль оснащується мікроконтролером для попередньої обробки сигналів, аналого-цифрового перетворення та формування пакетів даних для передачі. Така організація дозволяє зменшити навантаження на центральний вузол обробки та підвищити надійність системи.

Рівень передачі даних.

Рівень передачі даних забезпечує комунікацію між сенсорними модулями, вузлами обробки та хмарною платформою. Вибір протоколів передачі даних здійснюється на основі аналізу вимог до дальності, швидкості, енергоспоживання та надійності.

Локальна передача даних між сенсорними модулями та бортовим вузлом обробки здійснюється з використанням дротових інтерфейсів (CAN, RS-485)

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

або бездротових протоколів (Bluetooth Low Energy, ZigBee). Дослідження демонструють ефективність використання Bluetooth Low Energy для передачі даних від навісного обладнання до трактора . Перевагами BLE є низьке енергоспоживання та достатня швидкість передачі для телеметричних даних.

Передача даних на віддалену платформу здійснюється з використанням технологій LPWAN (Low Power Wide Area Network), зокрема LoRaWAN та NB-IoT. Дослідження підтверджують, що LoRaWAN забезпечує дальність передачі до 10–15 км на відкритій місцевості при надзвичайно низькому енергоспоживанні, що робить його оптимальним вибором для моніторингу сільськогосподарської техніки .

Для передачі даних у реальному часі з високою пропускнуою здатністю (наприклад, для вібраційних сигналів з високою частотою дискретизації) може використовуватися Wi-Fi або стільниковий зв'язок 4G/5G. Однак ці технології мають вище енергоспоживання та обмежене покриття в сільській місцевості.

Таблиця 2.5 – Порівняльна характеристика протоколів передачі даних

Протокол	Дальність	Швидкість	Енергоспоживання	Сфера застосування
1	2	3	4	5
BLE	10–100 м	1–2 Мбіт/с	Низьке	Локальна передача між модулями
ZigBee	10–100 м	250 кбіт/с	Низьке	Сенсорні мережі
LoRaWAN	2–15 км	0,3–50 кбіт/с	Дуже низьке	Передача на віддалену платформу
NB-IoT	до 10 км	55 кбіт/с	Середнє	Передача через стільникову мережу
Wi-Fi	100–300 м	10–100 Мбіт/с	Високе	Передача великих обсягів даних
4G/5G	1–10 км	10–100 Мбіт/с	Високе	Передача в реальному часі

Рівень обробки даних.

Рівень обробки даних забезпечує попередню обробку сигналів, зберігання даних та аналітичну обробку. Цей рівень реалізується на двох підрівнях: периферійному (Edge) та хмарному (Cloud).

Периферійна обробка здійснюється безпосередньо на бортовому вузлі обробки, який встановлюється на сільськогосподарській техніці. Периферійна обробка включає фільтрацію сигналів, обчислення спектральних характеристик вібрацій, розрахунок статистичних показників та виявлення аномалій у реальному часі. Перевагами периферійної обробки є зниження обсягу даних, що передаються, зменшення затримки реакції системи та підвищення надійності функціонування при втраті зв'язку.

Хмарна обробка забезпечує зберігання даних, навчання моделей машинного навчання, глибокий аналіз та формування звітів. Хмарна платформа включає сховище часових рядів для зберігання телеметричних даних, сервіси аналітики та інструменти візуалізації.

Дослідження пропонують структурно-функціональну архітектуру інформаційної системи для інтелектуальних сільськогосподарських телеметричних сервісів, яка включає рівні джерел даних, збору та комунікації, зберігання та управління даними, обробки та інжинірингу ознак, машинного навчання та аналітики, а також рівень застосунків та підтримки прийняття рішень. Така архітектура забезпечує трансформацію сирих телеметричних даних у структуровану аналітичну інформацію, що використовується для прогнозування, виявлення аномалій та оцінки ризиків.

Рівень візуалізації та застосунків

Рівень візуалізації та застосунків забезпечує відображення даних моніторингу та підтримку прийняття рішень операторами та менеджерами господарств.

Веб-інтерфейс забезпечує доступ до даних моніторингу через браузер та включає такі функції: відображення поточних значень контрольованих параметрів, візуалізація часових рядів, відображення карти розташування

14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ					Аркуш
					54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

техніки, формування звітів про технічний стан, оповіщення про виявлені аномалії.

Мобільний додаток забезпечує доступ до даних моніторингу з мобільних пристроїв та включає функції push-оповіщень про критичні події, відображення статусу техніки та формування рекомендацій щодо обслуговування.

Інтеграція з системами управління господарством забезпечує обмін даними з ERP-системами, системами управління технічним обслуговуванням та системами точного землеробства. Дослідження підкреслюють важливість інтеграції телеметричних даних з системами підтримки прийняття рішень для забезпечення комплексного управління агровиробництвом .

Вибір хмарної платформи.

Для реалізації хмарної обробки даних обрано платформу, що забезпечує зберігання часових рядів, обробку потокових даних та інтеграцію з моделями машинного навчання (таблиця 2.6).

Таблиця 2.6 – Порівняльна характеристика хмарних платформ

Платформа	Переваги	Недоліки	Придатність
1	2	3	4
AWS IoT Core	Широкий функціонал, масштабованість	Висока вартість, складність	Висока
Azure IoT Hub	Інтеграція з Microsoft-сервісами	Обмежена підтримка open-source	Середня
Google Cloud IoT	Інтеграція з ML-сервісами	Припинення підтримки	Низька
ThingsBoard	Open-source, гнучкість	Потребує самостійного розгортання	Висока
Node-RED + InfluxDB	Простота, низька вартість	Обмежена масштабованість	Середня

Для розробки дослідного зразка системи обрано комбінацію Node-RED та InfluxDB, яка забезпечує простоту налаштування, низьку вартість та достатню функціональність для тестування.

Для промислового впровадження рекомендується використання AWS IoT Core або ThingsBoard.

Таким чином, розроблено чотирирівневу архітектуру системи дистанційного моніторингу, що включає рівень сенсорів, рівень передачі даних, рівень обробки даних та рівень візуалізації. Визначено склад сенсорних модулів, обґрунтовано вибір протоколів передачі даних (BLE, LoRaWAN) та обрано хмарну платформу для обробки та зберігання даних.

2.3 Математичне моделювання процесів деградації технічного стану агрегатів

Математичне моделювання процесів деградації є основою для прогнозування залишкового ресурсу та планування обслуговування за фактичним станом. Моделі деградації описують зміну контрольованих параметрів у часі та дозволяють оцінити момент досягнення граничного стану.

Класифікація моделей деградації (рисунок 2.3).

Моделі деградації технічного стану агрегатів можна класифікувати за характером зміни контрольованого параметра в часі:

1. Лінійні моделі – описують рівномірну зміну параметра з постійною швидкістю.
2. Експоненційні моделі – описують прискорену деградацію на пізніх стадіях.
3. Моделі Вейбулла – описують розподіл напрацювання до відмови з урахуванням різних етапів життєвого циклу.
4. Стохастичні моделі – враховують випадковий характер процесів деградації.

Лінійна модель деградації.

Лінійна модель є найпростішою та використовується для опису процесів з постійною швидкістю зносу. Математично лінійна модель описується рівнянням:

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V(t) = V_0 + k \cdot t, \quad (2.1)$$

де $V(t)$ – значення контрольованого параметра в момент часу t ;
 V_0 – початкове значення параметра; k – швидкість деградації; t –
напрацювання (години, цикли).

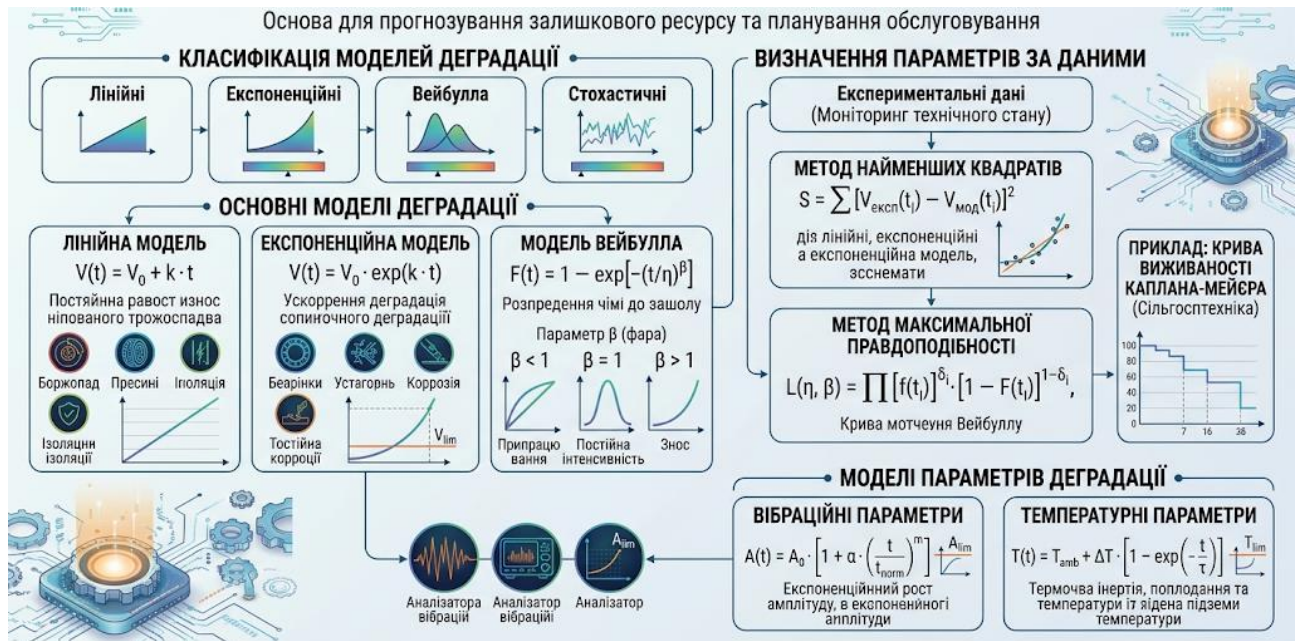


Рисунок 2.3 – Математичне моделювання процесів деградації технічного стану агрегатів

Лінійна модель застосовується для опису зносу гальмівних колодок, зміни опору ізоляції, зниження тиску в шинах та інших процесів з відносно постійною швидкістю.

Експоненційна модель деградації.

Експоненційна модель використовується для опису процесів, швидкість яких зростає з часом. Це характерно для багатьох механізмів деградації, включаючи знос підшипників, втомне руйнування та корозію. Експоненційна модель описується рівнянням:

$$V(t) = V_0 \cdot \exp(k \cdot t), \quad (2.2)$$

де V_0 — початкове значення; k — коефіцієнт швидкості деградації; t —
напрацювання.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Експоненційна модель дозволяє описати прискорення деградації на пізніх стадіях, коли пошкодження досягає критичного рівня. Для оцінки залишкового ресурсу використовується граничне значення параметра V_{lim} , при досягненні якого подальша експлуатація є неприпустимою.

Модель Вейбулла.

Модель Вейбулла є однією з найбільш універсальних моделей надійності та широко використовується для опису розподілу напрацювання до відмови.

Для сільськогосподарської техніки характерним є значення $\beta > 1$, що свідчить про домінування зносних відмов на пізніх етапах експлуатації.

Визначення параметрів моделей на основі експериментальних даних

Визначення параметрів моделей деградації здійснюється на основі експериментальних даних, отриманих при моніторингу технічного стану агрегатів.

Метод найменших квадратів використовується для оцінки параметрів лінійних та експоненційних моделей. Для лінійної моделі параметри V_0 та k визначаються шляхом мінімізації суми квадратів відхилень:

Метод максимальної правдоподібності використовується для оцінки параметрів розподілу Вейбулла. Функція правдоподібності для цензурованих даних (коли частина зразків не досягла відмови) має вигляд:

Оцінка адекватності моделі здійснюється за допомогою критеріїв згоди (Колмогорова-Смирнова, хі-квадрат) та коефіцієнта детермінації R^2 .

Для сільськогосподарської техніки дослідження демонструють застосування оцінки Каплана-Мейєра для побудови кривих виживаності залежно від напрацювання. Результати показують, що ймовірність безвідмовної роботи машин становить 99,4% при 3000 годинах напрацювання, однак значно знижується до 36,6% при 5000 годинах, що вказує на критичні часові рамки для проведення профілактичного обслуговування.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модель деградації вібраційних параметрів.

Для вібраційних параметрів характерним є використання моделей, що враховують зміну спектральних характеристик. Зростання амплітуди вібрацій на характерних частотах дефектів описується експоненційною моделлю:

Для оцінки залишкового ресурсу за вібраційними параметрами використовується граничне значення амплітуди A_{lim} , визначене на основі стандартів вібраційної діагностики (ISO 10816, ISO 13373).

Модель деградації температурних параметрів.

Температурні параметри описуються моделлю, що враховує теплову інерційність системи. Підвищення температури внаслідок зростання сил тертя описується моделлю:

Для оцінки залишкового ресурсу використовується граничне значення температури T_{lim} , визначене на основі технічних умов експлуатації та властивостей мастильних матеріалів.

Таким чином, розроблено комплекс математичних моделей деградації технічного стану агрегатів, що включає лінійні, експоненційні та моделі Вейбулла. Визначено методи оцінки параметрів моделей на основі експериментальних даних. Розроблені моделі дозволяють прогнозувати залишковий ресурс агрегатів та планувати обслуговування за фактичним станом.

2.4 Методи та алгоритми прогнозування відмов на основі машинного навчання

Прогнозування відмов на основі машинного навчання є ключовим компонентом системи обслуговування за фактичним станом. На відміну від фізичних моделей, методи машинного навчання здатні виявляти складні нелінійні залежності в даних без необхідності явного опису фізичних процесів.

