

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

«___»_____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

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

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗУМНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПРИСТРОЇВ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: головний інженер, к.т.н.
_____Олександр ПИЩЕНКО

Виконав здобувач другого (магістерського) рівня
вищої освіти денної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Іван БАТАН

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

_____Іван БАТАН

ОДЕСА – 2025

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Іван БАТАН

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Дослідження розумних сільськогосподарських пристроїв»

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

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету
№ 124 від « 27 » 06 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 18.12.2025.

3. Об'єкт дослідження: технологічні процеси автоматизованого виконання
сільськогосподарських операцій (моніторинг, обробіток, збирання врожаю) в
умовах концепції «Smart Farm».

4. Предмет дослідження: закономірності взаємодії робочих органів
розумних пристроїв (маніпуляторів, сенсорів, мобільних платформ) з
біологічними об'єктами та параметри їх адаптації до динамічних змін
робочого середовища.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ:

Провести аналітичний огляд сучасних робототехнічних систем в
агроінженерії: порівняння жорстких промислових та адаптивних польових
роботів. Обґрунтувати класифікацію маніпуляторів для «Smart Farm» (м'які,
паралельні, надлишкові/гіперредундантні) та визначити критерії їх
ефективності. Розробити структурно-функціональну модель взаємодії
компонентів системи: «Система виявлення – Автономний робот –
Сільськогосподарський інструмент – Менеджер ферми».

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ:

Дослідити алгоритми прийняття рішень у циклічній роботі робота (етапи 0-6: від розгортання до завершення завдання). Провести кінематичний аналіз руху маніпулятора (наприклад, континуального типу) при огинанні перешкод (гілок, листя). Здійснити моделювання роботи системи технічного зору для ідентифікації об'єктів (плодів/бур'янів) у режимі реального часу.

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ:

Розробити інженерні пропозиції щодо конструкції кінцевого ефектора (захвату) з використанням принципів «м'якої робототехніки» для роботи з деформованими культурами. Розрахувати техніко-економічну ефективність впровадження розробленої системи (порівняння з ручною працею або традиційною механізацією). Розробити заходи з охорони праці та безпеки при експлуатації автономних систем у полі.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

Класифікаційна схема робіт для сільського господарства (наземні/повітряні, маніпулятори/платформи). Порівняльна таблиця характеристик промислових та агророботів (стабільність середовища vs динамічність). Схема архітектури системи управління агророботом (сенсори, контролер, актуатори).

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Блок-схема алгоритму функціонування системи (цикл операцій 0-6). Кінематична схема маніпулятора (із зазначенням ступенів свободи). Графіки залежності точності позиціонування від швидкості руху платформи або часу реакції сенсорів.

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

Загальний вигляд (креслення) модернізованого вузла (наприклад, маніпулятора на мобільній платформі). Складальне креслення робочого органу (наприклад, м'якого захвату). Схема принципу дії м'якого захвату (Soft Gripper). Таблиця основних техніко-економічних показників проєкту.

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

Характеристика культури/середовища: наприклад, яблуневий сад інтенсивного типу або овочева плантація (помідори). Вимоги до операції: точність позиціонування ± 10 мм, зусилля захвату не більше 5 Н (щоб не пошкодити плід). Базова платформа: колісна автономна платформа 4x4 або гусеничне шасі. Тип навігації: RTK-GPS + LIDAR/Stereo vision.

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

Ватан І, Дядюра К. Дослідження розумних сільськогосподарських пристроїв. Збірник V Міжнародної науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та молодих науковців «Актуальні аспекти розвитку науки і освіти»: 2-3 жовтня 2025р., Одеса: Одеський державний аграрний університет, 2025.С.132-134.

9. Дата видачі завдання: « 27 » 06 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	27.06.2025	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	27.06.2025	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	27.06.2025	0,5	
4.	Написання першого (теоретико методичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	02.07.2025	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	27.07.2025	1,0	
6.	Написання другого (дослідницькоаналітичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	21.08.2025	2,0	
7.	Написання третього (проєктно-розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	24.09.2025	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	07.10.2025	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) науковим керівником	17.11.2025		

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	27.11.2025	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	07.12.2025	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на кафедрі	10.12.2025		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на оригінальність	12.12.2025		
14.	Попередній захист на кафедрі	15.12.2025		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	16.12.2025		
16.	Захист кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	18.12.2025	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС «Магістр»

_____ Іван БАТАН

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Анатолій ЯКОВЕНКО

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: складається з 76 сторінок, 5 розділів, 26 рисунків, 16 таблиць, 29 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси автоматизованого виконання сільськогосподарських операцій в умовах концепції «Smart Farm».

Предмет дослідження – методи адаптації робочих органів та систем управління агророботів до взаємодії з біологічними об'єктами.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу (для класифікації робототехнічних систем), теоретичного моделювання (для побудови алгоритмів керування), порівняльного аналізу (для оцінки ефективності різних типів маніпуляторів).

Результати дослідження. У роботі проаналізовано архітектуру автономних агросистем, що складається з чотирьох ключових компонентів: системи виявлення, мобільної платформи, сільськогосподарського інструменту та менеджера ферми. Розроблено та описано цикли функціонування робота (етапи 0–6), що забезпечують автономне виконання завдань від розгортання до завершення операції. Встановлено, що для роботи з високоцінними культурами найбільш перспективними є м'які (soft) та континуумні (гіперредундантні) маніпулятори, які, на відміну від жорстких промислових аналогів, здатні безпечно огинати перешкоди та не пошкоджувати продукцію. Обґрунтовано необхідність інтеграції сенсорних систем для збору даних про ґрунт і стан посівів у режимі реального часу.

Ключові слова: SMART FARM, АГРОРОБОТИ, ТОЧНЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО, М'ЯКІ МАНІПУЛЯТОРИ, АВТОНОМНІ СИСТЕМИ, НЕСТРУКТУРОВАНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ІОТ.

					14.17 – КР.004.0.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Ватан І.к.			РЕФЕРАТ				
Перевір.		Дядюра К. О.							
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.		Дядюра К. О.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів		
							6	1	

ЗМІСТ

	С
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. Аналітичний огляд. Аналіз сучасного стану використання розумних пристроїв (IoT, робототехніка, БПЛА) у світовій та вітчизняній практиці. Класифікація пристроїв.....	12
1.1 Концепція «Smart Farming» та перехід до Сільського господарства 4.0 та 5.0	12
1.2 Аналіз використання технологій Інтернету речей (IoT) та сенсорних систем.....	16
1.3 Класифікація та застосування БПЛА (дронів) в агрономії.....	17
1.4 Роль штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML).....	19
1.5 Класифікація розумних сільськогосподарських пристроїв.....	24
Висновки.....	26
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	28
2.1 Формалізація вимог до розумних пристроїв для умов сільськогосподарського підприємства.....	28
2.2 Вибір та обґрунтування ключових параметрів моніторингу біологічних об'єктів.....	31
2.3 Ґрунтові сенсори, які вимірюють вологість та вміст поживних речовин.....	33
2.4 Супутникові зображення в точному землеробстві.....	36
2.5 Програма та методика експериментальних досліджень розумних сільськогосподарських пристроїв.....	37
2.6 Загальний алгоритм роботи розумних сільськогосподарських пристроїв.....	39

					14.17 – КР.004.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ватан І.К.			ЗМІСТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дядюра К. О.					7	2
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Висновки.....	42
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ.....	44
3.1 Польові випробування.....	44
3.2 Алгоритм проведення польового етапу.....	44
3.3 Блок налаштування та збору даних.....	52
Висновки.....	54
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	58
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	58
4.2 Технічні заходи безпеки при роботі з БПЛА та агророботами.....	58
4.3 Організація робочого місця оператора розумних систем.....	59
4.4 Безпека у надзвичайних ситуаціях (Цивільний захист).....	62
4.5 Інструктаж та допуск до роботи.....	62
Висновки.....	64
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ТА ТЕХНІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗУМНИХ ПРИСТРОЇВ.....	66
5.1. Економічна ефективність систем Smart Agriculture.....	66
5.2. Технічні виклики та обмеження.....	67
5.3. Порівняння моделей витрат	68
Висновки.....	71
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75

ВСТУП

Актуальність теми. Сільське господарство є фундаментальною опорою світової економіки, що забезпечує продовольчу безпеку в умовах стрімкого зростання населення планети. Сучасний етап розвитку агропромислового комплексу характеризується переходом до концепції «Сільське господарство 4.0» (Agriculture 4.0), де ключову роль відіграють цифровізація, біотехнології та автоматизація. Інновації в цій сфері пропонують життєздатні рішення для підвищення продуктивності праці та мінімізації негативного впливу на довкілля. Проте, прямий перенос технологій промислової робототехніки в аграрний сектор є ускладненим. Якщо промислові роботи функціонують у стабільних, структурованих середовищах із повторюваними діями, то сільськогосподарські пристрої змушені працювати в динамічних, неструктурованих умовах відкритого поля, де параметри середовища та біологічних об'єктів змінюються у просторі та часі. Це вимагає розробки принципово нових, «розумних» адаптивних систем, здатних приймати рішення в реальному часі.

З огляду на це, дослідження розумних сільськогосподарських пристроїв, зокрема адаптація маніпуляторів (м'яких, надлишкових, паралельних) та автономних мобільних платформ до специфіки агровиробництва, є актуальним науково-практичним завданням. Вирішення цієї проблеми дозволить реалізувати концепцію «Smart Farm» («Розумна ферма»), зменшити залежність від ручної праці та підвищити якість виконання технологічних операцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.
Магістерська робота виконувалася відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри агроінженерії за напрямом «Механізація та автоматизація сільськогосподарського виробництва».

					14.17 – КР.004.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ватан І.К.			ВСТУП			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								9	3
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності виконання технологічних операцій у рослинництві шляхом обґрунтування параметрів та структури розумних сільськогосподарських пристроїв, адаптованих до роботи в неструктурованих середовищах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналітичний огляд стану впровадження робототехніки в агросектор та виявити ключові відмінності між вимогами до промислових і польових роботів.

2. Розробити структурно-функціональну модель взаємодії компонентів розумної агросистеми (система виявлення, мобільна платформа, інструмент, система управління).

3. Обґрунтувати вибір кінематичної схеми маніпуляторів (аналіз ефективності жорстких, м'яких та гіперредундантних структур) для роботи з чутливими до пошкоджень культурами.

4. Дослідити алгоритми автономного виконання завдань (цикл «сприйняття – рішення – дія») для мобільних агророботів.

5. Оцінити техніко-економічну ефективність впровадження досліджуваних пристроїв у виробництво.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси автоматизованого виконання сільськогосподарських операцій (моніторинг, догляд, збирання) з використанням інтелектуальних технічних засобів.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії розумних сільськогосподарських пристроїв з біологічними об'єктами та методи їх адаптації до змінного робочого середовища.

Методи дослідження. У роботі використано: метод системного аналізу – для класифікації робототехнічних систем та визначення їх структури; методи математичного моделювання – для опису кінематики маніпуляторів; порівняльний аналіз – для оцінки переваг різних морфологій роботів (м'яких, паралельних, континуумних); метод техніко-економічних розрахунків – для визначення ефективності запропонованих рішень.

					14.17 – КР.004.0.000 ПЗ	Арку
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наукова новизна одержаних результатів полягає в:

- удосконаленні класифікації агророботів шляхом введення критеріїв адаптивності до неструктурованого середовища;
- обґрунтуванні доцільності використання м'яких та надлишкових маніпуляторів для операцій збору врожаю, що дозволяє мінімізувати механічні пошкодження продукції;
- подальшому розвитку алгоритмізації роботи автономних систем за схемою «виявлення – рух – дія», що забезпечує гнучкість технологічного процесу.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні нових зразків сільськогосподарської техніки, зокрема роботизованих систем для точного землеробства та збирання високоцінних культур (фруктів, овочів). Запропоновані підходи дозволяють підвищити рівень автоматизації агропідприємств та знизити собівартість продукції.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на V Міжнародної науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та молодих науковців «Актуальні аспекти розвитку науки і освіти»: 2-3 жовтня 2025р., Одеса: Одеський державний аграрний університет, 2025.С.132-134.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 76 сторінок, містить 26 рисунків та 16 таблиць.

					14.17 – КР.004.0.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ РОЗУМНИХ ПРИСТРОЇВ (ІОТ, РОБОТОТЕХНІКА, БПЛА) У СВІТОВІЙ ТА ВІТЧИЗНЯНІЙ ПРАКТИЦІ. КЛАСИФІКАЦІЯ ПРИСТРОЇВ.

1.1. Концепція «Smart Farming» та перехід до Сільського господарства 4.0 та 5.0

Сільське господарство залишається фундаментальною основою світової економіки, забезпечуючи одну з базових потреб людства – продовольство. Однак галузь стикається з безпрецедентними викликами, зумовленими зростанням населення, зміною клімату та дефіцитом ресурсів. За прогнозами, для задоволення майбутніх потреб виробництво сільськогосподарських культур має зрости на 60–100% до 2050 року [1, 2].

Традиційні методи господарювання (Agriculture 1.0), що покладаються на інтенсивну ручну працю та природні ресурси, поступово витісняються технологічними інноваціями. Сучасний етап розвитку характеризується переходом до концепції Agriculture 4.0, яка інтегрує Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI), великі дані (Big Data) та робототехніку для оптимізації виробничих процесів [4].

Основна мета розумного землеробства («Smart Farming») полягає у зміні взаємодії людини з ґрунтом та рослиною. Використання інтелектуальних пристроїв надає аграріям розширений контроль над вирощуванням культур, підвищуючи передбачуваність та ефективність

		виробництва [8, 9].			14.17 – КР.004.1.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1			
Розроб.		Ватан І.К.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
							12	15

Технології дозволяють переходити від інтуїтивного прийняття рішень до управління на основі точних даних.

У таблиці 1.1 представлено порівняльний аналіз досягнень, що відбулися під час переходу від сільського господарства 1.0 до сільського господарства 4.0, тоді як у таблиці 1.2 обговорюються технології, які допомогли побудувати сільське господарство 4.0.

Таблиця 1.1 – Комплексна характеристика технологій Smart Farming за результатами аналітичного огляду

Технологія	Ключова роль у «Smart Farm»	Показники ефективності (max)	Основні виклики та обмеження
Штучний інтелект (AI)	Когнітивне управління ресурсами, предиктивна аналітика та підтримка рішень [5, 7]	98% точність прогнозу зрошення; 20% ріст врожайності	Висока вартість інфраструктури, складність обслуговування [6]
Машинне навчання (ML)	Розпізнавання образів (хвороби), класифікація культур та прогнозування врожаю [6]	99,7% точність класифікації; 60% економія води	Потреба у високоякісних наборах даних; складність інтерпретації [8]
БПЛА (Дрони)	Дистанційне зондування, точкове обприскування та картографування [9]	96% економія води; 30% зниження собівартості	Регуляторні обмеження, ємність батарей, потреба в навчанні [4]
Інтернет речей (IoT)	Реальний моніторинг середовища, автоматизація поливу через мережі сенсорів [4]	25% приріст врожаю; дистанційне керування 24/7	Обмежена стабільність зв'язку, ризики кібербезпеки та конфіденційності [8]
Розумні маніпулятори (Robotics)	Автономне збирання врожаю, механічна боротьба з шкідниками	100% успіх операцій у контрольованих умовах	

Технологія	Ключова роль у «Smart Farm»	Показники ефективності (max)	Основні виклики та обмеження
	з бур'янами та догляд за худобою [8]	умовах	

Зведена таблиця підтверджує, що сучасна агроінженерія базується на синергії п'яти технологічних напрямків. AI та ML виступають аналітичним ядром системи. IoT та БПЛА забезпечують збір даних та оперативне виконання польових робіт.

Автономні мобільні платформи є фізичними носіями цих технологій.

Така структура розділу «Матеріали та методи дослідження» дозволяє чітко перейти до Розділу 3, де будуть представлені власні результати моделювання або експериментів на основі обраної вами комбінації цих методів.