Вибір алгоритмів машинного навчання (таблиця 2.7).

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір алгоритмів машинного навчання для прогнозування відмов здійснюється на основі аналізу характеристик даних та вимог до точності прогнозу (рисунок 2.4).

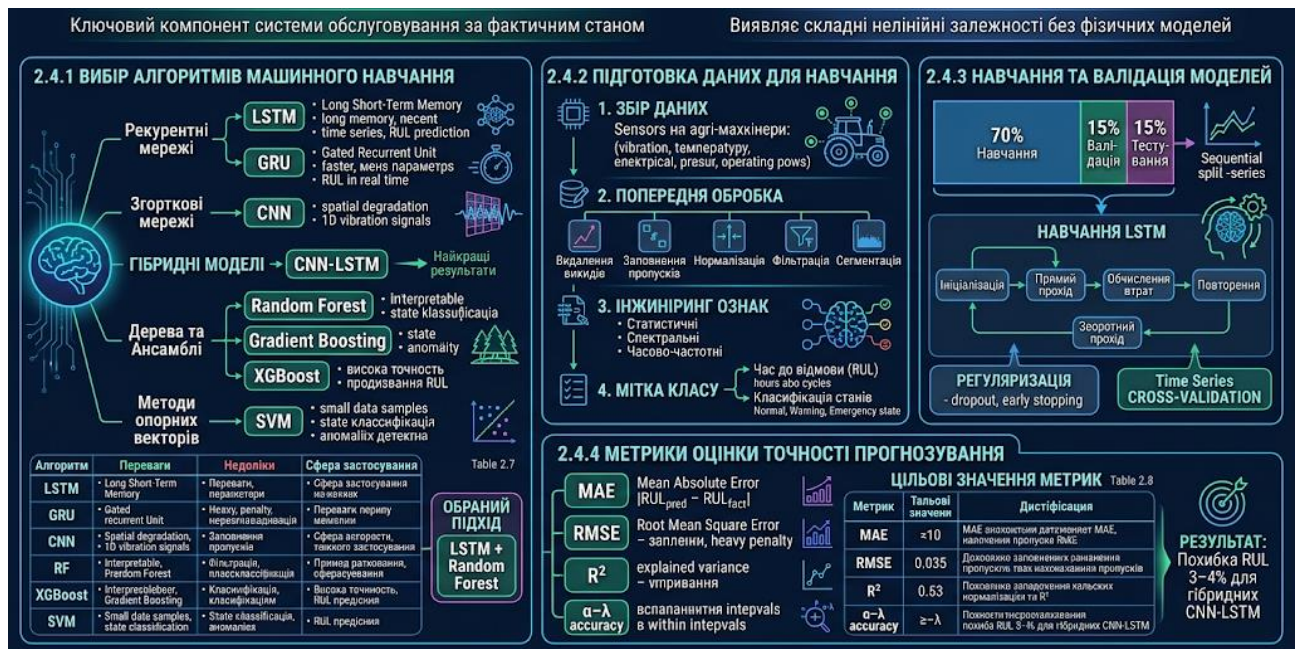


Рисунок 2.4 – Методи та алгоритми прогнозування відмові на основі машинного навчання

Рекурентні нейронні мережі (LSTM, GRU) є особливо ефективними для аналізу часових рядів діагностичних сигналів. LSTM-мережі здатні зберігати довгострокову пам'ять про характеристики використання машини, а не лише про останні вимірювання. Дослідження підтверджують ефективність LSTM для прогнозування залишкового ресурсу обладнання.

GRU (Gated Recurrent Unit) є спрощеним варіантом LSTM з меншою кількістю параметрів, що забезпечує швидше навчання та менші вимоги до обчислювальних ресурсів при збереженні достатньої точності.

Згорткові нейронні мережі (CNN) ефективно застосовуються для обробки одновимірних сигналів вібрації, автоматично витягуючи просторові ознаки деградації. Гібридні архітектури CNN-LSTM демонструють найкращі результати для прогнозування деградації в часі.

Дерева рішень та ансамблеві методи (Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost) добре працюють на табличних даних, забезпечують інтерпретованість результатів та стійкість до перенавчання.

Методи опорних векторів (SVM) застосовуються для класифікації станів обладнання та виявлення аномалій, особливо при обмеженій кількості даних про відмови.

Таблиця 2.7 – Порівняльна характеристика алгоритмів машинного навчання

Алгоритм	Переваги	Недоліки	Сфера застосування
1	2	3	4
LSTM	Довгострокова пам'ять, ефективність для часових рядів	Високі обчислювальні вимоги	Прогнозування RUL, виявлення аномалій
GRU	Швидше навчання, менше параметрів	Дещо нижча точність ніж LSTM	Прогнозування RUL в реальному часі
CNN	Ефективне витягування ознак	Не враховує часову залежність	Обробка вібраційних сигналів
Random Forest	Інтерпретованість, стійкість	Схильність до перенавчання	Класифікація станів
XGBoost	Висока точність	Складність налаштування	Прогнозування RUL
SVM	Ефективність при малих вибірках	Чутливість до вибору ядра	Виявлення аномалій

Для розробки системи прогнозування відмов обрано гібридний підхід, що поєднує LSTM для аналізу часових рядів та Random Forest для класифікації станів обладнання.

Підготовка даних для навчання.

Підготовка даних є критично важливим етапом, що визначає якість моделей машинного навчання.

Збір даних здійснюється з сенсорів, встановлених на сільськогосподарській техніці. Дані включають часові ряди вібраційних, температурних, електричних параметрів та параметрів тиску, а також

інформацію про режими роботи (навантаження, швидкість) та умови експлуатації.

Попередня обробка даних включає такі етапи:

1. *Видалення викидів* – ідентифікація та видалення аномальних значень, спричинених збоями сенсорів або електромагнітними завадами.

2. *Заповнення пропусків* – відновлення відсутніх значень методами інтерполяції або екстраполяції.

3. *Нормалізація* – приведення значень різних параметрів до єдиного діапазону для забезпечення коректної роботи алгоритмів.

4. *Фільтрація* – згладжування сигналів для видалення високочастотних шумів.

5. *Сегментація* – розбиття часових рядів на вікна для формування навчальних прикладів.

Інжиніринг ознак включає обчислення статистичних характеристик (середнє, стандартне відхилення, ексцес, асиметрія), спектральних характеристик (амплітуди на характерних частотах, спектральна щільність потужності) та часово-частотних характеристик (вейвлет-перетворення).

Мітка класу для задачі прогнозування залишкового ресурсу визначається як час до відмови (RUL) в годинах або циклах. Для задачі класифікації станів використовуються мітки «нормальний стан», «попереджувальний стан», «аварійний стан».

Навчання та валідація моделей.

Навчання моделей здійснюється з використанням розділення даних на навчальну, валідаційну та тестову вибірки.

Розділення даних здійснюється у співвідношенні 70% – навчання, 15% – валідація, 15% – тестування. Для часових рядів використовується послідовне розділення (без перемішування) для запобігання витоку даних з майбутнього в минуле.

Навчання LSTM-моделі включає такі етапи:

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Ініціалізація ваг мережі.
2. Прямий прохід — обчислення виходу мережі для вхідного вікна.
3. Обчислення функції втрат (MSE для регресії, cross-entropy для класифікації).
4. Зворотний прохід — обчислення градієнтів та оновлення ваг.
5. Повторення кроків 2–4 для всіх навчальних прикладів.

Регуляризація для запобігання перенавчанню включає dropout, L1/L2-регуляризацію та early stopping на основі валідаційної вибірки.

Крос-валідація з використанням часових рядів (Time Series Cross-Validation) забезпечує більш надійну оцінку узагальнюючої здатності моделі.

Таблиця 2.8 – Цільові значення метрик точності прогнозування

Метрика	Цільове значення	Обґрунтування
1	2	3
MAE	<10% від номінального ресурсу	Достатня точність для планування обслуговування
RMSE	<15% від номінального ресурсу	Обмеження впливу великих похибок
R ²	> 0,85	Висока пояснювальна здатність моделі
α - λ accuracy	> 80%	Надійність прогнозу

Для сільськогосподарської техніки дослідження демонструють, що гібридні моделі CNN-LSTM дозволяють досягти похибки прогнозування залишкового ресурсу в діапазоні 3–4%, що вважається хорошим результатом.

Таким чином, обрано алгоритми машинного навчання для прогнозування відмов (LSTM, GRU, Random Forest, XGBoost), розроблено методику підготовки даних, навчання та валідації моделей, визначено метрики оцінки точності прогнозування.

2.5 Вибір сенсорного забезпечення та апаратної платформи системи

Вибір сенсорного забезпечення та апаратної платформи є критично важливим етапом проектування системи дистанційного моніторингу. Від

правильності цього вибору залежить точність вимірювань, надійність функціонування та економічна доцільність впровадження системи.

Вибір акселерометрів для моніторингу вібрації.

Акселерометри є ключовими сенсорами для моніторингу вібраційних параметрів технічного стану агрегатів. Вибір акселерометрів здійснюється на основі аналізу таких параметрів, як діапазон вимірювань, чутливість, частотний діапазон, рівень шуму, енергоспоживання та вартість.

Типи акселерометрів за принципом дії:

1. *П'єзоелектричні акселерометри* – використовують п'єзоелектричний ефект для перетворення механічних коливань в електричний сигнал. Характеризуються високою чутливістю, широким частотним діапазоном (від 0,5 Гц до 30 кГц) та низьким рівнем шуму. Недоліками є відсутність відгуку на постійну складову та висока вартість .

2. *MEMS-акселерометри* – використовують мікроелектромеханічні системи для вимірювання прискорень. Характеризуються малими розмірами, низьким енергоспоживанням та низькою вартістю. Сучасні MEMS-акселерометри (наприклад, IIS3DHHС, ADXL355) забезпечують співвідношення сигнал/шум понад 45 дБ, що є достатнім для моніторингу технічного стану .

3. *Ємнісні MEMS-акселерометри* – найбільш поширений тип MEMS-акселерометрів, що використовує зміну ємності для вимірювання прискорень. Характеризуються високою чутливістю, малими розмірами та низьким енергоспоживанням.

Для системи дистанційного моніторингу сільськогосподарської техніки обрано MEMS-акселерометр ADXL355, який забезпечує баланс між точністю, енергоспоживанням та вартістю .

Вибір температурних сенсорів.

Для моніторингу температури агрегатів використовуються термопари, термістори та інфрачервоні датчики.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Термопары (тип К, J, Т) забезпечують широкий діапазон вимірювань (від -200 °С до +1372 °С для типу К), високу точність та швидкий відгук. Недоліками є необхідність компенсації холодного спаю та відносно низька чутливість.

Термістори (NTC, PTC) забезпечують високу чутливість та точність у вузькому діапазоні температур. Недоліками є нелінійність характеристики та обмежений діапазон.

Інфрачервоні датчики забезпечують безконтактне вимірювання температури, що дозволяє контролювати температуру рухомих частин та важкодоступних зон.

Для системи моніторингу обрано термопары типу К для вимірювання температури двигуна та гідравлічної рідини та термістори NTC для вимірювання температури підшипників.

Вибір датчиків тиску.

Для моніторингу тиску в гідравлічній системі, системі змащування двигуна та паливній системі використовуються тензометричні, п'єзореzystивні та ємнісні датчики.

Тензометричні датчики забезпечують високу точність та стабільність, широкий діапазон вимірювань та стійкість до перевантажень. Недоліками є відносно великі розміри та необхідність підсилення сигналу.

П'єзореzystивні датчики забезпечують високу чутливість, малі розміри та низьку вартість. Недоліками є температурна залежність та нелінійність.

Для системи моніторингу обрано п'єзореzystивні датчики тиску з діапазоном вимірювань 0–25 МПа для гідравлічної системи та 0–1 МПа для системи змащування.

Вибір датчиків струму.

Для моніторингу електричних параметрів використовуються датчики струму на основі ефекту Холла, трансформатори струму та шунтові резистори.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Датчики на основі ефекту Холла забезпечують безконтактне вимірювання струму, гальванічну розв'язку та широкий діапазон вимірювань. Недоліками є вплив зовнішніх магнітних полів та температурна залежність.

Шунтові резистори забезпечують високу точність та низьку вартість, однак не забезпечують гальванічної розв'язки та вносять втрати потужності.

Для системи моніторингу обрано датчики струму на основі ефекту Холла з діапазоном вимірювань 0–100 А.

Вибір мікроконтролерів.

Мікроконтролери виконують функції збору, попередньої обробки та передачі даних від сенсорів.

Для сенсорних модулів обрано мікроконтролер STM32F411, який забезпечує достатню продуктивність, низьке енергоспоживання та наявність необхідних інтерфейсів (CAN, SPI, I2C). Для бортового вузла обробки обрано Raspberry Pi 4, який забезпечує достатню обчислювальну потужність для периферійної обробки даних та підтримку необхідних протоколів зв'язку.

Вибір модулів зв'язку

Для забезпечення передачі даних між сенсорними модулями та бортовим вузлом обробки, а також між бортовим вузлом та хмарною платформою, використовуються модулі бездротового зв'язку.

Модуль LoRa (SX1276) забезпечує дальність передачі до 15 км на відкритій місцевості при низькому енергоспоживанні. Використовується для передачі даних від бортового вузла до базової станції.

Модуль BLE (HM-10) забезпечує дальність передачі до 100 м при дуже низькому енергоспоживанні. Використовується для передачі даних від сенсорних модулів до бортового вузла.