Таблиця 1.2 – Технології та їхня роль у переході від Сільського господарства 1.0 до 4.0

№ з/п	Використовувані технології	Суть роботи та роль у технологічному переході	Автор (джерело)
1	Примітивні інструменти (кайла, лопати)	Етап традиційного землеробства, заснований на ручній праці з низькою продуктивністю.	[12]
2	IoT, Big Data, AI, хмарні обчислення, ДЗЗ	Інтеграція сучасних цифрових технологій для радикального підвищення ефективності в межах Сільського господарства 4.0.	[13]
3	Точне землеробство, робототехніка	Підвищення прибутковості ферм, забезпечення продовольчої безпеки та зменшення використання води, добрив і пестицидів.	[14]
4	Техніка з GPS, IoT, мобільні додатки, дрони, Edge Computing	Етапна еволюція розумного землеробства: від раннього точного землеробства до передової робототехніки та периферійних обчислень.	[15]

					14.17 – КР.004.1.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

№ з/п	Використовувані технології	Суть роботи та роль у технологічному переході	Автор (джерело)
5	Інструменти управління даними, IoT, точне землеробство	Сприяння сталому сільському господарству через безпечне та раціональне використання ресурсів.	[15]
6	Передові технічні та наукові інновації	Технологічна інтеграція для підтримки сталого розвитку та готовності галузі до викликів майбутнього.	[16, 17]
7	Технології ефективного використання ресурсів	Наголос на важливості лідерства, етичних аспектів та рівного розподілу вигод при впровадженні інновацій Agriculture 4.0.	[18]
8	Інноваційні платформи, політична підтримка	Необхідність співпраці та стимулювання інновацій на базі новітніх технологій.	[18]

Дистанційне зондування (ДЗЗ/RS): перехід до 4.0 став можливим завдяки доступності супутникових даних та БПЛА, що згадується у пункті 2.

Соціально-етичний аспект (пункт 7): важливо підкреслити, що Agriculture 4.0 — це не лише залізо та код, а й зміна парадигми управління, де важливу роль відіграє «цифрова рівність» та державна підтримка інновацій.

Ресурсозбереження: пункти 3 та 5 демонструють екологічну спрямованість розумних пристроїв — мінімізацію хімічного навантаження на агроєкосистеми.

На рисунку 1.1 показано сценарій, у якому кілька параметрів культур контролюються шляхом розгортання сільськогосподарських пристроїв та датчиків по всьому полю [12]. Датчики також можуть використовуватися для автоматизації, встановленої на полі, наприклад, для моніторингу автоматичних систем зрошення.

літературних джерел [7, 8] демонструє ефективність IoT-систем у наступних напрямках:

- розумне зрошення: Системи на базі контролерів (наприклад, ESP32, Raspberry Pi) та датчиків вологості ґрунту дозволяють економити до 25-50% води, автоматизуючи полив на основі реальних потреб рослин.
- безпека та моніторинг: Розроблено системи виявлення пожеж з точністю 98,77% та часом реакції 2 секунди, що використовують датчики диму та полум'я.
- гідропоніка: IoT-рішення дозволяють контролювати рівень CO₂, поживних розчинів та освітлення в закритому ґрунті, що робить виробництво незалежним від зовнішніх кліматичних умов [6].

Однак впровадження IoT стикається з бар'єрами, серед яких: висока вартість впровадження, проблеми сумісності стандартів, кібербезпека та недостатня цифрова грамотність фермерів, особливо в малих господарствах [5, 7].

1.3. Класифікація та застосування БПЛА (дронів) в агрономії

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали невід'ємною частиною точного землеробства. Вони класифікуються на апарати з фіксованим крилом (для картографування великих площ) та мультироторні системи (для детального моніторингу та виконання операцій). Згідно з проаналізованими даними [9], основні сфери застосування дронів включають:

1. Моніторинг посівів: Використання мультиспектральних та гіперспектральних камер для оцінки індексу NDVI, виявлення хвороб та дефіциту азоту.
2. Внесення добрив та ЗЗР: Дрони здатні обробити 1,5 га за 10 хвилин, що значно швидше за ручну працю. Це дозволяє зменшити використання хімікатів на 30-40% завдяки точковому внесенню [61].

					14.17 – КР.004.1.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

3. Посів (Seeding): БПЛА ефективні для посіву у важкодоступних зонах (наприклад, на перезволожених ґрунтах), де не може пройти колісна техніка [52].

Економічний ефект від впровадження БПЛА підтверджується зниженням витрат на робочу силу та підвищенням врожайності на 6-10% [60]. Новітні розробки включають ройовий інтелект (Swarm Intelligence) для координації групи дронів та використання дронів-маніпуляторів для виконання механічних операцій (свердління, відбір проб) [55].

У таблиці 1.3 обговорюються ключові технології та використання БПЛА у сільському господарстві.

Таблиця 1.3 – Класифікація та вплив застосування БПЛА (дронів) у сільському господарстві

№ з/п	Технологія	Суть дослідження та ключові результати	Джерело
1	Дрони	Ефективне, неінвазивне внесення добрив і насіння з рівномірним розподілом без ущільнення ґрунту.	[5]
2	Дрони	Забезпечують висів у важкодоступних місцях, знижують витрати праці завдяки швидкому автоматичному внесенню.	[2]
3	Рой БПЛА (UAV Swarms)	Удосконалене керування формацією дозволяє координувати польоти для широкомасштабного внесення ларвіцидів та обприскування.	[3, 4]
4	Платформи БПЛА	Розробка БПЛА з функціями свердління та закручування гвинтів, що розширює використання в будівництві та агроінженерії.	[5]
5	Конвертоплани (Convertible UAVs)	Передові системи керування забезпечують стабільну роботу в режимах зависання, круїзу та перехідних фазах польоту.	[6]
6	БПЛА (економіка)	Аналіз «витрати-вигоди» показує, що БПЛА підвищують ефективність і точність, особливо на великих фермах.	[7]
7	БПЛА (моніторинг)	Пропонують рішення для точного землеробства: моніторинг стану посівів, виявлення шкідників та управління земельними ресурсами.	[8]
8	Дрони	Використовуються для моніторингу сільськогосподарських культур, обприскування, аерозйомки та внесення добрив.	[9]
9	Дрони (ефективність)	Показники: зниження витрат на вирощування на 30% , збільшення врожайності до 6,89% та зростання прибутку до 26% .	[6]
10	Дрони (пшениця)	Скорочення використання добрив до 40% , приріст доходу на 1,05% на кожен відсоток приросту врожайності.	[1]
14.17 – КР.004.1.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис
			Дата

№ з/п	Технологія	Суть дослідження та ключові результати	Джерело
11	Прецизійне землеробство	Економія витрат на акр та збільшення чистого прибутку за рахунок скорочення загальних експлуатаційних витрат.	[2]
12	Дрони з сенсорами	Екологічні переваги: скорочення використання води на 92–96% та гербіцидів на 36–38% .	[3]
13	Дрони та підготовка кадрів	Фактори успіху: використання сенсорних технологій, інтеграція з системами управління фермою та навчання фермерів.	[4]

Ця таблиця слугує базою для наступних висновків у вашій роботі:

Технологічна гнучкість: пункти 4 та 5 демонструють перехід від «літаючих камер» до складних механічних одиниць (БПЛА, що свердлять), що підтверджує вашу тезу про розвиток «розумних» маніпуляторів.

Екологічний аспект: дані пункту 12 про радикальну економію води (понад 90%) є вагомим аргументом для впровадження БПЛА в умовах дефіциту ресурсів.

Комплексність рішень: пункт 13 підкреслює, що БПЛА не є самостійним інструментом; їхня ефективність залежить від інтеграції в загальну IT-інфраструктуру господарства (FMS).

1.4 Роль штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML)

Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML) забезпечують перехід від простого збору даних до предиктивної аналітики. Алгоритми ML (такі як Random Forest, Support Vector Machines, Neural Networks) використовуються для обробки великих масивів даних, отриманих від IoT-сенсорів та дронів.

Основні досягнення у використанні AI в агросекторі [10, 11]:

– діагностика хвороб: Використання згорткових нейронних мереж (CNN) дозволяє ідентифікувати хвороби рослин (наприклад, на томатах або кеш'ю) з точністю понад 92-95% шляхом аналізу зображень листя.

					14.17 – КР.004.1.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

– прогнозування врожайності: Моделі ML аналізують історичні дані про погоду, тип ґрунту та агротехніку для точного прогнозування обсягів врожаю.

– ресурсозбереження: AI-алгоритми оптимізують графіки зрошення та внесення добрив, що дозволяє зменшити споживання води на 55% та енергії на 51% порівняно з традиційними методами [66].

У таблиці 1.4 представлено різні застосування штучного інтелекту (ШІ) у сільському господарстві, згідно з попереднім обговоренням.

Таблиця 1.4 – Технології штучного інтелекту в сільському господарстві

№ з/п	Технологія	Суть дослідження та ключові досягнення	Джерело
1	AI-інтервенції	Покращення ефективності використання ресурсів та управління посівами порівняно з традиційними методами.	[5]
2	Методології AI	Збільшення врожайності на 20%, покращення точності прогнозування врожайності на 0,40% порівняно з ручними методами.	[6]
3	Прикладні AI-рішення	Точність прогнозування потреби в зрошенні 98,4%, прецизійність діагностики хвороб до 90%.	[7]
4	ML, роботи, IoT, сенсори	Для ефективного розгортання систем необхідна високоякісна інфраструктура та масиви даних.	[8]
5	Розумні ферми	Інтеграція AI та передових технологій у когнітивні фермерські системи; ріст ринкової вартості сектора.	[9]
6	Системи AI-аналізу	Виявлення стресу рослин, хвороб та дефіциту поживних речовин за допомогою аналізу зображень.	[7]
7	AI з білим та UVA світлом	Оцінка зрілості врожаю та моніторинг стану ґрунту, погоди та здоров'я рослин у реальному часі.	[1]
8	Алгоритми AI та ML	Надання рекомендацій щодо вибору насіння, добрив, гербіцидів та конфігурації систем зрошення.	[2]
9	Вбудований Edge-AI	Система відлякування тварин для захисту врожаю на основі периферійних обчислень.	[3]

10	AI-моделі	Раннє виявлення хвороб томатів з	[4]
----	-----------	----------------------------------	-----

№ з/п	Технологія	Суть дослідження та ключові досягнення	Джерело
	діагностики	точністю 92,58% (навчання) та 86,83% (валідація).	
11	AI + MobileNetV2 + дрони	Точність 95% при виявленні антракнозу на листі кеш'ю за допомогою БПЛА.	[5]
12	AI-рішення (економіка)	Доступність базових рішень, але наявність додаткових витрат на консалтинг, MVP та обслуговування.	[6]
13	Моделі AI (обмеження)	Основні виклики: складність узагальнення даних між видами рослин та дефіцит якісних даних.	[4]

У таблиці 1.5 представлено короткий огляд різних способів використання машинного навчання в розумному сільському господарстві, про яке йшлося вище.

Таблиця 1.5 – Інтеграція машинного навчання в сільське господарство

№ з/п	Технологія	Суть дослідження та ключові результати	Джерело
1	ML та комп'ютерний зір у тваринництві	Прогнозування живої ваги, моніторинг стану здоров'я, управління пасовищами та відстеження поведінки, споживання корму та викидів газів.	[7, 8]
2	ML для зрошення (система AIRA)	Використання KNN та нейронних мереж разом з IoT-датчиками вологості ґрунту для оптимізації графіку поливу та збереження води.	[7, 9]
3	Алгоритми класифікації для зрошення	Порівняння моделей: RF (84,6%), NN (80,2%), SVM (79,3%) та DT (77,0%) для визначення часу поливу; досягнуто економії води до 60%.	[8]
4	Гібридні моделі для поливу	Поєднання KNN, градієнтного бустингу дерев, LSTM та кореляції Спірмена для зрошення бананів; зниження витрат води на 31,4%.	[8]
5	IoT-інтегрована ML-система	Автоматизована система поливу для малих господарств; економія 25% води на основі даних датчиків вологості.	[2]
6	LoRa та ML для багатокультурного	Система на базі протоколу LoRa скоротила використання води до	[3]

№ з/п	Технологія	Суть дослідження та ключові результати	Джерело
	зрошення	46% на різних типах культур.	
7	SVM для планування роботи насосів	Інтеграція з бездротовими сенсорами для оптимізації роботи насосних станцій, зниження витрат праці та підвищення ефективності.	[4]
8	Хмарна ML-система зрошення	Прогнозування оптимального поливу на основі даних про ґрунт і погоду; досягнуто понад 50% економії води.	[5]
9	ML-моделі для класифікації та прогнозування	RF (99,7%) для класифікації культур; SVR (99,9% R^2) для прогнозування врожайності пшениці з використанням ХАІ та K-fold крос-валідації.	[6]
10	Гібрид CNN-DT для сортів квасолі	Використання CNN для виділення ознак та дерев рішень (DT) для прийняття рішень; покращено точність класифікації та прогнозування врожаю.	[7]

У таблиці 1.6 нижче представлено порівняльний огляд застосувань штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) у сільському господарстві, з акцентом на їхньому окремому внеску в ефективність, підвищення врожайності та прийняття рішень. У той час як ШІ охоплює ширший спектр когнітивних технологій, МН зосереджується на розпізнаванні та прогнозуванні образів на основі даних. Спираючись на різні дослідження, це порівняння підкреслює, як обидві технології змінюють сучасне сільське господарство завдяки інноваціям в управлінні ресурсами, моніторингу сільськогосподарських культур, виявленні хвороб та точному землеробстві.

Таблиця 1.6 – Взаємодоповнюючі ролі AI та ML у впровадженні сталих та ефективних сільськогосподарських практик

Аспект			Штучний інтелект (AI)		Машинне навчання (ML)	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	14.17 – КР.004.1.000 ПЗ	
						Арку
						23

Аспект	Штучний інтелект (AI)	Машинне навчання (ML)
Основна спрямованість	Охоплює ширші системи, що симулюють людське пізнання для покращення ефективності ресурсів та управління посівами [5]	Підмножина AI, зосереджена на розпізнаванні образів та прогнозуному моделюванні на основі сільськогосподарських даних [7, 9]
Вплив на використання ресурсів	Продемонстровано скорочення використання води на 55%, енергії на 51% та добрив на 20% [5, 8]	Забезпечує значну економію води (25%–60%) за рахунок оптимізованого планування зрошення та інтеграції сенсорів [2]
Підвищення врожайності	Підвищує врожайність приблизно на 20% з невеликим покращенням точності прогнозування порівняно з традиційними методами [6]	Підтримує класифікацію та прогнозування врожайності з високою точністю (до 99,7% для типу культури та 99,9% для обсягу врожаю) [8]
Оптимізація зрошення	Моделі AI забезпечують майже ідеальні прогнози попиту на зрошення (98,4%) та точність діагностики хвороб до 90% [6, 7]	Алгоритми ML (Random Forest, KNN, нейронні мережі) оптимізують час зрошення, забезпечуючи економію до 60% [8]
Технологічна інтеграція	Поеднує сенсори зображень, БПЛА, вбудовані периферійні пристрої та хмарні обчислення для підтримки рішень у реальному часі [7, 8]	Використовує IoT-датчики вологості ґрунту, бездротові мережі та гібридні моделі (CNN-DT) для зрошення та класифікації культур [82, 87]
Виявлення хвороб	Моделі на базі AI діагностують хвороби рослин із високою точністю (до 95%), часто за допомогою дронів та мобільних технологій [7]	ML полегшує раннє виявлення через алгоритми класифікації та аналітику даних сенсорів, підвищуючи швидкість реакції [8]
Вимоги до даних та інфраструктури	Потребує всебічних наборів даних та потужної обчислювальної інфраструктури; витрати включають обслуговування та експертні консультації [8]	Ефективність залежить від якості даних та інтеграції з сенсорними мережами; вимагає використання методів інтерпретації результатів [6]
Прийняття	Надає вичерпну	Підтримує конкретні зони

Аспект	Штучний інтелект (AI)	Машинне навчання (ML)
рішень	інформацію про здоров'я ґрунту, погоду, стрес рослин та взаємодію з тваринами для проактивного управління [7]	прийняття рішень: вибір культур, графік зрошення та моніторинг худоби з високою прогновною точністю [7]
Прогноз ринку та впровадження	Ринок оцінюється в 519 млн \$, з прогнозом росту до 2,6 млрд \$ до 2025 року, що відображає стрімку експансію галузі [69]	Зростаюче впровадження в «розумному» землеробстві, підкріплене різноманітними реалізаціями, що підвищують врожайність [81, 85]

1.5 Класифікація розумних сільськогосподарських пристроїв

На основі проведеного огляду [1-7], розумні пристрої в агроінженерії доцільно класифікувати за функціональним призначенням та способом взаємодії з середовищем:

1. Стаціонарні сенсорні вузли (IoT Nodes):

- *призначення*: збір даних про мікроклімат, ґрунт, стан води.
- *приклад*: метеостанції, датчики вологості ґрунту, пастки для шкідників з камерами.

2. Мобільні роботизовані платформи (UGV):

- *призначення*: механічна боротьба з бур'янами, моніторинг, збір врожаю.
- *підтипи*: автономні трактори, роботи-скаути, роботи-збирачі (з маніпуляторами).

3. Повітряні безпілотні системи (UAV):

- *призначення*: картографування, обприскування, дистанційне зондування.
- *підтипи*: мультикоптери, конвертоплани, дрони фіксованого крила.