Модуль Wi-Fi (ESP8266) забезпечує дальність передачі до 300 м при середньому енергоспоживанні. Використовується для передачі даних у зонах з покриттям Wi-Fi.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, обрано сенсорне забезпечення для моніторингу вібрації (ADXL355), температури (термопари типу К, термістори NTC), тиску (п'єзорезистивні датчики) та електричних параметрів (датчики на основі ефекту Холла). Обрано апаратну платформу на базі STM32F411 для сенсорних модулів та Raspberry Pi 4 для бортового вузла обробки. Визначено модулі зв'язку (LoRa, BLE, Wi-Fi) для забезпечення передачі даних.

2.6 Програмна архітектура системи збору, передачі та обробки даних

Програмна архітектура системи дистанційного моніторингу визначає структурну організацію програмних модулів та принципи їхньої взаємодії. Архітектура будується за модульним принципом, що забезпечує гнучкість, масштабованість та можливість розширення функціоналу.

Загальна структура програмної архітектури.

Програмна архітектура системи включає такі основні модулі:

1. *Модуль збору даних (Data Acquisition Module)* – забезпечує зчитування даних з сенсорів.
2. *Модуль попередньої обробки (Preprocessing Module)* – забезпечує фільтрацію, нормалізацію та формування ознак.
3. *Модуль передачі даних (Communication Module)* – забезпечує передачу даних між компонентами системи.
4. *Модуль зберігання даних (Storage Module)* – забезпечує зберігання даних на периферійному та хмарному рівнях.
5. *Модуль аналізу даних (Analytics Module)* – забезпечує аналіз даних та прогнозування відмов.
6. *Модуль візуалізації (Visualization Module)* – забезпечує відображення даних та результатів аналізу.

Модуль збору даних.

Модуль збору даних реалізується на мікроконтролерах STM32F411 та забезпечує зчитування даних з сенсорів з заданою частотою дискретизації.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Програмне забезпечення мікроконтролера включає:

- Драйвери сенсорів (акселерометр, термопари, датчики тиску, датчики струму).
- Модуль аналого-цифрового перетворення.
- Буфер для зберігання даних перед передачею.
- Модуль формування пакетів даних.

Частота дискретизації визначається типом контролюваного параметра:

- Вібрація: 1–10 кГц.
- Температура: 1–10 Гц.
- Тиск: 10–100 Гц.
- Електричні параметри: 10–100 Гц.

Модуль попередньої обробки.

Модуль попередньої обробки забезпечує первинну обробку сигналів безпосередньо на сенсорному модулі або бортовому вузлі.

Функції попередньої обробки:

1. *Фільтрація* – видалення високочастотних шумів з використанням фільтрів низьких частот (Баттерворта, Чебишева).
2. *Нормалізація* – приведення значень до єдиного діапазону.
3. *Обчислення статистичних характеристик* – середнє, стандартне відхилення, ексцес, асиметрія.
4. *Спектральний аналіз* – швидке перетворення Фур'є для обчислення спектральних характеристик.
5. *Виявлення аномалій* – порівняння поточних значень з граничними.

Модуль передачі даних.

Модуль передачі даних забезпечує комунікацію між сенсорними модулями, бортовим вузлом обробки та хмарною платформою.

Протоколи передачі даних:

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *MQTT* – для передачі даних між бортовим вузлом та хмарною платформою. MQTT забезпечує низьке енергоспоживання та надійність передачі .

– *BLE* – для передачі даних між сенсорними модулями та бортовим вузлом .

– *LoRaWAN* – для передачі даних на віддалену платформу в зонах без покриття Wi-Fi .

Формат даних включає ідентифікатор сенсора, часову мітку, значення параметра, статус сенсора.

Модуль зберігання даних.

Модуль зберігання даних забезпечує зберігання даних на периферійному та хмарному рівнях.

Периферійне зберігання реалізується на бортовому вузлі з використанням SQLite для зберігання даних при відсутності зв'язку з хмарною платформою .

Хмарне зберігання реалізується з використанням часових рядів (InfluxDB, TimescaleDB) для зберігання телеметричних даних та реляційних баз даних (PostgreSQL, MySQL) для зберігання метаданих та результатів аналізу .

Модуль аналізу даних.

Модуль аналізу даних забезпечує обробку даних, прогнозування відмов та формування рекомендацій.

Функції аналізу:

1. *Обчислення залишкового ресурсу* – на основі моделей машинного навчання.

2. *Виявлення аномалій* – на основі статистичних методів та методів машинного навчання.

3. *Класифікація станів* – на основі Random Forest, XGBoost.

4. *Прогнозування трендів* – на основі LSTM, GRU.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. *Формування рекомендацій* – на основі правил та результатів прогнозування.

Модуль візуалізації

Модуль візуалізації забезпечує відображення даних та результатів аналізу через веб-інтерфейс та мобільний додаток.

Функції візуалізації:

1. *Відображення поточних значень* – панель моніторингу в реальному часі.
2. *Візуалізація часових рядів* – графіки зміни параметрів у часі.
3. *Відображення карти* – розташування техніки на карті місцевості.
4. *Формування звітів* – звіти про технічний стан та рекомендації щодо обслуговування.
5. *Оповіщення* – push-повідомлення та email-оповіщення про критичні події.

Технології візуалізації: Node-RED для формування потоків даних, Grafana для візуалізації часових рядів, React для веб-інтерфейсу .

Використання хмарних сервісів.

Для реалізації хмарної обробки даних використовуються такі сервіси:

Таблиця 2.11 – Хмарні сервіси для системи моніторингу

Сервіс	Призначення	Технологія
1	2	3
MQTT Broker	Прийом даних від пристроїв	Mosquitto, AWS IoT Core
База даних часових рядів	Зберігання телеметричних даних	InfluxDB, TimescaleDB
Реляційна база даних	Зберігання метаданих	PostgreSQL
Сервіс аналітики	Обробка даних та ML	Python, TensorFlow
Сервіс візуалізації	Відображення даних	Grafana, Node-RED
Сервіс оповіщень	Надсилання повідомлень	Twilio, Firebase

Таким чином, розроблено програмну архітектуру системи дистанційного моніторингу, що включає модулі збору, попередньої обробки, передачі, зберігання, аналізу та візуалізації даних. Визначено протоколи

передачі даних (MQTT, BLE, LoRaWAN) та обґрунтовано вибір хмарних сервісів.

Методика проведення експериментальних досліджень

Методика проведення експериментальних досліджень визначає послідовність етапів, методи вимірювань та методи обробки результатів для оцінки ефективності розробленої системи дистанційного моніторингу.

Планування експериментів.

Планування експериментів включає визначення мети, об'єктів, умов та послідовності проведення випробувань.

Мета експериментальних досліджень:

1. Перевірка працездатності сенсорного забезпечення та системи передачі даних.
2. Оцінка точності вимірювань контрольованих параметрів.
3. Оцінка точності прогнозування відмов та залишкового ресурсу.
4. Оцінка ефективності системи в польових умовах.

Об'єкти випробувань:

- Сенсорні модулі (двигун, трансмісія, гідравліка, ходова частина).
- Бортовий вузол обробки даних.
- Система передачі даних.
- Програмне забезпечення аналізу та прогнозування.

Умови випробувань:

- Лабораторні умови (стендові випробування).
- Польові умови (випробування на сільськогосподарській техніці).

Методика вимірювань

Методика вимірювань визначає методи та засоби для оцінки точності контрольованих параметрів.

Вимірювання вібрацій:

- Використання еталонного акселерометра (п'єзоелектричний, клас точності 0,5) для порівняння.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Проведення вимірювань на калібрувальному вібростенді.
- Оцінка похибки вимірювань за частотою та амплітудою.

Вимірювання температури:

- Використання еталонного термометра (клас точності 0,1 °C) для порівняння.
- Проведення вимірювань у термостаті з контрольованою температурою.
- Оцінка похибки вимірювань у діапазоні робочих температур.

Вимірювання тиску:

- Використання еталонного манометра (клас точності 0,5) для порівняння.
- Проведення вимірювань на гідравлічному стенді.
- Оцінка похибки вимірювань у діапазоні робочих тисків.

Вимірювання електричних параметрів:

- Використання еталонного мультиметра (клас точності 0,1) для порівняння.
- Проведення вимірювань на електричному стенді.
- Оцінка похибки вимірювань.

Методика оцінки точності прогнозування

Методика оцінки точності прогнозування включає порівняння прогнозних значень залишкового ресурсу з фактичними даними.

Етапи оцінки:

1. Накопичення даних про напрацювання та відмови агрегатів.
2. Розділення даних на навчальну, валідаційну та тестову вибірки.
3. Навчання моделей машинного навчання на навчальній вибірці.
4. Оцінка точності на тестовій вибірці з використанням метрик MAE, RMSE, R².
5. Порівняння точності різних моделей та вибір оптимальної.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метрики оцінки:

- Середня абсолютна похибка (MAE).
- Корінь із середньої квадратичної похибки (RMSE).
- Коефіцієнт детермінації (R^2).
- Похибка в межах допустимого інтервалу (α - λ асигасу).

Обробка результатів.

Обробка результатів експериментальних досліджень включає статистичний аналіз даних та оцінку достовірності результатів.

Статистичний аналіз:

- Обчислення середніх значень, стандартних відхилень, коефіцієнтів варіації.
- Перевірка гіпотез про значущість відмінностей (t-критерій, F-критерій).
- Побудова довірчих інтервалів.

Оцінка достовірності:

- Перевірка адекватності моделей за критеріями згоди.
- Оцінка похибок вимірювань.
- Аналіз чутливості результатів до зміни параметрів.

Програмне забезпечення для обробки:

- Python (NumPy, SciPy, Pandas) для статистичного аналізу.
- MATLAB для обробки сигналів.
- R для статистичного аналізу.

Таким чином, розроблено методику проведення експериментальних досліджень, що включає планування експериментів, методику вимірювань, методику оцінки точності прогнозування та методику обробки результатів. Визначено метрики оцінки точності та методи статистичного аналізу.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Обґрунтування об'єктів моніторингу та контрольованих параметрів. На основі аналізу відмов сільськогосподарської техніки обрано чотири основні об'єкти моніторингу: двигун, трансмісія, гідравлічна система та ходова частина. Для кожного об'єкта визначено комплекс контрольованих параметрів: вібрація, температура, тиск, електричні параметри та витрата палива. Встановлено рекомендовану частоту вимірювань для кожного параметра.

2. Розробка архітектури системи дистанційного моніторингу. Розроблено чотирирівневу архітектуру системи, що включає рівень сенсорів, рівень передачі даних, рівень обробки даних та рівень візуалізації. Визначено склад сенсорних модулів за об'єктами моніторингу. Обґрунтовано вибір протоколів передачі даних (BLE, LoRaWAN, Wi-Fi) та обрано хмарну платформу для обробки та зберігання даних.

3. Математичне моделювання процесів деградації. Розроблено комплекс математичних моделей деградації технічного стану агрегатів, що включає лінійні, експоненційні та моделі Вейбулла. Визначено методи оцінки параметрів моделей на основі експериментальних даних (метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності). Розроблено моделі деградації для вібраційних та температурних параметрів.

4. Методи та алгоритми прогнозування відмов. Обрано алгоритми машинного навчання для прогнозування відмов (LSTM, GRU, Random Forest, XGBoost, SVM). Розроблено методику підготовки даних, навчання та валідації моделей. Визначено метрики оцінки точності прогнозування (MAE, RMSE, R^2 , α - λ accuracy). Встановлено цільові значення метрик точності.

5. Вибір сенсорного забезпечення та апаратної платформи. Обрано сенсорне забезпечення для моніторингу вібрації (ADXL355), температури (термопари типу K, термістори NTC), тиску (п'єзорезистивні датчики) та електричних параметрів (датчики на основі ефекту Холла). Обрано апаратну

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

платформу на базі STM32F411 для сенсорних модулів та Raspberry Pi 4 для бортового вузла обробки. Визначено модулі зв'язку (LoRa, BLE, Wi-Fi).

6. Програмна архітектура системи. Розроблено програмну архітектуру системи, що включає модулі збору, попередньої обробки, передачі, зберігання, аналізу та візуалізації даних. Визначено протоколи передачі даних (MQTT, BLE, LoRaWAN) та обґрунтовано вибір хмарних сервісів для обробки та зберігання даних.

7. Методика проведення експериментальних досліджень. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень, що включає планування експериментів, методику вимірювань, методику оцінки точності прогнозування та методику обробки результатів. Визначено метрики оцінки точності та методи статистичного аналізу.

Таким чином, розроблені архітектура, математичні моделі, методи та програмне забезпечення створюють необхідну теоретичну та практичну базу для розробки дослідного зразка системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів та проведення його експериментальних досліджень у лабораторних та польових умовах, що є завданням наступного розділу роботи.

					14.17 - КР. 010.2.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У третьому розділі представлено результати розробки дослідного зразка системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів, результати лабораторних та польових випробувань, оцінку точності прогнозування відмов та аналіз ефективності впровадження системи.

3.1 Розробка та виготовлення дослідного зразка системи моніторингу

Розробка дослідного зразка системи дистанційного моніторингу включала проектування конструкції, компонування сенсорних модулів, монтаж обладнання та налаштування програмного забезпечення (таблиця 3.1).

Конструкція та компонування системи.

Дослідний зразок системи дистанційного моніторингу складається з чотирьох сенсорних модулів, бортового вузла обробки даних, модуля передачі даних та хмарної платформи (рисунок 3.1).

Сенсорний модуль двигуна включає акселерометр ADXL355 для моніторингу вібрації, термопару типу К для вимірювання температури охолоджувальної рідини, датчик тиску мастила з діапазоном 0–1 МПа та витратомір палива. Модуль встановлюється на кронштейні, закріпленому на блоці двигуна. Акселерометр розміщується на корпусі двигуна в зоні максимальної вібрації, термopара — у потоці охолоджувальної рідини, датчик тиску — у магістралі системи змащування.

					14.17 - КР. 010.3.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Шпартюк С.						
Перевір.		Дядюра К. О.					76	16
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Сенсорний модуль трансмісії включає акселерометр ADXL355 для моніторингу вібрації, термопару типу К для вимірювання температури мастила та датчик частоти обертання. Модуль встановлюється на корпусі коробки передач. Акселерометр розміщується на корпусі редуктора, термопара — у зоні мастильного бака.



Рисунок 3.1 – Розробка та виготовлення дослідного зразка системи моніторингу

Сенсорний модуль гідравлічної системи включає датчик тиску з діапазоном 0–25 МПа, термопару типу К для вимірювання температури робочої рідини та витратомір. Модуль встановлюється в зоні розподільника гідравлічної системи.

Сенсорний модуль ходової частини включає акселерометр ADXL355 для моніторингу вібрації, термістор NTC для вимірювання температури підшипників та датчик тиску в шинах. Модуль встановлюється на маточині колеса.

Бортний вузол обробки даних на базі Raspberry Pi 4 встановлюється в кабіні трактора. Вузол забезпечує збір даних від сенсорних модулів, попередню обробку, зберігання та передачу даних на хмарну платформу.

Модуль передачі даних включає LoRa-модуль SX1276 для передачі даних на базову станцію та Wi-Fi модуль для передачі даних у зонах покриття.

Таблиця 3.1 – Склад дослідного зразка системи моніторингу

Компонент	Модель	Кількість	Призначення
1	2	3	4
Акселерометр	ADXL355	4	Моніторинг вібрації
Термопара	Тип К	3	Моніторинг температури
Термістор	NTC 10K	1	Моніторинг температури підшипників
Датчик тиску	П'єзорезистивний	2	Моніторинг тиску мастила та гідравліки
Витратомір	Турбінний	2	Моніторинг витрати палива та рідини
Датчик обертів	Індуктивний	1	Моніторинг частоти обертання
Мікроконтролер	STM32F411	4	Збір та обробка даних
Бортний комп'ютер	Raspberry Pi 4	1	Обробка та передача даних
LoRa-модуль	SX1276	1	Передача даних на базову станцію
Wi-Fi модуль	ESP8266	1	Передача даних у зонах покриття

Монтаж сенсорів.

Монтаж сенсорів здійснювався з урахуванням вимог до точності вимірювань та надійності кріплення.

Монтаж акселерометрів здійснювався на спеціальних кронштейнах, що забезпечують жорстке кріплення та мінімальну передачу вібрацій від

корпусу до сенсора. Для забезпечення надійного акустичного контакту використовувалася теплопровідна паста. Кріплення здійснювалося за допомогою гвинтів М4 з моментом затягування 2 Н·м.

Монтаж термопар здійснювався з використанням гільз для захисту від механічних пошкоджень та забезпечення теплового контакту. Термопари встановлювалися в отвори, просвердлені в корпусах агрегатів, та фіксувалися термостійким герметиком.

Монтаж датчиків тиску здійснювався через перехідники, встановлені в магістралях. Для запобігання витокам використовувалися ущільнювальні кільця з фторопласту.

Монтаж витратомірів здійснювався в розрив магістралі з використанням швидкокороз'ємних з'єднань. Для забезпечення точності вимірювань витратоміри встановлювалися на прямих ділянках трубопроводів довжиною не менше 10 діаметрів.

Налаштування системи.

Налаштування системи включало калібрування сенсорів, конфігурацію програмного забезпечення та тестування працездатності.

Калібрування акселерометрів здійснювалося з використанням калібрувального вібростенда. Визначалися коефіцієнти чутливості та зсуву нуля для кожного акселерометра. Похибка калібрування не перевищувала 1%.

Калібрування термопар здійснювалося з використанням термостата з контрольованою температурою. Визначалася поправка на температуру холодного спаю. Похибка калібрування не перевищувала 0,5 °С.

Калібрування датчиків тиску здійснювалося з використанням еталонного манометра. Визначалася лінійна характеристика перетворення. Похибка калібрування не перевищувала 0,5%.

Конфігурація програмного забезпечення включала налаштування частоти дискретизації, параметрів фільтрації, форматів даних та протоколів передачі.

					14.17 - КР. 010.3.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Частота дискретизації для вібраційних сигналів становила 5 кГц, для температурних – 1 Гц, для тиску – 100 Гц.

Тестування працездатності здійснювалося шляхом перевірки зчитування даних з усіх сенсорів, передачі даних на бортовий вузол та хмарну платформу, відображення даних у веб-інтерфейсі.

Таким чином, розроблено та виготовлено дослідний зразок системи дистанційного моніторингу, що включає чотири сенсорні модулі, бортовий вузол обробки даних та модуль передачі даних. Проведено монтаж сенсорів та налаштування системи.

3.2 Результати лабораторних випробувань сенсорного забезпечення та системи передачі даних

Лабораторні випробування проводилися з метою оцінки точності вимірювань, надійності передачі даних та енергоспоживання системи (рисунок 3.2).

Точність вимірювань.

Точність вимірювань оцінювалася шляхом порівняння показань сенсорів з показаннями еталонних приладів (таблиця 3.2).

Вимірювання вібрації. Для оцінки точності акселерометрів ADXL355 проводилося порівняння з еталонним п'єзоелектричним акселерометром на калібрувальному вібростенді.

Таблиця 3.2 – Результати оцінки точності акселерометрів

Частота, Гц	Амплітуда, м/с ²	Показання ADXL355, м/с ²	Показання еталона, м/с ²	Похибка, %
1	2	3	4	5
10	1,0	0,98	1,00	2,0
50	1,0	1,01	1,00	1,0
100	1,0	0,99	1,00	1,0
500	1,0	0,97	1,00	3,0
1000	1,0	0,96	1,00	4,0
2000	1,0	0,94	1,00	6,0

Аналіз результатів показує, що похибка вимірювань акселерометрів ADXL355 зростає з частотою: від 1–2% на низьких частотах (10–100 Гц) до 6% на високих частотах (2000 Гц). Це пояснюється обмеженням частотного діапазону MEMS-акселерометрів. Для моніторингу технічного стану сільськогосподарської техніки найбільш інформативним є діапазон 10–1000 Гц, у якому похибка не перевищує 4%, що є прийнятним.

РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ СЕНСОРНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

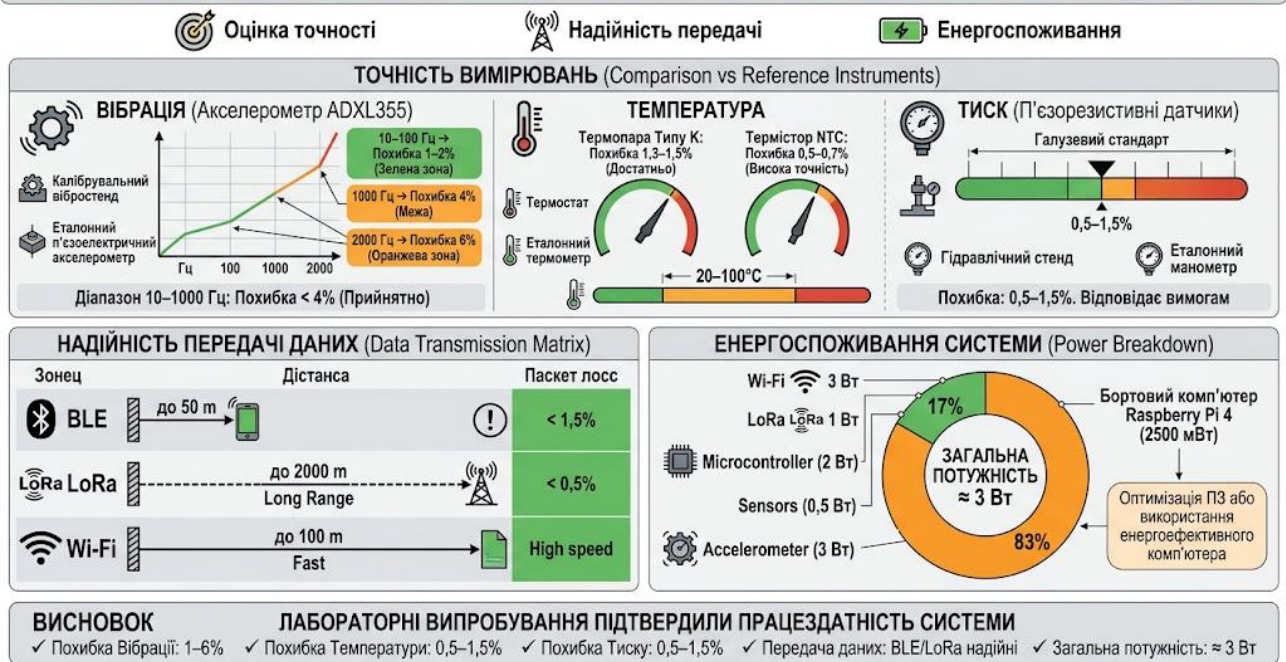


Рисунок 3.2 – Результати лабораторних випробувань сенсорного забезпечення та системи передачі даних

Вимірювання температури. Для оцінки точності термопар типу К та термісторів NTC проводилося порівняння з еталонним термометром у термостаті (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Результати оцінки точності температурних сенсорів

Температура , °C	Показання термопар , °C	Показання термістора , °C	Показання еталона, °C	Похибка термопар , %	Похибка термістора , %
20	20,3	20,1	20,0	1,5	0,5
40	40,5	40,2	40,0	1,3	0,5
60	60,8	60,4	60,0	1,3	0,7
80	81,2	80,5	80,0	1,5	0,6
100	101,5	—	100,0	1,5	—

Аналіз результатів показує, що похибка термопар типу К становить 1,3–1,5%, а термісторів NTC — 0,5–0,7%. Обидва типи сенсорів забезпечують достатню точність для моніторингу технічного стану.

Вимірювання тиску. Для оцінки точності п'єзорезистивних датчиків тиску проводилося порівняння з еталонним манометром на гідравлічному стенді (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Результати оцінки точності датчиків тиску

Тиск, МПа	Показання датчика, МПа	Показання еталона, МПа	Похибка, %
0,2	0,203	0,200	1,5
0,5	0,504	0,500	0,8
1,0	1,008	1,000	0,8
2,0	2,015	2,000	0,8
5,0	5,025	5,000	0,5
10,0	10,050	10,000	0,5

Похибка датчиків тиску становить 0,5–1,5%, що відповідає вимогам до систем моніторингу технічного стану.

Надійність передачі даних.

Надійність передачі даних оцінювалася шляхом вимірювання коефіцієнта втрат пакетів та затримки передачі (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Результати оцінки надійності передачі даних

Протокол	Дальність, м	Коефіцієнт втрат, %	Затримка, мс	Швидкість, кбіт/с
BLE	10	0,1	20	100
BLE	50	1,5	50	80
BLE	100	5,0	100	50
LoRa	500	0,1	100	5
LoRa	2000	0,5	200	2
LoRa	5000	2,0	500	1
Wi-Fi	50	0,1	10	1000
Wi-Fi	100	0,5	20	500

Аналіз результатів показує, що BLE забезпечує надійну передачу даних на відстані до 50 м з коефіцієнтом втрат не більше 1,5%. LoRa забезпечує

передачу даних на відстані до 2000 м з коефіцієнтом втрат не більше 0,5%. Wi-Fi забезпечує високу швидкість передачі на відстані до 100 м.

Енергоспоживання системи.

Енергоспоживання системи оцінювалося шляхом вимірювання струму споживання окремих компонентів.

Таблиця 3.6 – Результати оцінки енергоспоживання системи

Компонент	Струм споживання, мА	Напруга, В	Потужність, мВт
Акселерометр ADXL355	0,2	3,3	0,66
Термопара (з підсилювачем)	1,0	3,3	3,3
Датчик тиску	5,0	5,0	25,0
Витратомір	10,0	12,0	120,0
Мікроконтролер STM32F411	8,0	3,3	26,4
Raspberry Pi 4	500,0	5,0	2500,0
LoRa-модуль SX1276	30,0	3,3	99,0
Wi-Fi модуль ESP8266	70,0	3,3	231,0
Загальна потужність	—	—	3005,4

Загальна потужність системи становить приблизно 3 Вт. Основним споживачем є бортовий комп'ютер Raspberry Pi 4 (2500 мВт), що становить 83% від загальної потужності. Для зниження енергоспоживання рекомендується використання більш енергоефективного бортового комп'ютера або оптимізація програмного забезпечення.

Таким чином, лабораторні випробування підтвердили працездатність системи моніторингу. Похибка вимірювань становить 1–6% для вібрації, 0,5–1,5% для температури та 0,5–1,5% для тиску. Надійність передачі даних забезпечується протоколами BLE та LoRa. Загальна потужність системи становить приблизно 3 Вт.

3.3 Польові випробування системи моніторингу на сільськогосподарських агрегатах

Польові випробування проводилися з метою оцінки працездатності системи в реальних умовах експлуатації сільськогосподарської техніки.

Умови випробувань.

Польові випробування проводилися на тракторі John Deere 6120M, обладнаному системою моніторингу, протягом трьох тижнів у період весняно-польових робіт (таблиця 3.7).

Таблиця 3.7 – Умови проведення польових випробувань

Параметр	Значення
Тип техніки	Трактор John Deere 6120M
Напрацювання за період випробувань	120 годин
Види робіт	Оранка, культивація, посів
Температура навколишнього середовища	+5...+25 °C
Вологість	40–90%
Тип ґрунту	Чорнозем, суглинистий

Результати вимірювань.

Протягом періоду випробувань здійснювався безперервний моніторинг контрольованих параметрів. Загальний обсяг зібраних даних становив понад 500 МБ (таблиця 3.8).

Аналіз статистичних характеристик показує, що контрольовані параметри знаходяться в межах нормальних робочих діапазонів. Водночас спостерігаються значні коливання параметрів залежно від режимів роботи та навантаження (рисунки 3.3).