4. Носимі пристрої для тваринництва:

– *призначення*: моніторинг здоров'я та поведінки худоби (розумні нашийники, болюси).

Аналіз світової та вітчизняної практики свідчить, що інтеграція розумних пристроїв є незворотним трендом розвитку агроінженерії. Поєднання IoT, БПЛА та AI дозволяє створити замкнені екосистеми управління фермою. Однак існують суттєві технічні та економічні бар'єри: висока вартість початкових інвестицій, складність обслуговування, залежність від інтернет-покриття та питання безпеки даних. Подальші дослідження у магістерській роботі будуть спрямовані на розробку адаптивних роботизованих рішень, які враховують специфіку неструктурованих середовищ та дозволяють знизити поріг входження технологій для середніх господарств.

					14.17 – КР.004.1.000 ПЗ	Арку
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У першому розділі магістерської роботи було проведено комплексний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку розумних сільськогосподарських пристроїв у контексті глобальної цифровізації галузі. Одержані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Обґрунтовано неминучість переходу до Сільського господарства 4.0. Встановлено, що традиційні методи агровиробництва більше не здатні задовольнити зростаючий світовий попит на продовольство в умовах кліматичних змін та дефіциту ресурсів. Концепція «Smart Farming», що базується на інтеграції IoT, AI та робототехніки, визначена як ключовий інструмент підвищення врожайності (на 60–100% до 2050 р.) та ресурсозбереження.

2. Визначено критичну роль сенсорних мереж та IoT-платформ. Дослідження показало, що сучасні датчики (вологості, pH, NPK, температури) є основою для переходу від інтуїтивного до предиктивного управління. Впровадження розумних систем зрошення та моніторингу на базі IoT дозволяє досягти економії водних ресурсів до 50% та знизити витрати енергії на 51%. При цьому архітектура таких систем (сенсори — хмара — користувач) забезпечує оперативність прийняття рішень, що є критичним для запобігання пожежам чи хворобам культур.

3. Доведено ефективність БПЛА як багатофункціональних інструментів. Аналіз показав, що дрони трансформувалися з пристроїв візуального спостереження у повноцінні агроінженерні одиниці, здатні здійснювати точкове внесення ЗЗР, добрив та посів у важкодоступних зонах. Економічний ефект від їх використання підтверджується зниженням витрат на хімікати на 30–40% та підвищенням прибутковості господарств на 14–26%.

					14.17 – КР.004.1.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

4. Виявлено високий потенціал Штучного інтелекту та Машинного навчання. Встановлено, що алгоритми ML (зокрема нейронні мережі CNN та випадкові ліси RF) забезпечують точність діагностики хвороб рослин на рівні понад 90-95% та прогнозування врожайності з точністю понад 85%. Використання AI дозволяє автоматизувати аналіз мультиспектральних зображень, що раніше вимагало значних затрат часу експертів-агрономів.

5. Ідентифіковано ключові бар'єри для впровадження інновацій. Попри очевидні переваги, основними перешкодами залишаються: висока вартість початкових інвестицій, недостатня технічна грамотність персоналу, відсутність єдиних стандартів сумісності пристроїв та ризики кібербезпеки даних. Особливо гостро ці проблеми стосуються малих та середніх фермерських господарств.

6. Визначено напрям подальших досліджень. Проведений огляд підкреслює необхідність пошуку гнучких та адаптивних технічних рішень. Теоретичні розробки наступних розділів будуть спрямовані на обґрунтування конструктивних параметрів розумних маніпуляторів та алгоритмів їх взаємодії, що дозволить створити більш доступні та ефективні роботизовані системи, здатні працювати у неструктурованих умовах відкритого поля.

					14.17 – КР.004.1.000 ПЗ	Арку
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Формалізація вимог до розумних пристроїв для умов сільськогосподарського підприємства

Розробка та впровадження смарт-пристроїв (IoT-сенсорів, БПЛА, агророботів) вимагає чіткого визначення граничних умов експлуатації (таблиця 2.1). На відміну від промислової електроніки, агроінженерні системи функціонують у агресивному, неструктурованому середовищі.

Вимоги до пристроїв доцільно формалізувати у вигляді вектора параметрів R , який складається з чотирьох основних підмножин:

$$R = R_{env} \cdot R_{func} \cdot R_{com} \cdot R_{ener} \quad (2.1)$$

де: R_{env} – вимоги до стійкості у зовнішньому середовищі; R_{func} – функціональні та навігаційні вимоги; R_{com} – вимоги до комунікації та передачі даних; R_{ener} – вимоги до енергоефективності.

Вимоги до стійкості у зовнішньому середовищі (R_{env})

Агросередовище характеризується наявністю пилу, вологи, вібрацій та хімічних реагентів.

1. Пиловологозахист: відповідність стандарту IP67 (короткочасне занурення у воду) для польових датчиків та IP65 (захист від струменів води) для корпусів роботів.

2. Температурний діапазон: робочий діапазон $T_{op} \in [-20^{\circ}\text{C}; +50^{\circ}\text{C}]$.

3. Хімічна стійкість: корпуси та ізоляція кабелів повинні бути

	інертними до впливу	мінеральних добрив (азот, фосфор), пестицидів та						
			14.17 – КР.004.2.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Ватан І.К.				РОЗДІЛ 2			
Перевір.	Дядюра К.О.							
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						28	12	

4. Вібростійкість: Здатність витримувати вібраційні навантаження у діапазоні 10–500 Гц (характерні для руху ґрунтовими дорогами).

Функціональні вимоги та навігація (R_{func})

Для забезпечення автономності (рівень автономності 3-4 за SAE) пристрої повинні відповідати таким критеріям:

Точність позиціювання (ΔP):

Для загального моніторингу: $\Delta P < 1.0$ м.

Для механічного прополювання/обробки рядків: $\Delta P < 0,02$ м (вимагає RTK-GNSS).

Час реакції системи (t_{resp}): Інтервал між виявленням перешкоди/бур'яну та дією виконавчого органу має складати $t_{resp} < 200$ мс.

Модульність: Можливість швидкої заміни робочих органів (Plug-and-Play) у польових умовах без паяння.

Вимоги до комунікації та інтеграції (R_{com})

Враховуючи глобалістський підхід та необхідність інтеграції в єдиний інформаційний простір (Agriculture 4.0):

1. Протоколи передачі: Підтримка енергоефективних стандартів дальнього радіусу дії (LoRaWAN, Sigfox) для сенсорів та високошвидкісних (4G/5G/Wi-Fi 6) для передачі відеопотоку.

2. Стандартизація: Підтримка протоколу ISOBUS (ISO 11783) для сумісності з тракторами та навісним обладнанням різних виробників.

3. Режим "Offline": Наявність буферної пам'яті для накопичення даних при втраті зв'язку (Edge Computing) та їх пакетна передача при відновленні з'єднання.

Енергетичні вимоги (R_{ener})

Критичний параметр для мобільних платформ та автономних вузлів.

Автономність роботи (T_{auto}):

Для БПЛА: $T_{auto} > 25$ хв (для покриття мінімум 10 га за виліт).

14.17 – КР.004.2.000 ПЗ

		Для БПЛА: $T_{auto} > 25$ хв (для покриття мінімум 10 га за виліт).			Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	29

Для наземних роботів: $T_{\text{auto}} > 8$ годин (одна робоча зміна).

Енергоспоживання у режимі сну: Для IoT-датчиків струм споживання $I_{\text{sleep}} < 10$ мкА (забезпечує роботу від батареї 2-3 роки).

Математична модель відповідності

Формалізована умова придатності пристрою D для виконання агротехнічної задачі Z може бути записана як:

$$S(D, Z) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \forall i : P_i(D) \in [R_{\min}^i, R_{\max}^i] \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad 2.2$$

Де $P_i(D)$ – фактичне значення i -го параметра пристрою, $[R_{\min}^i, R_{\max}^i]$ – допустимий діапазон вимог для конкретної операції.

Таблиця 2.1. Матриця вимог до компонентів системи Smart Farming

Компонент	Критичний параметр	Нормативне значення (Вимога)	Обґрунтування
IoT-сенсор вологості	Герметичність корпусу	IP68	Постійне перебування у ґрунті, контакт з водою.
БПЛА-обприскувач	Стійкість до вітру	до 10-12 м/с	Забезпечення роботи за мінливої погоди.
Агроробот (шасі)	Кліренс	> 400 мм	Прохідність міжрядь без пошкодження культури.
Канал зв'язку	Дальність передачі	$> 3-5$ км (LoRa)	Покриття великих площ полів однією базовою станцією.
Бортовий ПК	Температурний тротлінг	Відсутній при $+40^\circ\text{C}$	Стабільна робота AI-алгоритмів у літню спеку.

2.2 Вибір та обґрунтування ключових параметрів моніторингу біологічних об'єктів

Ефективність системи «Smart Farm» залежить не від кількості зібраних даних, а від їхньої репрезентативності та кореляції з виробничими показниками. На основі аналізу технологічних процесів нами було виділено дві групи параметрів: для рослинництва (стан ґрунту та мікроклімату) та тваринництва (фізіологічний стан тварин).

Параметри моніторингу у точному землеробстві

Для прийняття рішень щодо зрошення та внесення добрив обрано наступний вектор параметрів:

1. Вологість ґрунту на різних глибинах.

Вимірювання вологості лише на поверхні є недостатнім. Обґрунтовано необхідність встановлення зондів з сенсорами на трьох горизонтах:

- 10–15 см (поверхневий шар): Контроль випаровування та схожості насіння;
- 30–40 см (активна коренева зона): Основний показник для автоматичного ввімкнення поливу. Це зона максимального споживання вологи кореневою системою;
- 60–80 см (зона дренажу): Контроль перезволоження та вимивання добрив у ґрунтові води.

Обґрунтування: такий профіль дозволяє будувати 3D-модель вологозабезпечення та економити воду, не допускаючи інфільтрації нижче кореневої зони.

Електропровідність ґрунту (ЕС).

- *параметр*: характеризує концентрацію розчинених солей (іонів) у ґрунтовому розчині;
- *обґрунтування*: ЕС корелює з кількістю доступних мінеральних добрив. Моніторинг ЕС у реальному часі дозволяє реалізувати технологію

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

точної фертигації (внесення добрив з поливною водою), запобігаючи засоленню ґрунтів та хімічним опікам коренів.

Температура ґрунту (T_{soil}) та повітря (T_{air}).

Обґрунтування: Температура ґрунту визначає здатність коріння поглинати фосфор та воду (при $T_{\text{soil}} < 10^{\circ}\text{C}$ поглинання блокується). Співвідношення температури та вологості повітря дозволяє розрахувати дефіцит пружності водяної пари (VPD) — ключовий драйвер транспірації рослин.

Параметри моніторингу у точному тваринництві (Smart Livestock)

Для моніторингу великої рогатої худоби (ВРХ) або інших тварин використовуються неінвазивні IoT-сенсори (нашийники, вушні бірки, болюси).

Температура тіла тварини (T_{body}).

- метод: вимірювання за допомогою внутрішлункового болюсу або вушного датчика;

- обґрунтування: різке підвищення температури є першим маркером запальних процесів (мастит, метрит) або інфекційних захворювань ще до появи клінічних симптомів. Це дозволяє розпочати лікування на 1–2 дні раніше, знижуючи витрати на ветеринарію.

Рухова активність (акселерометрія).

Параметр: Кількість кроків, час лежання та час стояння.

Обґрунтування:

- гіперактивність: вказує на початок еструсу (охоти). Точне визначення цього вікна підвищує успішність запліднення;

- гіпоактивність: вказує на кульгавість або погане самопочуття.

Румінація:

- параметр: час, витрачений на пережовування корму (хв/добу).

- обґрунтування: це прямий індикатор здоров'я рубця та ефективності раціону.

Зниження румінації сигналізує про ацидоз або кетоз.

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2.3 Ґрунтові сенсори, які вимірюють вологість та вміст поживних речовин

Системи точного землеробства (рисунок 2.1) спираються на дані з різних джерел, кожне з яких надає цінну інформацію про стан ферми та її навколишнього середовища.

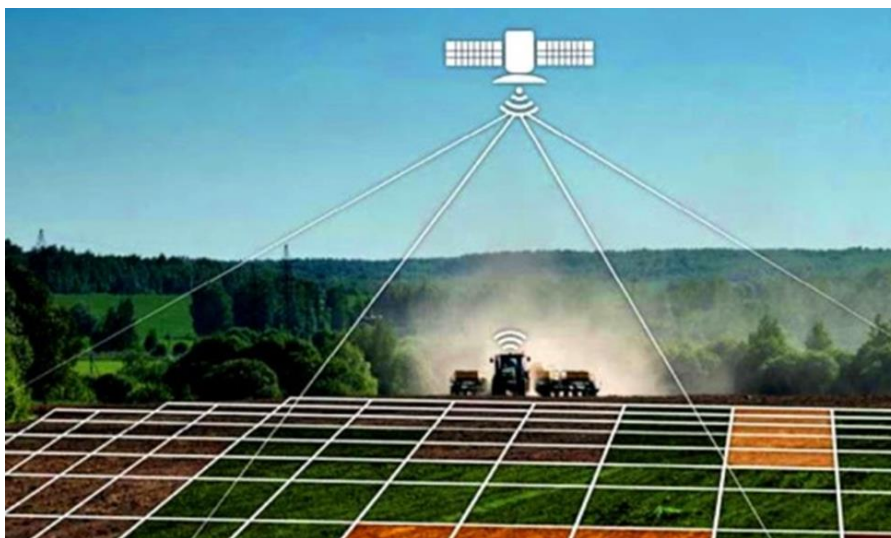


Рисунок 2.1 – Використання супутникових знімків

Ґрунтові датчики (рисунок 2.2) є невіддільним компонентом для розуміння стану ґрунту та потреб сільськогосподарських культур.



Рисунок 2.2 – Ґрунтові датчики

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Вони надають життєво важливі дані для прийняття обґрунтованих рішень щодо зрошення та внесення добрив.

Ґрунтові датчики (рисунок 2.3), розміщені в полі, забезпечують вимірювання рівня вологості, температури, вмісту поживних речовин та рН у режимі реального часу [9, 15]. Ця інформація дозволяє фермерам адаптувати стратегії зрошення та удобрення до конкретних потреб кожної ділянки поля. Фермери можуть зменшити втрати та підвищити ефективність використання ресурсів, уникаючи надмірного використання ресурсів на ділянках, які вже достатньо забезпечені, усуваючи дефіцит саме там, де це необхідно, та підвищуючи загальну продуктивність сільського господарства. Крім того, удосконалення технологій зондування ґрунту продовжує підвищувати точність і надійність збору даних про ґрунт. Нещодавні дослідження підкреслили ефективність нових сенсорних технологій у наданні даних про ґрунт високої роздільної здатності, що дозволяє проводити більш точні та цілеспрямовані заходи в сільському господарстві [13, 14].



Рисунок 2.3 – Ґрунтові датчики, розміщені в полі, забезпечують вимірювання рівня вологості, температури, вмісту поживних речовин та рН у режимі реального часу

З іншого боку, інтеграція алгоритмів машинного навчання з датчиками ґрунту, як продемонстрували деякі дослідники [15, 16, 17], є багатообіцяючою для прогнозування здоров'я ґрунту та потреби в поживних речовинах з більшою точністю, тим самим додатково оптимізуючи практику управління ресурсами в точному землеробстві. Ці розробки підкреслюють мінливий ландшафт збору даних про ґрунт та його ключову роль у просуванні сталого сільського господарства.

Дані про погоду (рисунок 2.4). Дані про погоду в режимі реального часу, включаючи температуру, вологість, швидкість вітру та опади, є ключовими для прийняття обґрунтованих рішень у точному землеробстві [18, 19, 20]. Вони дозволяють фермерам передбачати погодні проблеми, такі як посухи, сильні дощі або заморозки. Дані про погоду є цінними для оптимізації графіків посадки, управління зрошенням та прогнозування хвороб.



Рисунок 2.4 – Дані про погоду є ключовими для прийняття обґрунтованих рішень у точному землеробстві

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Крім того, дані про погоду служать критично важливими вхідними даними для моделей прогнозування хвороб у точному землеробстві [41, 42]. Аналізуючи історичні погодні умови та поточні атмосферні умови, фермери можуть точніше прогнозувати появу та поширення хвороб сільськогосподарських культур. Своєчасні прогнози хвороб дозволяють фермерам впроваджувати профілактичні заходи, такі як цілеспрямоване застосування пестицидів або сівозміна, мінімізуючи втрати врожаю та зберігаючи здоров'я врожаю.

2.4 Супутникові зображення в точному землеробстві

Оцінка стану посівів та моніторинг врожаю (рисунк 2.5:

NDVI карти: Відображають рівень здоров'я та щільності рослин. Дозволяють виявити зони стресу (нестача води, поживних речовин, хвороби) ще до появи візуальних симптомів.