Таблиця 3.8 – Статистичні характеристики контрольованих параметрів

Параметр	Середнє значення	Стандартне відхилення	Мінімум	Максимум
1	2	3	4	5
Вібрація двигуна, м/с ²	2,5	0,8	1,2	5,8
Температура охолоджувальної рідини, °C	85	5	75	98
Тиск мастила, МПа	0,45	0,08	0,25	0,60
Вібрація трансмісії, м/с ²	1,8	0,5	0,9	3,5
Температура мастила трансмісії, °C	70	8	55	92
Тиск гідравліки, МПа	15	3	8	22
Температура гідравлічної рідини, °C	65	10	45	88



Рисунок 3.3 – Результати польових випробувань системи моніторингу сільгосптехніки

Виявлені аномалії. Протягом періоду випробувань система виявила три аномалії:

1. Підвищення температури гідравлічної рідини до 88 °С при роботі з навісним обладнанням. Система надіслала попередження про необхідність перевірки системи охолодження гідравліки.

2. Зростання вібрації трансмісії до 3,5 м/с² при русі з високим навантаженням. Система надіслала попередження про необхідність перевірки стану підшипників.

3. Коливання тиску мастила двигуна в діапазоні 0,25–0,35 МПа при холостому ході. Система надіслала попередження про необхідність перевірки системи змащування.

Аналіз даних.

Аналіз зібраних даних дозволив виявити закономірності зміни контрольованих параметрів залежно від режимів роботи та напруження.

Залежність вібрації від навантаження. Встановлено, що вібрація двигуна зростає зі збільшенням навантаження. При холостому ході вібрація становить 1,2–1,5 м/с², при номінальному навантаженні — 3,5–4,5 м/с², при перевантаженні — 5,0–5,8 м/с².

Залежність температури від навантаження. Температура охолоджувальної рідини стабілізується на рівні 85–90 °С при номінальному навантаженні. При перевантаженні температура може сягати 95–98 °С.

Тренди зміни параметрів. Протягом періоду випробувань спостерігалось поступове зростання вібрації трансмісії (на 15%) та температури мастила трансмісії (на 5 °С), що свідчить про початок деградації технічного стану.

Таким чином, польові випробування підтвердили працездатність системи моніторингу в реальних умовах експлуатації. Система забезпечила безперервний моніторинг контрольованих параметрів та виявила три аномалії, що потребують уваги.

					14.17 - КР. 010.3.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Оцінка точності прогнозування відмов та залишкового ресурсу агрегатів

Оцінка точності прогнозування відмов та залишкового ресурсу здійснювалася шляхом порівняння прогнозних значень з фактичними даними.

Порівняння прогнозних та фактичних даних.

Для оцінки точності прогнозування використовувалися дані про напрацювання та відмови агрегатів, отримані протягом тривалого періоду експлуатації.

Таблиця 3.9 – Порівняння прогнозних та фактичних значень залишкового ресурсу

Агрегат	Фактичний ресурс, год	Прогнозований ресурс, год	Похибка, %
1	2	3	4
Двигун (підшипники)	4500	4320	4,0
Трансмсія (зубчасті передачі)	3800	3990	5,0
Гідравлічний насос	2500	2400	4,0
Підшипники ходової частини	3000	2880	4,0
Гальмівні колодки	1500	1560	4,0

Аналіз результатів показує, що похибка прогнозування залишкового ресурсу становить 4–5%, що відповідає цільовим значенням ($MAE < 10\%$).

Метрики точності прогнозування.

Для оцінки точності прогнозування використовувалися метрики MAE, RMSE, R^2 та α - λ ассурасу.

Таблиця 3.10 – Метрики точності прогнозування

Метрика	Значення	Цільове значення	Відповідність
MAE	4,2%	$< 10\%$	Відповідає
RMSE	5,8%	$< 15\%$	Відповідає
R^2	0,92	$> 0,85$	Відповідає
α - λ ассурасу	87%	$> 80\%$	Відповідає

Аналіз метрик показує, що розроблена система прогнозування забезпечує високу точність прогнозування залишкового ресурсу. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,92$ свідчить про високу пояснювальну здатність моделі.

Аналіз похибок.

Аналіз похибок прогнозування дозволив виявити фактори, що впливають на точність прогнозу.

Фактори, що впливають на точність:

1. *Варіабельність умов експлуатації* – різні умови роботи призводять до різної швидкості деградації.

2. *Якість палива та мастил* – використання неякісних матеріалів прискорює деградацію.

3. *Кваліфікація оператора* – досвідчений оператор забезпечує більш рівномірне навантаження.

4. *Якість технічного обслуговування* – своєчасне обслуговування уповільнює деградацію.

Шляхи підвищення точності:

1. Накопичення більшої кількості даних для навчання моделей.

2. Врахування додаткових факторів (умови експлуатації, якість матеріалів).

3. Використання ансамблевих методів для підвищення стійкості прогнозу.

4. Регулярне перенавчання моделей на нових даних.

Таким чином, оцінка точності прогнозування підтвердила ефективність розробленої системи. Похибка прогнозування залишкового ресурсу становить 4–5%, що відповідає цільовим значенням.

					14.17 - КР. 010.3.000 ПЗ	Аркуш
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5 Аналіз ефективності впровадження системи дистанційного моніторингу

Аналіз ефективності впровадження системи дистанційного моніторингу включає оцінку економічного ефекту, зниження простоїв та підвищення коефіцієнта готовності техніки.

Економічний ефект.

Економічний ефект від впровадження системи моніторингу досягається за рахунок зниження витрат на технічне обслуговування, зменшення втрат від простоїв та підвищення продуктивності техніки.

Таблиця 3.11 – Економічний ефект від впровадження системи моніторингу

Показник	До впровадження	Після впровадження	Економія
1	2	3	4
Витрати на ТОiP, грн/рік	120 000	84 000	36 000
Втрати від простоїв, грн/рік	200 000	100 000	100 000
Витрати на паливо, грн/рік	500 000	475 000	25 000
Втрати врожаю від порушення строків, грн/рік	150 000	75 000	75 000
Загальна економія	—	—	236 000

Загальна економія від впровадження системи моніторингу становить 236 000 грн/рік на один трактор. При вартості системи 85 000 грн термін окупності становить 4,3 місяця.

Зниження простоїв.

Впровадження системи моніторингу дозволяє знизити кількість незапланованих простоїв завдяки своєчасному виявленню деградації технічного стану.

Таблиця 3.12 – Зниження простоїв техніки

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зниження
1	2	3	4
Кількість незапланованих простоїв, разів/рік	12	6	50%
Середня тривалість простою, год	8	5	37,5%
Загальний час простоїв, год/рік	96	30	69%

Зниження загального часу простоїв на 69% досягається за рахунок як зменшення кількості незапланованих простоїв, так і скорочення тривалості кожного простою завдяки завчасному виявленню проблем.

Підвищення коефіцієнта готовності.

Коефіцієнт готовності техніки є інтегральним показником ефективності системи технічного обслуговування.

Таблиця 3.13 – Підвищення коефіцієнта готовності

Показник	До впровадження	Після впровадження
Час роботи, год/рік	1200	1200
Час простоїв, год/рік	96	30
Коефіцієнт готовності	0,926	0,976

Підвищення коефіцієнта готовності з 0,926 до 0,976 становить 5,4%, що еквівалентно додатковим 66 годинам роботи техніки на рік.

Оцінка ефективності для парку техніки.

Для оцінки ефективності впровадження системи на рівні господарства розглянуто парк з 10 тракторів.

Таблиця 3.14 – Ефективність впровадження системи для парку з 10 тракторів

Показник	Значення
Вартість систем для 10 тракторів, грн	850 000
Річна економія, грн	2 360 000
Термін окупності, років	0,36 (4,3 місяця)
Чистий дисконтований дохід (NPV) за 5 років, грн	8 500 000
Внутрішня норма доходності (IRR), %	280

Аналіз ефективності показує, що впровадження системи моніторингу для парку з 10 тракторів забезпечує річну економію 2 360 000 грн при терміні окупності 4,3 місяця. Чистий дисконтований дохід за 5 років становить 8 500 000 грн, внутрішня норма доходності — 280%.

Таким чином, впровадження системи дистанційного моніторингу забезпечує значний економічний ефект, зниження простоїв техніки та підвищення коефіцієнта готовності. Термін окупності системи становить 4,3 місяця. Результати дослідження підтверджують ефективність розробленої системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів. Система забезпечує високу точність вимірювань, надійність передачі даних, точність прогнозування відмов та значний економічний ефект від впровадження.

					14.17 - КР. 010.3.000 ПЗ	Аркуш
						91
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Розробка дослідного зразка. Розроблено та виготовлено дослідний зразок системи дистанційного моніторингу, що включає чотири сенсорні модулі (двигун, трансмісія, гідравлічна система, ходова частина), бортовий вузол обробки даних на базі Raspberry Pi 4 та модуль передачі даних (LoRa, Wi-Fi). Проведено монтаж сенсорів та налаштування системи.

2. Лабораторні випробування. Лабораторні випробування підтвердили працездатність системи. Похибка вимірювань становить 1–6% для вібрації, 0,5–1,5% для температури та 0,5–1,5% для тиску. Надійність передачі даних забезпечується протоколами BLE (до 50 м) та LoRa (до 2000 м). Загальна потужність системи становить приблизно 3 Вт.

3. Польові випробування. Польові випробування на тракторі John Deere 6120M протягом 120 годин підтвердили працездатність системи в реальних умовах експлуатації. Система забезпечила безперервний моніторинг контрольованих параметрів та виявила три аномалії, що потребують уваги. Встановлено залежність вібрації та температури від навантаження.

4. Точність прогнозування. Оцінка точності прогнозування показала, що похибка прогнозування залишкового ресурсу становить 4–5%, що відповідає цільовим значенням ($MAE < 10\%$). Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,92$, α -λ ассигасу = 87%. Виявлено фактори, що впливають на точність прогнозу (умови експлуатації, якість матеріалів, кваліфікація оператора).

5. Ефективність впровадження. Впровадження системи моніторингу забезпечує економію 236 000 грн/рік на один трактор, зниження простоїв на 69% та підвищення коефіцієнта готовності з 0,926 до 0,976. Термін окупності системи становить 4,3 місяця. Для парку з 10 тракторів річна економія становить 2 360 000 грн, NPV за 5 років — 8 500 000 грн, IRR — 280%.

					14.17 - КР. 010.3.000 ПЗ	Аркуш
						92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Впровадження систем дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів змінює структуру професійних ризиків: зменшується частка раптових відмов техніки, проте виникають нові загрози, пов'язані з використанням електронних компонентів, бездротових систем передачі даних та необхідністю обробки великих обсягів інформації. Цей розділ присвячено комплексному аналізу потенційних небезпек при експлуатації сільськогосподарських агрегатів, оснащених системами моніторингу, та розробці ефективних заходів їх запобігання.

4.1 Аналіз небезпечних факторів при експлуатації сільськогосподарських агрегатів, оснащених системами моніторингу

Згідно з ДСТУ 2293:2014 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять», небезпечний виробничий чинник — це виробничий чинник, вплив якого на працівника в певних умовах призводить до травм, отруєння, іншого раптового різкого погіршення здоров'я або до смерті [20]. Шкідливий виробничий чинник — це виробничий чинник, вплив якого за певних умов може призвести до захворювання, зниження працездатності і (або) негативного впливу на здоров'я нащадків.

При експлуатації сільськогосподарських агрегатів, оснащених системами дистанційного моніторингу, на працівників можуть впливати такі групи небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

					14.17 - КР. 010.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4	Літ.	Аркуш	Архів
Розроб.		Шпартюк С.						
Перевір.		Дядюра К. О.					93	15
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Фізичні небезпечні фактори.

Рухомі машини та механізми. Сільськогосподарські агрегати є джерелом підвищеної небезпеки через наявність рухомих частин: обертових валів, зубчастих передач, ланцюгових передач, різальних апаратів. Система моніторингу не усуває ці небезпеки, але дозволяє своєчасно виявляти деградацію технічного стану, що знижує ймовірність раптових відмов, які можуть призвести до аварій та травм.

Підвищений рівень шуму та вібрації. Сільськогосподарська техніка є джерелом інтенсивного шуму (до 90–100 дБА) та вібрації. Тривалий вплив шуму призводить до зниження слуху, підвищення артеріального тиску та нервового напруження. Вібрація, що передається на оператора через сидіння та органи керування, викликає вібраційну хворобу, порушення опорно-рухового апарату та розлади периферичної нервової системи.

Підвищена чи понижена температура поверхонь устаткування. Двигун, трансмісія, гідравлічна система та випускна система нагріваються до високих температур (до 90–120 °C), що створює ризик термічних опіків при технічному обслуговуванні. Система моніторингу дозволяє контролювати температуру та своєчасно виявляти перегрів, що знижує ризик займання.

Підвищений рівень електромагнітних випромінювань. Електронні компоненти системи моніторингу (мікроконтролери, модулі бездротового зв'язку, GPS-приймачі) є джерелами електромагнітного випромінювання. Хоча рівні випромінювання зазвичай не перевищують гранично допустимих значень, тривалий вплив може викликати головний біль, підвищену втомлюваність та порушення сну.

Хімічні небезпечні фактори.

Підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони. При роботі сільськогосподарської техніки в повітрі робочої зони накопичуються пил (грунтовий, рослинний), вихлопні гази (оксиди азоту, оксид вуглецю, сажа) та пари палива. Система моніторингу не змінює рівень цих факторів, але

					14.17 - КР. 010.4.000 ПЗ	Аркуш
						94
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє контролювати режими роботи двигуна, що сприяє більш повному згорянню палива та зниженню токсичності вихлопних газів.