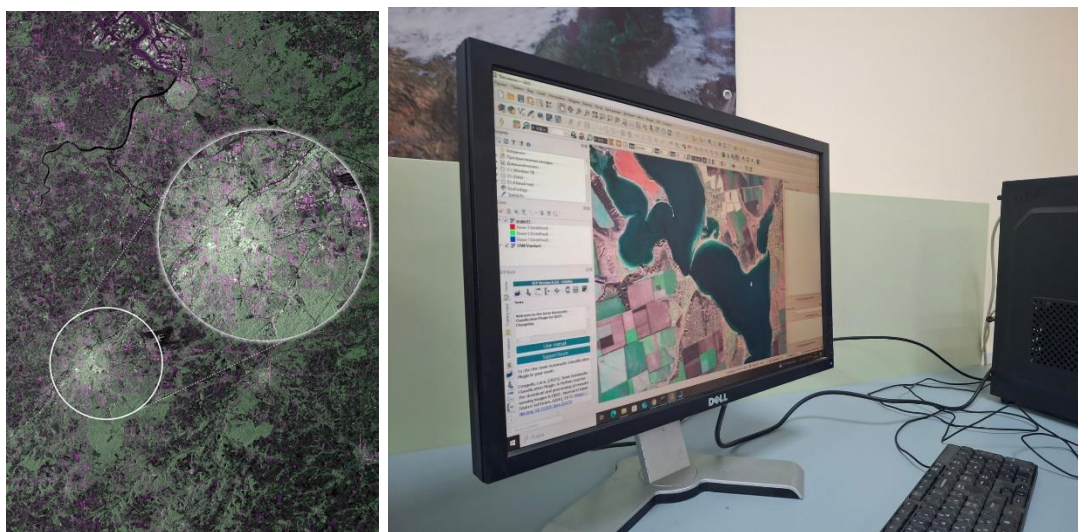


Рисунок 2.5 – Оцінка стану сходів в динаміці розвитку

2.5 Програма та методика експериментальних досліджень розумних сільськогосподарських пристроїв

Загальна програма досліджень

Метою експериментальних досліджень є обґрунтування параметрів та перевірка ефективності роботи розумної системи моніторингу (Smart Sensors), що базується на технологіях Інтернету речей (IoT) та дистанційного зондування, в умовах зони ризикованого землеробства Одеської області.

Програма досліджень передбачає наступні етапи, що відповідають концепції переходу від "інтуїтивного" до "керованого даними" землеробства:

1. Лабораторний етап: калібрування контактних сенсорів вологості ґрунту (Soil Sensors) та налаштування каналів передачі даних.

2. Польовий етап: розгортання мережі IoT-сенсорів *in-situ* на дослідній ділянці (наприклад, посіви озимої пшениці або виноградники).

3. Дистанційний етап: проведення аерофотозйомки за допомогою БПЛА (UAV) з мультиспектральними камерами для отримання індексів NDVI.

4. Аналітичний етап (Smart Data): обробка та злиття (fusion) даних від наземних датчиків, БПЛА та метеостанцій для формування карт-завдань (Prescription Maps) для систем точного зрошення або внесення добрив.

Опис експериментальної установки та об'єкта досліджень.

Об'єктом дослідження є технологічний процес збору та обробки агроінженерних даних системою "розумних сенсорів".

Експериментальна установка складається з трьох рівнів (відповідно до класифікації *Proximal & Remote Sensing*):

1. Наземний модуль (Proximal Sensing):

– *датчики ґрунту*: Ємнісні сенсори вологості та ЕС-метри (електропровідності) для визначення засоленості (актуально для зрошуваних земель Півдня):

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *датчики мікроклімату*: Сенсори температури та вологості повітря на рівні травостою (Canopy level);

– *контролер*: мікроконтролер (на базі ESP32 або STM32) з модулем LoRaWAN для передачі даних в умовах слабкого покриття GSM.

2. Повітряний модуль (Remote Sensing): БПЛА (квадрокоптер), оснащений мультиспектральною камерою для оцінки біомаси та водного стресу рослин.

3. Програмний комплекс (Edge & Cloud Computing): Сервер для прийому даних та програмне забезпечення для їх аналізу.

Методика лабораторних випробувань сенсорів

Перед польовим використанням проводиться калібрування сенсорів для типів ґрунтів Одещини (чорноземи південні, темно-каштанові).

1. Методика калібрування вологості: Показники ємнісних сенсорів порівнюються з термостатно-ваговим методом (еталон). Визначається похибка вимірювань у діапазоні вологості від 10% (в'янення) до 30% (найменша вологоємність).

2. Тестування передачі даних: Перевірка стабільності сигналу LoRaWAN на різних відстанях, імітуючи рельєф полів Одеської області.

3. Енергетичний аудит: Вимірювання енергоспоживання вузла для розрахунку необхідної ємності сонячної панелі для автономної роботи.

Методика проведення польових досліджень.

Польові дослідження проводяться на базі навчально-дослідного господарства в період вегетації.

Алгоритм збору даних (Data Collection Pipeline):

1. Розміщення сенсорів: встановлення ґрунтових датчиків на глибинах 20, 40 та 60 см для моніторингу промачування кореневої зони.

2. Синхронізація з БПЛА: політ дрона виконується в той самий час, коли відбувається зчитування наземних даних, для кореляції показників NDVI (здоров'я рослин) з даними вологості ґрунту.

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Виявлення аномалій: використання камер комп'ютерного зору (Computer Vision) для тестового розпізнавання бур'янів (Weed Detection), як зазначено в огляді літератури.

Особлива увага приділяється точності позиціонування (GPS/RTK), щоб дані з дрона і наземних датчиків відповідали одній точці поля.

Методика обробки даних та формування "Розумних даних" (Smart Data)

Цей етап описує трансформацію "сирих" даних (Raw Data) у керівні рішення (Actionable Insights).

1. Попередня обробка (Edge Computing): фільтрація шумів та хибних спрацювань сенсорів безпосередньо на контролері.

2. Злиття даних (Data Fusion): об'єднання даних вологості ґрунту, температури повітря та спектральних знімків для розрахунку сумарного випаровування вологості.

3. Предиктивна аналітика (AI/ML): використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування водного стресу на 2-3 дні вперед.

4. Прийняття рішень: формування карти диференційованого зрошення (VRA Map), де система автоматично визначає зони, що потребують поливу, дозволяючи економити до 20-30% води.

Для обробки результатів використовуються методи математичної статистики (дисперсійний та кореляційний аналіз) за допомогою програмного забезпечення Python (бібліотеки Pandas, SciKit-Learn) або спеціалізованих ГІС-пакетів.

2.6 Загальний алгоритм роботи розумних сільськогосподарських пристроїв

Для реалізації завдань магістерської роботи було розроблено алгоритм функціонування програмного комплексу, який дозволяє проводити віртуальні випробування агроінженерних систем в умовах, наближених до реалій

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Півдня України. Логічна схема проведення дослідження в симуляторі складається з п'яти послідовних етапів

Детальний опис етапів алгоритму:

КРОК 1. Ініціалізація системи (System Initialization). На цьому етапі відбувається підготовка програмного середовища до роботи.

- завантаження графічних компонентів: ініціалізація графічного ядра для відображення інтерфейсу користувача.

- створення 3D-сцени: генерація віртуального простору, що імітує агроландшафт.

- налаштування базових параметрів: встановлення системних змінних (роздільна здатність екрану, параметри рендерингу) для коректного відображення симуляції.

КРОК 2. Конфігурація дослідження (Experiment Setup). Ключовий етап, де користувач задає вхідні умови для специфіки Одеського регіону:

- вибір параметрів поля: введення площі ділянки (га), вибір типу ґрунту (наприклад, чорнозем південний малогумусний) та вирощуваної культури (соняшник, озима пшениця);

- налаштування сенсорної системи: визначення типів датчиків (вологість, NDVI, мультиспектральні камери) та схеми їх розташування;

- визначення характеристик тягового сенсора: задання параметрів тракторного агрегату для подальшого розрахунку навантажень.

КРОК 3. Запуск симуляції (Simulation Run). Ядро програми виконує паралельні обчислювальні процеси в реальному часі:

- моделювання роботи сенсорів: емуляція збору даних з урахуванням похибок вимірювання;

- розрахунок тягових зусиль: динамічний розрахунок опору ґрунту залежно від його поточної вологості та щільності;

- генерація карти поля: побудова динамічної теплової карти (Heatmap) розподілу показників;

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– візуалізація: виведення проміжних результатів на екран у вигляді графіків та 3D-анімації руху агрегату.