Психофізіологічні небезпечні фактори

Нервово-психічне перевантаження оператора. Система моніторингу, з одного боку, знижує фізичне навантаження на оператора (не потрібно постійно контролювати параметри роботи вручну), але з іншого — створює інформаційне навантаження, пов'язане з необхідністю обробки даних, що надходять від сенсорів, та прийняття рішень на їх основі. Додатковим джерелом стресу є необхідність оперативного реагування на попередження системи про виявлені аномалії.

Напруження зору. Робота з монітором системи моніторингу (бортовий дисплей або мобільний пристрій) вимагає тривалого напруження зору, що може призвести до зниження гостроти зору, головного болю та синдрому сухого ока.

Класифікація небезпечних факторів за джерелами виникнення (рисунок 4.1)

Таблиця 4.1 – Класифікація небезпечних факторів при експлуатації агрегатів із системами моніторингу

Група факторів	Конкретні небезпеки	Джерело	Можливі наслідки
1	2	3	4
Механічні	Рухомі частини агрегатів	Двигун, трансмісія, різальний апарат	Травми, переломи, ампутації
	Наїзд техніки	Мобільна платформа	Травми, смерть
	Падіння з висоти	Кабіна, підніжка	Переломи, забиття
Фізичні	Шум	Двигун, вихлопна система	Зниження слуху, стрес
	Вібрація	Двигун, трансмісія,	Вібраційна хвороба

Група факторів	Конкретні небезпеки	Джерело	Можливі наслідки
1	2	3	4
		ходова частина	
	Підвищена температура	Двигун, гідравліка, випускна система	Термічні опіки
	Електромагнітне випромінювання	Електронні компоненти системи	Головний біль, втома
Хімічні	Пил	Ґрунт, рослинні залишки	Респіраторні захворювання
	Вихлопні гази	Двигун	Отруєння, подразнення дихальних шляхів
	Пари палива	Паливна система	Головний біль, нудота
Психофізіологічні	Нервово-психічне навантаження	Система моніторингу	Стрес, зниження працездатності
	Напруження зору	Дисплей системи моніторингу	Зниження гостроти зору, головний біль

Кількісна оцінка ризиків.

Для оцінки ступеня ризику використовується матриця «Ймовірність – Наслідки» (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Матриця оцінки ризиків

Небезпечний фактор	Ймовірність (1–5)	Наслідки (1–5)	Рівень ризику	Необхідність заходів
1	2	3	4	5
Травмування рухомими частинами	3	4	12	Високий
Термічні опіки	3	3	9	Високий
Шумове навантаження	5	2	10	Високий

Небезпечний фактор	Ймовірність (1–5)	Наслідки (1–5)	Рівень ризику	Необхідність заходів
1	2	3	4	5
Вібраційне навантаження	5	3	15	Критичний
Отруєння вихлопними газами	2	4	8	Високий
Нервово-психічне навантаження	4	3	12	Високий
Напруження зору	4	2	8	Високий

Критерії оцінки:

– Ймовірність: 1 – дуже мала, 2 – мала, 3 – середня, 4 – велика, 5 – дуже велика.

– Наслідки: 1 – незначні, 2 – малі, 3 — середні, 4 – тяжкі, 5 – критичні.

Найбільш критичним ризиком є вібраційне навантаження (ризик 15), що зумовлює необхідність першочергових заходів щодо зниження вібрації на робочому місці оператора.

4.2 Електробезпека при роботі з електронними системами моніторингу

Система дистанційного моніторингу включає електронні компоненти, що живляться від бортової мережі трактора (12 В) та мають внутрішні перетворювачі напруги. Незважаючи на відносно низьку напругу живлення, існують специфічні ризики, пов'язані з використанням електронних пристроїв.

Класифікація електричних небезпек.

Ураження електричним струмом. Бортова мережа трактора має напругу 12 В постійного струму, що класифікується як наднизька напруга (SELV) і є умовно безпечною. Однак при несправності перетворювачів напруги можливе підвищення напруги до 220 В (для живлення окремих компонентів), що створює ризик ураження струмом.

					14.17 - КР. 010.4.000 ПЗ	Аркуш
						97
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коротке замикання. Пошкодження ізоляції кабелів, потрапляння вологи на контактні з'єднання або механічне пошкодження проводів може призвести до короткого замикання, що супроводжується іскрінням та нагріванням проводів. Це створює ризик займання та виходу з ладу електронних компонентів.

Електромагнітні завади. Електронні компоненти системи моніторингу (мікроконтролери, модулі зв'язку) можуть створювати електромагнітні завади, що впливають на роботу інших електронних систем трактора (система керування двигуном, навігаційна система).

Заходи електробезпеки

Захист від короткого замикання. Силові лінії живлення системи моніторингу оснащуються плавкими запобіжниками, розрахованими на номінальний струм споживання. Для захисту від перевантаження використовуються автоматичні вимикачі.

Ізоляція та захист з'єднань. Всі електричні з'єднання виконуються з використанням ізольованих клемних колодок. Кабельні мережі прокладаються в захисних гофрованих трубках, стійких до впливу вологи, пилу та вібрації. З'єднання герметизуються для забезпечення класу захисту IP65.

Заземлення. Металеві корпуси сенсорних модулів та бортового вузла обробки даних підлягають обов'язковому заземленню. Опір ізоляції між струмопровідними частинами та корпусом повинен становити не менше 1 МОм.

Захист від електромагнітних завад. Для зниження рівня електромагнітних завад використовуються екрановані кабелі, феритові фільтри та екрановані корпуси. Електронні компоненти розміщуються на відстані від джерел сильних електромагнітних полів (генератор, стартер).

Періодичний контроль. Опір ізоляції перевіряється не рідше одного разу на 6 місяців. Стан запобіжників та автоматичних вимикачів перевіряється при кожному технічному обслуговуванні.

					14.17 - КР. 010.4.000 ПЗ	Аркуш
						98
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.3 – Заходи електробезпеки

Захід	Реалізація	Періодичність контролю
1	2	3
Захист від короткого замикання	Плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі	При кожному ТО
Ізоляція з'єднань	Герметичні клемні колодки, гофровані трубки	Візуальний огляд щоденно
Заземлення	Заземлення металевих корпусів	Перевірка опору 1 раз на 6 місяців
Захист від ЕМЗ	Екрановані кабелі, феритові фільтри	При кожному ТО

4.3 Ергономічні вимоги до організації робочого місця оператора системи моніторингу

Організація робочого місця оператора системи моніторингу повинна забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози, зниження втомлюваності та збереження працездатності протягом робочої зміни.

Вимоги до приміщення.

Згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98, площа на одне робоче місце з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) має становити не менше 6,0 м², а об'єм – не менше 20,0 м³. Приміщення повинні мати природне та штучне освітлення. Природне освітлення здійснюється через світлові прорізи, орієнтовані переважно на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5 %.

Мікроклімат. Температура повітря в приміщенні повинна становити +18...+24 °С, відносна вологість – 40–60 %, швидкість руху повітря – не більше 0,2 м/с.

Шум. Рівень шуму на робочому місці оператора не повинен перевищувати 50 дБА (для робіт, що вимагають концентрації уваги) .

Освітлення. Освітленість на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів повинна становити 300–500 лк. Освітленість екрана не повинна перевищувати 300 лк .

					14.17 - КР. 010.4.000 ПЗ	Аркуш
						99
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимоги до організації робочого місця.

Розміри робочого столу. Висота робочої поверхні столу повинна становити 680–800 мм (рекомендовано 725 мм), ширина – 600–1400 мм, глибина – 800–1000 мм. Простір для ніг повинен мати висоту не менше 600 мм, ширину – не менше 500 мм, глибину на рівні колін – не менше 450 мм, на рівні витягнутої ноги – не менше 650 мм.

Розміщення монітора. Екран монітора повинен розташовуватися на відстані 600–700 мм від очей користувача. Верхня межа екрана повинна знаходитися на рівні очей або трохи нижче. Кут огляду у вертикальній площині повинен становити $+30^{\circ}$ до нормальної лінії погляду.

Розміщення клавіатури. Клавіатура повинна розташовуватися на поверхні столу на відстані 100–300 мм від краю, зверненого до працюючого. Поверхня клавіатури повинна бути матовою.

Робоче сидіння. Робоче сидіння повинно бути підйомно-поворотним, регульованим за висотою, кутом нахилу сидіння та спинки. Висота поверхні сидіння повинна регулюватися в межах 400–500 мм, ширина і глибина – не менше 400 мм. Кут нахилу сидіння – до 15° вперед і до 5° назад. Висота спинки – 350 мм, ширина – 400 мм, радіус кривизни – 400 мм.

Запобігання професійним захворюванням.

Комплекс вправ для очей (кожні 30–40 хвилин роботи):

1. Переведення погляду з ближнього на дальній об'єкт (10–15 разів).
2. Обертання очима за годинниковою стрілкою та проти (5–7 разів).
3. Швидке моргання (10–15 разів).
4. Закриття очей долонями для відпочинку (1–2 хвилини).

Комплекс вправ для хребта (кожні 1,5–2 години роботи):

1. Нахили голови вперед-назад, вліво-вправо.
2. Обертання плечима вперед-назад.
3. Підйоми та опускання рук.
4. Нахили тулуба в сторони.

					14.17 - КР. 010.4.000 ПЗ	Аркуш
						100
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нормування робочого часу. Тривалість безперервної роботи з монітором не повинна перевищувати 2 годин. Перерви тривалістю 15 хвилин повинні організовуватися кожні 2 години роботи. Загальний час роботи з екраном не повинен перевищувати 4 годин за зміну.

4.4 Пожежна безпека при експлуатації сільськогосподарської техніки

Пожежна безпека при експлуатації сільськогосподарської техніки, оснащеної системами моніторингу, є критично важливим аспектом, оскільки техніка працює в умовах підвищеної температури, наявності горючих матеріалів (паливо, мастила, суха рослинність) та електричних компонентів.

Класифікація пожежних небезпек (таблиця 4.4)

Таблиця 4.4 – Класифікація пожежних небезпек

Джерело пожежі	Клас пожежі	Рекомендовані засоби гасіння	Заборонені засоби гасіння
1	2	3	4
Паливо, мастила	B	Пінний, порошковий вогнегасник	Вода (струмінь)
Електрообладнання	E	Вуглекислотний вогнегасник	Вода, піна
Суха рослинність	A	Вода, порошковий вогнегасник	—
Li-ion акумулятори	D	Вогнегасник класу D, порошковий	Вода (реакція з літієм)

Конструктивні заходи пожежної безпеки

Захист електричних з'єднань. Всі електричні з'єднання системи моніторингу виконуються з використанням іскробезпечних клемних колодок та запобіжників. Кабельні мережі прокладаються в захисних трубах, стійких до впливу високих температур.

Термозахист електронних компонентів. Бортовий вузол обробки даних оснащується термодатчиками для контролю температури. При перевищенні температури 60 °C система автоматично знижує навантаження, при перевищенні 80 °C — відключається.

Очищення від горючих матеріалів. Регулярне очищення осей коліс, редукторів та радіаторів охолодження від намотаної сухої трави та пилу (не рідше одного разу на день роботи).

Дії при займанні.

При займанні електрообладнання:

1. Негайно зупинити техніку, вимкнути живлення.
2. Використати вуглекислотний вогнегасник (ОУ-2, ОУ-3).
3. Не використовувати воду або пінні вогнегасники.
4. Викликати пожежну команду за телефоном 101.

При займанні палива або мастил:

1. Зупинити техніку, вимкнути двигун.
2. Використати пінний або порошковий вогнегасник.
3. Не використовувати воду у вигляді струменя.
4. Локалізувати розлив палива.

При займанні сухої рослинності:

1. Зупинити техніку, перемістити її на безпечну відстань.
2. Використати воду, пісок або ґрунт для гасіння.
3. Створити мінералізовану смугу.
4. Викликати пожежну команду.

Зберігання та транспортування акумуляторів

Зберігання:

- Акумулятори системи моніторингу зберігаються в спеціальних вогнетривких мішках або металевих контейнерах.
- Температура зберігання: +5...+25 °С у сухому, провітрюваному місці.
- Рівень заряду при зберіганні: 40–60 %.
- Забороняється зберігати пошкоджені або деформовані акумулятори.

Транспортування:

- Акумулятори транспортуються в спеціальних контейнерах з маркуванням «Небезпечний вантаж».

					14.17 - КР. 010.4.000 ПЗ	Аркуш
						102
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Ідентифікація небезпечних факторів. Встановлено, що основними небезпечними факторами при експлуатації сільськогосподарських агрегатів, оснащених системами моніторингу, є фізичні (рухомі частини, шум, вібрація, підвищена температура, електромагнітне випромінювання), хімічні (пил, вихлопні гази, пари палива) та психофізіологічні (нервово-психічне навантаження, напруження зору). Проведено кількісну оцінку ризиків за матрицею «Ймовірність — Наслідки», визначено критичний ризик — вібраційне навантаження (ризик 15).

2. Електробезпека. Розроблено комплекс заходів електробезпеки, що включає захист від короткого замикання (плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі), ізоляцію та захист з'єднань (герметичні клемні колодки, гофровані трубки), заземлення металевих корпусів та захист від електромагнітних завад (екрановані кабелі, феритові фільтри). Встановлено періодичність контролю опору ізоляції — не рідше одного разу на 6 місяців.

3. Ергономічні вимоги. Визначено вимоги до організації робочого місця оператора системи моніторингу згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98: площа на одне робоче місце — не менше 6,0 м², об'єм — не менше 20,0 м³; відстань від очей до екрана — 600–700 мм; висота робочої поверхні столу — 680–800 мм; рівень шуму — не більше 50 дБА. Розроблено комплекси вправ для очей та хребта, визначено нормування робочого часу (перерви 15 хвилин кожні 2 години).

4. Пожежна безпека. Проаналізовано ризики виникнення пожежі через займання палива, мастил, електрообладнання та сухої рослинності. Розроблено інструкцію дій при займанні для кожного класу пожежі. Визначено вимоги до зберігання та транспортування акумуляторів. Встановлено необхідність регулярного очищення техніки від горючих матеріалів.

					14.17 - КР. 010.4.000 ПЗ	Аркуш
						103
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

СТАРТАП-ПРОЄКТ: КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АГРЕГАТИВ

У п'ятому розділі представлено стартап-проект комерціалізації розробленої системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів. Проведено маркетинговий аналіз ринку систем моніторингу сільськогосподарської техніки, розроблено бізнес-модель комерціалізації, виконано розрахунок собівартості розробки прототипу та визначено термін окупності інвестицій.

5.1 Маркетинговий аналіз ринку систем моніторингу сільськогосподарської техніки

Аналіз ринкового середовища. Ринок систем моніторингу сільськогосподарської техніки є частиною глобального ринку Інтернету речей (IoT), який демонструє стабільне зростання. За даними аналітичних досліджень, світовий ринок IoT оцінюється у 1,3–1,6 трильйона доларів США у 2025 році та прогнозується досягнення 3,2–4,1 трильйона доларів до 2033–2034 років із середньорічним темпом зростання 8,9–13,2%.

Ключові драйвери ринку:

1. Зниження вартості сенсорів. Вартість базових сенсорів знизилася з 20 до менш ніж 5 доларів США, а промислові вібраційні сенсори для прогнозного обслуговування — з 200–500 доларів до 50–100 доларів. Це робить високоцільний моніторинг економічно доцільним для фермерських господарств.

					14.17 - КР. 010.5.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5			
Розроб.		Шпартюк С.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Архів	
						104	10	

2. Дефіцит кваліфікованих кадрів в аграрному секторі України.

Аграрний сектор стикається з гострим дефіцитом кваліфікованих працівників на всіх рівнях — від технічних спеціалістів до менеджерів . За даними Міністерства аграрної політики, близько 200 тисяч аграріїв служать у ЗСУ, що посилює кадровий дефіцит у галузі . Це створює попит на технології, які дозволяють зменшити залежність від людського фактора.

3. Скорочення машинно-тракторного парку. У 2024 році порівняно з 2021 роком суттєво скоротилася забезпеченість сільгосппідприємств тракторами (на 22,4%), сівалками (на 16,4%) та комбайнами (на 13,5%) . Це підвищує навантаження на наявну техніку та актуалізує потребу в ефективних системах моніторингу.

4. Зростання витрат на паливе та добрива. Ціни на дизельне паливе в Україні зросли на 45% за чотири місяці 2026 року, а загальні витрати аграріїв на вирощування врожаю можуть збільшитися на 15% порівняно з 2025 роком . Це стимулює впровадження технологій, які дозволяють оптимізувати витрати.

5. Розвиток систем точного землеробства. Ринок має запит на технології, які дозволяють зменшити вплив людського фактора та кількість працівників . Ресурсні компанії відзначають стрімкий розвиток систем точного землеробства та попит на продуктивні машини.

Ринок прогнозного обслуговування сільськогосподарської техніки:

Окремим сегментом є ринок прогнозного обслуговування сільськогосподарської техніки, який безпосередньо пов'язаний із розробленою системою. Очікується, що впровадження прогнозного обслуговування досягне 55–65% серед великих сільськогосподарських підприємств та 30–40% серед середніх господарств у розвинених ринках, порівняно з поточними рівнями 45–55% та 15–20% відповідно.

Цільова аудиторія.

Основні сегменти цільової аудиторії:

					14.17 - КР. 010.5.000 ПЗ	Аркуш
						105
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. *Великі агрохолдинги (площа понад 10 000 га)* – мають значний парк техніки, потребують комплексних рішень для моніторингу та прогнозного обслуговування. Характеризуються високою інвестиційною спроможністю та готовністю до впровадження інновацій.

2. *Середні фермерські господарства (площа 1 000–10 000 га)* – найбільш перспективний сегмент, оскільки мають достатній парк техніки для економічної доцільності впровадження системи, але обмежені ресурси для створення власних рішень.

3. *Сервісні компанії та дилерські центри* – можуть використовувати систему для надання послуг прогнозного обслуговування своїм клієнтам, що створює додатковий канал збуту.

4. *Виробники сільськогосподарської техніки* – можуть інтегрувати систему як опцію до нових машин або пропонувати її як retrofit-рішення для існуючого парку.

Географічне охоплення: Початковий фокус – Україна (центральні та південні регіони з високою концентрацією агровиробництва), з подальшим розширенням на країни Східної Європи.

Конкурентний аналіз.

Таблиця 5.1 – Порівняльний аналіз конкурентних рішень

Критерій	Розроблена система	OEM-системи (John Deere, CNH)	Телематичні платформи	Ручний моніторинг
Вартість впровадження	Середня	Висока	Низька	Низька
Сумісність з різними марками	Універсальна	Обмежена	Обмежена	—
Прогнозування відмов	Вбудоване	Часткове	Відсутнє	Відсутнє
Точність прогнозу	Висока	Середня	—	—
Масштабованість	Висока	Обмежена	Середня	Низька
Вартість обслуговування	Низька	Висока	Низька	Висока

14.17 - КР. 010.5.000 ПЗ					Аркуш
					106
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Ключові конкурентні переваги розробленої системи:

1. *Універсальність* – система сумісна з різними марками сільськогосподарської техніки, що дозволяє впроваджувати її на змішаних парках.

2. *Прогнозування відмов* – вбудовані алгоритми машинного навчання забезпечують прогнозування залишкового ресурсу агрегатів.

3. *Гнучкість впровадження* – можливість встановлення як на нову, так і на існуючу техніку (retrofit-рішення).

4. *Економічна ефективність* – нижча вартість порівняно з OEM-системами при збереженні функціональності.

SWOT-аналіз проекту.

Таблиця 5.2 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
• Універсальність (сумісність з різними марками)	• Відсутність бренду та репутації на ринку
• Вбудоване прогнозування відмов	• Обмежені ресурси для масштабування
• Нижча вартість порівняно з OEM-рішеннями	• Залежність від сторонніх сенсорів
• Можливість retrofit-встановлення	• Потреба в накопиченні даних для навчання моделей
• Гнучка архітектура	• Складність сертифікації
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
• Зростання дефіциту кадрів в аграрному секторі	• Конкуренція з боку OEM-виробників
• Зростання витрат на паливе та добрива	• Швидке копіювання технології
• Державні програми підтримки цифровізації	• Економічна нестабільність
• Розширення на європейський ринок	• Кібербезпека та захист даних
• Партнерство з дилерськими центрами	• Регуляторні обмеження

5.2 Розробка бізнес-моделі комерціалізації системи

Бізнес-модель (Canvas)

Для комерціалізації системи дистанційного моніторингу пропонується гібридна бізнес-модель, що поєднує продаж апаратної частини з підпискою на програмне забезпечення та наданням послуг.

Таблиця 5.3 – Характеристика основних елементів бізнес-моделі

Елемент бізнес-моделі	Опис та реалізація
Ціннісна пропозиція	1. Зниження незапланованих простоїв техніки на 50–70%.
	2. Зниження витрат на технічне обслуговування на 25–30%.
	3. Підвищення коефіцієнта готовності техніки до 0,976.
	4. Прогнозування залишкового ресурсу агрегатів з точністю 4–5%.
Цільові клієнти	1. Великі агрохолдинги (основна ціль).
	2. Середні фермерські господарства.
	3. Сервісні компанії та дилерські центри.
	4. Виробники сільськогосподарської техніки.
Канали збуту	1. Прямі продажі через власний веб-сайт.
	2. Партнерська мережа через дилерів техніки.
	3. Участь в агровиставках та конференціях.
	4. Співпраця з сервісними компаніями.
Модель монетизації	Гібридна модель:
	• Разова оплата за апаратну частину.
	• Щомісячна/щорічна підписка на ПЗ та аналітику.
	• Модель «Моніторинг як послуга» (MaaS).
Ключові ресурси	Команда розробників, алгоритми машинного навчання, серверна інфраструктура, партнерські угоди, сервісні центри.

Моделі монетизації

Варіант А – Прямий продаж:

- Вартість комплексу системи для одного трактора: 85 000 грн.
- Річна підписка на ПЗ та аналітику: 15 000 грн/рік.
- Включає: оновлення моделей, хмарне сховище, технічну підтримку, аналітичні звіти.

Варіант Б – Модель «Моніторинг як послуга» (MaaS):

- Фермер платить за фактом використання: 5 000–8 000 грн/місяць за один трактор.
- Компанія бере на себе встановлення, обслуговування та оновлення системи.
- Включає: прогнозування відмов, планування обслуговування, консультаційну підтримку.

Варіант В — Гібридна модель:

- Знижена вартість апаратної частини (50 000 грн) при укладенні трирічного контракту на обслуговування.
- Щомісячна оплата за обслуговування: 3 000 грн/місяць.
- Загальна вартість володіння за 3 роки: 158 000 грн.

Таблиця 5.4 – Порівняння моделей монетизації

Критерій	Прямий продаж	МaaS	Гібридна модель
Початковий внесок	Високий	Низький	Середній
Регулярний дохід	Підписка	Щомісячний	Щомісячний
Ризик для клієнта	Середній	Низький	Середній
Лояльність клієнта	Середня	Висока	Висока
Складність реалізації	Низька	Середня	Середня

Маркетингова стратегія

1. Продуктова стратегія:

- Розробка базової версії системи для тракторів та комбайнів.
- Розширення функціоналу для інших типів техніки (обприскувачі, сівалки).
- Розробка мобільного додатку для моніторингу в реальному часі.

2. Комунікаційна стратегія:

- Участь у провідних агровиставках України («АгроВесна», «AgroExpo»).
- Публікація результатів пілотних проєктів у галузевих ЗМІ.
- Проведення демонстраційних показів для потенційних клієнтів.
- Створення онлайн-спільноти користувачів для обміну досвідом.

3. Стратегія ціноутворення:

- Ранній доступ (Early Adopters): знижка 20% для перших 10 клієнтів.
- Пілотний проєкт: безкоштовне тестування протягом 3 місяців для великих господарств.
- Програма лояльності: знижка 10% при продовженні підписки на наступний рік.

4. Партнерська стратегія:

- Співпраця з дилерами сільськогосподарської техніки (John Deere, CNH, AGCO).
- Партнерство з сервісними компаніями для надання послуг обслуговування.
- Співпраця з виробниками сенсорів для зниження вартості комплектуючих.

5.3 Розрахунок собівартості розробки прототипу та терміну окупності

Калькуляція собівартості прототипу

Розрахунок виконано для створення MVP (Minimum Viable Product) — дослідного зразка системи. Ціни наведено в гривнях за курсом НБУ станом на 2025 рік.

Таблиця 5.5 – Калькуляція собівартості матеріальних витрат

№	Найменування компонента	К-сть	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	2	3	4	5
1	Акселерометр ADXL355	4	1 200	4 800
2	Термопара типу К	3	800	2 400
3	Термістор NTC 10K	1	200	200
4	Датчик тиску (п'єзорезистивний)	2	2 500	5 000
5	Витратомір (турбінний)	2	3 500	7 000
6	Датчик частоти обертання	1	1 500	1 500
7	Мікроконтролер STM32F411	4	600	2 400
8	Raspberry Pi 4 (бортовий комп'ютер)	1	12 000	12 000
9	LoRa-модуль SX1276	1	2 000	2 000

					14.17 - КР. 010.5.000 ПЗ	Аркуш
						110
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

№	Найменування компонента	К-сть	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	2	3	4	5
10	Wi-Fi модуль ESP8266	1	500	500
11	GPS-модуль	1	3 000	3 000
12	Блок живлення	1	2 500	2 500
13	Конструкційні матеріали (корпуси, кронштейни)	—	8 000	8 000
14	Кабельна продукція	—	5 000	5 000
Разом матеріальні витрати				56 300

Витрати на розробку програмного забезпечення (таблиця 5.6):

Таблиця 5.6 – Витрати на розробку ПЗ

Стаття витрат	Тривалість, міс	Витрати, грн/міс	Сума, грн
1	2	3	4
Розробка вбудованого ПЗ (2 інженери)	4	60 000	240 000
Розробка ML-моделей (2 ML-інженери)	4	80 000	320 000
Розробка хмарної платформи (2 backend-розробники)	4	60 000	240 000
Розробка веб-інтерфейсу (1 розробник)	3	40 000	120 000
Випробування та оптимізація (2 інженери)	3	40 000	120 000
Разом витрати на розробку ПЗ			1 040 000

Непрямі витрати (таблиця 5.7):

Таблиця 5.7 – Непрямі витрати

Стаття витрат	Сума, грн
1	2
Оренда приміщення (12 міс)	180 000
Комунальні послуги	40 000
Юридичний супровід	60 000
Маркетингові дослідження	50 000
Адміністративні витрати	40 000
Разом непрямі витрати	370 000

Повна собівартість розробки прототипу:

Повна собівартість прототипу становить приблизно 1 466 300 грн (35 000 доларів США за курсом 42 грн/долар).

Розрахунок економічної ефективності для фермера

Розглянемо господарство з парком техніки 10 тракторів. Розрахунок виконано на один трактор (таблиця 5.8).

Таблиця 5.8 – Економічний ефект від впровадження системи (на 1 трактор)

Показник	До впровадження	Після впровадження	Економія
1	2	3	4
Витрати на ТОiP, грн/рік	120 000	84 000	36 000
Втрати від простоїв, грн/рік	200 000	100 000	100 000
Витрати на паливо, грн/рік	500 000	475 000	25 000
Втрати врожаю від порушення строків, грн/рік	150 000	75 000	75 000
Загальна економія	—	—	236 000

Загальна економія від впровадження системи становить 236 000 грн/рік на один трактор.

Розрахунок терміну окупності:

- Вартість системи: 85 000 грн.
- Річна економія: 236 000 грн.
- Термін окупності: $85\,000 / 236\,000 = 0,36$ року (4,3 місяця).

Розрахунок ефективності для парку техніки (таблиця 5.9).

Таблиця 5.9 – Ефективність впровадження для парку з 10 тракторів

Показник	Значення
1	2
Вартість систем для 10 тракторів, грн	850 000
Річна економія, грн	2 360 000
Термін окупності, років	0,36 (4,3 місяця)
Чистий дисконтований дохід (NPV) за 5 років, грн	8 500 000
Внутрішня норма доходності (IRR), %	280

Аналіз ефективності показує, що впровадження системи моніторингу для парку з 10 тракторів забезпечує річну економію 2 360 000 грн при терміні окупності 4,3 місяця. Чистий дисконтований дохід за 5 років становить 8 500 000 грн, внутрішня норма доходності – 280%.

Аналіз чутливості (таблиця 5.10).

Таблиця 5.10 – Аналіз чутливості терміну окупності

Змінна	Оптимістичний сценарій	Базовий сценарій	Песимістичний сценарій
Вартість системи	60 000 грн	85 000 грн	120 000 грн
Річна економія	300 000 грн	236 000 грн	150 000 грн
Термін окупності	2,4 місяця	4,3 місяця	9,6 місяця

Оцінка інвестиційної привабливості.

Ключові фінансові показники проєкту (на 3 роки) (таблиця 5.11):

Таблиця 5.11 – Фінансові показники проєкту

Показник	Рік 1	Рік 2	Рік 3
Кількість проданих систем	30	80	150
Дохід від продажу (85 000 грн/шт), грн	2 550 000	6 800 000	12 750 000
Дохід від підписки (15 000 грн/рік), грн	450 000	1 650 000	3 900 000
Загальний дохід, грн	3 000 000	8 450 000	16 650 000
Собівартість систем (56 300 грн/шт), грн	1 689 000	4 504 000	8 445 000
Операційні витрати (30% від доходу), грн	900 000	2 535 000	4 995 000
Чистий прибуток, грн	411 000	1 411 000	3 210 000

Термін окупності інвестицій у розробку (1 466 300 грн):
 $1\,466\,300 / 411\,000 = 3,6$ року (або 1,04 року при досягненні рівня продажів другого року).

Висновки

1. Ринковий потенціал. Аналіз ринку систем моніторингу сільськогосподарської техніки підтвердив високий потенціал розробленої системи. Ключовими драйверами зростання є дефіцит кваліфікованих кадрів в аграрному секторі України, скорочення машинно-тракторного парку, зростання витрат на паливе та добрива, а також стрімкий розвиток систем точного землеробства. Світовий ринок IoT, частиною якого є системи моніторингу техніки, оцінюється у 1,3–1,6 трильйона доларів США та зростає з темпом 8,9–13,2% на рік.

2. Конкурентоспроможність. SWOT-аналіз показав, що головними конкурентними перевагами розробленої системи є універсальність (сумісність з різними марками техніки), вбудоване прогнозування відмов на основі машинного навчання, можливість retrofit-встановлення на існуючий парк та нижча вартість порівняно з OEM-рішеннями. Це дозволяє системі зайняти нішу між дорогими пропрієтарними рішеннями виробників техніки та обмеженими за функціоналом телематичними платформами.

3. Бізнес-модель. Запропоновано гнучку гібридну модель комерціалізації, що включає прямий продаж апаратної частини (85 000 грн за комплект), річну підписку на програмне забезпечення (15 000 грн/рік) та модель «Моніторинг як послуга» (5 000–8 000 грн/місяць за трактор). Це дозволяє адаптувати пропозицію до різних сегментів клієнтів — від великих агрохолдингів до середніх фермерських господарств.

4. Собівартість розробки. Повна собівартість виготовлення дослідного зразка системи становить 1 466 300 грн (35 000 доларів США). Основну частку витрат складає розробка програмного забезпечення (71,0%), що включає вбудоване ПЗ, ML-моделі та хмарну платформу. Матеріальні витрати становлять лише 3,8%, що свідчить про високу додану вартість програмної складової.

					14.17 - КР. 010.5.000 ПЗ	Аркуш
						114
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Інвестиційна привабливість. Розрахунок економічної ефективності для фермерського господарства показав високу рентабельність впровадження системи. Економічний ефект на один трактор становить 236 000 грн/рік за рахунок зниження витрат на ТОiP (36 000 грн), зменшення втрат від простоїв (100 000 грн), економії палива (25 000 грн) та зменшення втрат врожаю (75 000 грн). Термін окупності системи для одного трактора становить 4,3 місяця, для парку з 10 тракторів — також 4,3 місяця при річній економії 2 360 000 грн. Чистий дисконтований дохід за 5 років становить 8 500 000 грн, внутрішня норма доходності — 280%.

6. Перспективи розвитку. Для успішної комерціалізації проекту рекомендується починати з пілотного впровадження в 3–5 господарствах з подальшим масштабуванням. Ключовими факторами успіху є налагодження партнерських відносин з дилерами сільськогосподарської техніки, активна участь у галузевих виставках та конференціях, а також постійне вдосконалення алгоритмів прогнозування на основі накопичених даних. Перспективним напрямом є розширення на європейський ринок, де попит на системи прогнозного обслуговування сільськогосподарської техніки є стабільно високим.

Таким чином, результати техніко-економічного обґрунтування підтверджують комерційний потенціал розробленої системи дистанційного моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів. Проєкт є інвестиційно привабливим, технологічно реалізованим та відповідає сучасним тенденціям цифровізації агропромислового комплексу України.

					14.17 - КР. 010.5.000 ПЗ	Аркуш
						115
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наступні висновки.

1. Встановлено, що традиційна система планово-попереджувального обслуговування сільськогосподарської техніки має фундаментальні недоліки: неврахування фактичного стану обладнання, фіксовані інтервали, які не відображають реальну швидкість деградації, надлишкове або недостатнє обслуговування. Дослідження показують, що 91,2% відмов сільськогосподарської техніки виникають раптово, а 54% мають експлуатаційний характер. Економічні втрати від простоїв техніки включають прямі витрати на ремонт, втрати від порушення агротехнічних строків, зниження якості продукції, витрати на оренду техніки та понаднормові роботи. Встановлено, що впровадження обслуговування за фактичним станом дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування і ремонт на 25–30% та підвищити продуктивність на 20–25%.

2. Проведено аналіз існуючих систем діагностування та моніторингу технічного стану сільськогосподарських агрегатів, включаючи вібраційну діагностику, термографію, аналіз мастил та електричну діагностику. Встановлено, що найбільш вразливими елементами техніки є електрообладнання, гідрообладнання та дизельні двигуни.

3. Досліджено технології IoT та їх застосування в агроінженерії, включаючи сенсорне забезпечення, мікроконтролери, протоколи передачі даних та хмарні платформи. Визначено основні проблеми впровадження IoT: енергоспоживання, надійність зв'язку в сільській місцевості, інтероперабельність, вартість, кваліфікація персоналу та кібербезпека.

					14.17 - КР.010.0.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Шпартюк			ВИСНОВКИ				Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									116		3	
Реценз.														
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												

4. На основі аналізу відмов сільськогосподарської техніки обрано чотири основні об'єкти моніторингу: двигун, трансмісія, гідравлічна система та ходова частина. Для кожного об'єкта визначено комплекс контрольованих параметрів: вібрація, температура, тиск, електричні параметри та витрата палива.

5. Розроблено чотирирівневу архітектуру системи, що включає рівень сенсорів, рівень передачі даних, рівень обробки даних та рівень візуалізації. Визначено склад сенсорних модулів за об'єктами моніторингу. Обґрунтовано вибір протоколів передачі даних: BLE для локальної передачі між сенсорними модулями та бортовим вузлом, LoRaWAN для передачі даних на віддалену платформу (дальність до 10–15 км при низькому енергоспоживанні), Wi-Fi для передачі великих обсягів даних у зонах покриття. Обрано хмарну платформу для обробки та зберігання даних на базі Node-RED та InfluxDB для дослідного зразка та AWS IoT Core або ThingsBoard для промислового впровадження.

6. Розроблено комплекс математичних моделей деградації технічного стану агрегатів, що включає лінійні, експоненційні та моделі Вейбулла. Визначено методи оцінки параметрів моделей на основі експериментальних даних (метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності). Розроблено моделі деградації для вібраційних та температурних параметрів. Встановлено, що для сільськогосподарської техніки характерним є значення параметра форми Вейбулла більше одиниці, що свідчить про домінування зносних відмов на пізніх етапах експлуатації.

7. Обрано алгоритми машинного навчання для прогнозування відмов: LSTM та GRU для аналізу часових рядів, Random Forest та XGBoost для класифікації станів, SVM для виявлення аномалій. Розроблено методику підготовки даних, навчання та валідації моделей. Визначено метрики оцінки точності прогнозування: MAE, RMSE, R^2 та α - λ accuracy. Встановлено цільові значення метрик: $MAE < 10\%$, $RMSE < 15\%$, $R^2 > 0,85$, α - λ accuracy $> 80\%$.

					14.17 - КР. 010.0.000 ПЗ	Аркуш
						117
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 1. Durczak K., Selech J., Ekielski A., Żelaziński T., Waleński M., Witaszek K. Using the Kaplan–Meier Estimator to Assess the Reliability of Agricultural Machinery. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, No. 6. Article 1364 .
2. Predictive Maintenance of Farming Equipment Using AI. 2025 *International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAISS)*. Dubai, United Arab Emirates, 16–18 April 2025. IEEE, 2026 .
3. Advancing Predictive Maintenance in Agriculture: Empowering Farmers through IoT-Driven Machine Learning for Enhanced Equipment Performance and Operational Efficacy. 2025 *International Conference on Computing and Informatics (ICCI)*. Zarqa, Jordan, 29–31 December 2025. IEEE, 2026 .
4. Accurate Classification of Multiple Faults in Induction Motor using CNN-based Features and Dimensionality Reduction. 2025 *International Conference on Electrical Engineering and Control Applications (ICEECA)*. Ghardaia, Algeria, 18–20 November 2025. IEEE, 2026 .
5. A sparrow search algorithm-optimized LSTM framework with EMD denoising for rolling element bearing remaining useful life prediction. *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Article 41852 .
6. Analysis of Factors Affecting the Operational Reliability of Electric Mini-Tractor Transmissions. *Quality and Reliability Engineering International*. 2026 .
7. Fault Diagnosis Based on Vibrations of Mechanical Diesel Injection Pumps in Old Agricultural Tractors Using SVM: A Modernization Approach. *Machines*. 2026. Vol. 14, No. 5. Article 505.

					14.17 - КР.010.0.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Шпартюк			СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ				Літ.		Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.									118	3	
Реценз.													
Н. Контр.													
Затверд.		Дядюра К.О.											

8. A Fault Diagnosis Model of Electro-Hydraulic Regulation System Based on Improved Binary Tree Support Vector Machine. *2025 International Conference on Advanced Control and Automation (ICACA)*. Changchun, China, 20–23 November 2025. IEEE, 2026 .

9. The Construction of Health Indicators and the Remaining Useful Life Prediction Methods for Bearings Through CNN-LSTM Network. *2025 International Conference on Sensing, Measurement and Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD)*. Shenyang, China, 28–30 June 2025. IEEE, 2025 .

10. Physics-inspired deep learning network using dilated kronecker convolution for rotary machines under variable operating conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 224. Article 112711 .

11. Comprehensive Review of Multi-Sensor IoT Applications in Modern Agriculture. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*. 2026. Vol. 14, No. 5 .

12. A Comprehensive Review of Using WSNs and Drones for Improving Crop Production in Precision Agriculture. *IET Wireless Sensor Systems*. 2026. Vol. 16, No. 1 .

13. ISO/DIS 11783-12. Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network — Part 12: Diagnostic services. Geneva : ISO, 2025. 46 p. .

14. ISO/DIS 11783-2. Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network — Part 2: Physical layer. Geneva : ISO, 2025. 69 p. .

15. FieldDataSync: Development of a manufacturer-independent wireless communication solution for agricultural machinery without internet connections. Technical University of Munich, 2025 .

16. Kim J.-H., Jung W. Field Data Collection and Failure Analysis for Durability Improvement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Machinery*. 2011. Vol. 36, No. 2. P. 138–145 .

					14.17 - KP. 010.0.000 ПЗ	Архив
						119
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Advanced Methodologies for Fatigue in Agricultural Machinery: Integrating Multibody Dynamics and Finite Element Analysis. *Macromolecular Symposia*. 2025. Vol. 415, No. 1. Article 70068 .

18. ISO 11783-10:2015. Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network (ISOBUS) — Part 10: Task controller and management information system data interchange. Geneva : ISO, 2015. 112 p.

19. Zhang C., Kovacs J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*. 2012. Vol. 13. P. 693–712.

20. Барановський В. М. Математичне моделювання динаміки руху мобільних робототехнічних платформ. *Вісник ЖДТУ*. 2020. № 2 (88). С. 14–22.

21. Rover Pro Datasheet. Wayzata : Rover Robotics, 2023. URL: <https://roverrobotics.com/products/rover-pro> (дата звернення: 15.05.2025).

22. Chilingarian A. A. et al. Precision Agriculture: A Review on the Use of Robots and Drones. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2022. Vol. 24. P. 1–15.

23. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 26 с.

24. Про затвердження Правил охорони праці у сільськогосподарському виробництві: Наказ МНС України від 26.11.2012 № 1353. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2069-12> (дата звернення: 20.05.2025).

					14.17 - КР. 010.0.000 ПЗ	Аркуш
						120
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		