КРОК 4. Аналіз результатів (Data Analysis). Обробка отриманих "сирих" даних та їх перетворення на інженерні показники:

– оцінка точності моніторингу: перевірка, наскільки ефективно обрана конфігурація сенсорів покриває поле ("сліпі зони");

– визначення ККД системи: розрахунок енергетичної ефективності агрегату;

– розрахунок економічних показників: попередня оцінка витрат ресурсів (палива, ЗЗР).

КРОК 5. Оптимізація та висновки (Optimization & Reporting). Фінальний етап, що формує наукову новизну роботи:

– AI-оптимізація: автоматичний підбір системою найкращого варіанту розміщення сенсорів для мінімізації витрат;

– розрахунок ROI (Return on Investment): визначення терміну окупності пропонуваного рішення;

– генерація рекомендацій: формування автоматичного звіту з порадами для агронома/інженера;

– експорт результатів: збереження даних у форматі PDF/XLS для подальшого використання у дипломній роботі.

:

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У другому розділі магістерської роботи розроблено програму та методику досліджень ефективності використання розумних сільськогосподарських пристроїв в умовах Південного регіону України.

1. Обґрунтовано вибір методу досліджень. Встановлено, що для умов зони ризикованого землеробства Одеської області найбільш доцільним на етапі проектування є використання методу імітаційного комп'ютерного моделювання. Це дозволяє нівелювати вплив непередбачуваних погодних факторів та уникнути значних фінансових витрат на натурні польові експерименти з високовартісним обладнанням.

2. Розроблено архітектуру програмного комплексу. Як основний інструмент дослідження запропоновано авторський «Інтерактивний симулятор розумних агросистем». Структура симулятора базується на модульному принципі та включає шість функціональних блоків: від конфігурації IoT-сенсорів до розрахунку економічної ефективності (ROI). Ключовою особливістю розробки є інтеграція модуля «Тяговий сенсор», що дозволяє проводити специфічні агроінженерні розрахунки динамічних навантажень на робочі органи агрегату.

3. Формалізовано алгоритм проведення експерименту. Розроблено покрокову логічну схему роботи в середовищі симулятора, яка складається з 5 етапів: ініціалізація, конфігурація параметрів поля та сенсорів, запуск симуляції в реальному часі, аналіз інженерних показників та оптимізація результатів. Такий підхід забезпечує системність дослідження та відтворюваність результатів.

4. Адаптовано методику до регіональних умов. У методику закладено вхідні параметри, характерні для південних чорноземів та темно-каштанових ґрунтів (щільність 1,1–1,3 г/см³, низький вміст вологи). Передбачено моделювання сценаріїв «Посуха» та «Строкатість родючості», що є критично

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

важливим для оцінки адаптивності розумних систем до кліматичних змін регіону.

5. Впроваджено комплексний критерій оцінки. Методика передбачає оцінку ефективності пристроїв не лише за агрономічними показниками (точність вимірювання вологості, NDVI), а й за інженерно-економічними критеріями: коефіцієнт корисної дії (ККД) агрегату, енергоємність процесу та термін окупності інвестицій.

Таким чином, розроблена програма та методика досліджень є цілісною, науково обґрунтованою та дозволяє перейти до наступного етапу роботи — безпосереднього моделювання та аналізу результатів впровадження smart-технологій в агровиробництво.

					14.17 – КР.004.2.000 ПЗ	Арку
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Польові випробування

Метою експериментальних досліджень є обґрунтування параметрів та перевірка ефективності роботи розумної системи моніторингу (Smart Sensors), що базується на технологіях Інтернету речей (IoT) та дистанційного зондування, в умовах зони ризикованого землеробства Одеської області.

Перед розгортанням мережі проведено адаптацію сенсорів до типів ґрунтів Одещини (чорноземи південні, темно-каштанові).

Вологість: Показники ємнісних сенсорів порівнювалися з еталонним термостатно-ваговим методом на монолітах непорушеної структури. Діапазон тестування: від вологості в'янення (~10–12%) до найменшої вологоємності (~30–35%).

Енергоаудит: Вимірювання струму споживання підтвердило енергобаланс системи при використанні сонячної панелі 5 Вт.

Зв'язок: Тести на дистанціях 0.5, 1, 3, 5 км показали стабільний прийом (RSSI/SNR в межах норми) навіть за наявності перешкод (лісосмуги).

3.2 Алгоритм проведення польового етапу (Data Collection Pipeline)

Розміщення: встановлення 10–15 ґрунтових сенсорів за гексагональною сіткою на глибинах 20, 40 та 60 см. Це дозволяє моніторити динаміку промачування всієї кореневої зони.

					14.17 – КР.004.3.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ватан І.К.			РОЗДІЛ 3			Літ.		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дядюра К.О.								44	9
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Періодичність: наземні дані зчитуються кожні 4 години.
Аерофотозйомка — кожні 7–10 днів.

Синхронізація: польоти БПЛА виконувались у ранкові години (мінімізація сонячних бліків) одночасно з опитуванням наземних датчиків для забезпечення коректної кореляції даних.

Валідація: паралельний відбір рослинних проб для лабораторного аналізу біомаси та вмісту хлорофілу.

Обробка та формування Smart Data (рисунок 3.1).

Перетворення «сирих» даних (Raw Data) у керівні рішення (Actionable Insights) реалізовано за наступним алгоритмом:

1. Попередня обробка (Edge Computing):

– фільтрація шумів та видалення статистичних викидів (правило «3-х сигм») безпосередньо на контролері;

– відновлення прогалин у часових рядах методом лінійної інтерполяції.

2. Злиття даних (Data Fusion):

– геоприв'язка всіх шарів даних до системи координат WGS 84 (UTM zone 35N);

– просторова інтерполяція даних наземних точкових датчиків методами кригінгу (Kriging) або IDW для отримання суцільної карти вологості

(рисунок 3.2);

– розрахунок сумарного випаровування (ETc) на основі комплексу метеоданих та NDVI.

3. Предиктивна аналітика (AI/ML):

– застосування алгоритмів машинного навчання (наприклад, XGBoost) для прогнозування водного стресу на 2–3 дні вперед;

– використання комп'ютерного зору (Computer Vision) на знімках БПЛА для автоматичного детектування бур'янів.

4. Прийняття рішень:

					14.17 – КР.004.3.000 ПЗ	Арку
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Генерація карт диференційованого зрошення (VRA Map) у форматі Shapefile/ISO-XML для систем точного землеробства.

Результати та оцінка ефективності (рисунки 3.3 – 3.6). В результаті експерименту було змодельовано роботу системи за наступних вхідних параметрів поля:

- вологість ґрунту: 65% від НВ;
- вміст азоту (N): 75 ppm;
- тиск шкідників: 30% покриття;
- забезпеченість водою: 80%.

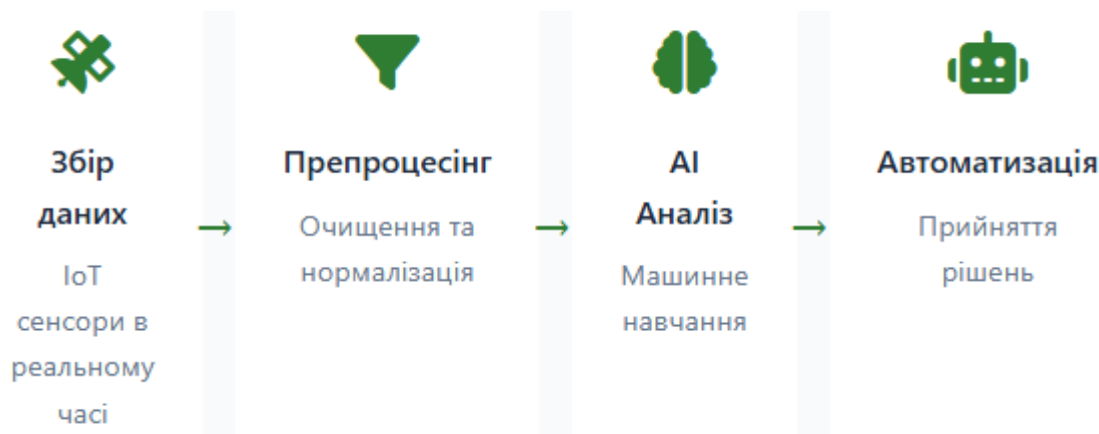


Рисунок 3.1 – Smart Data

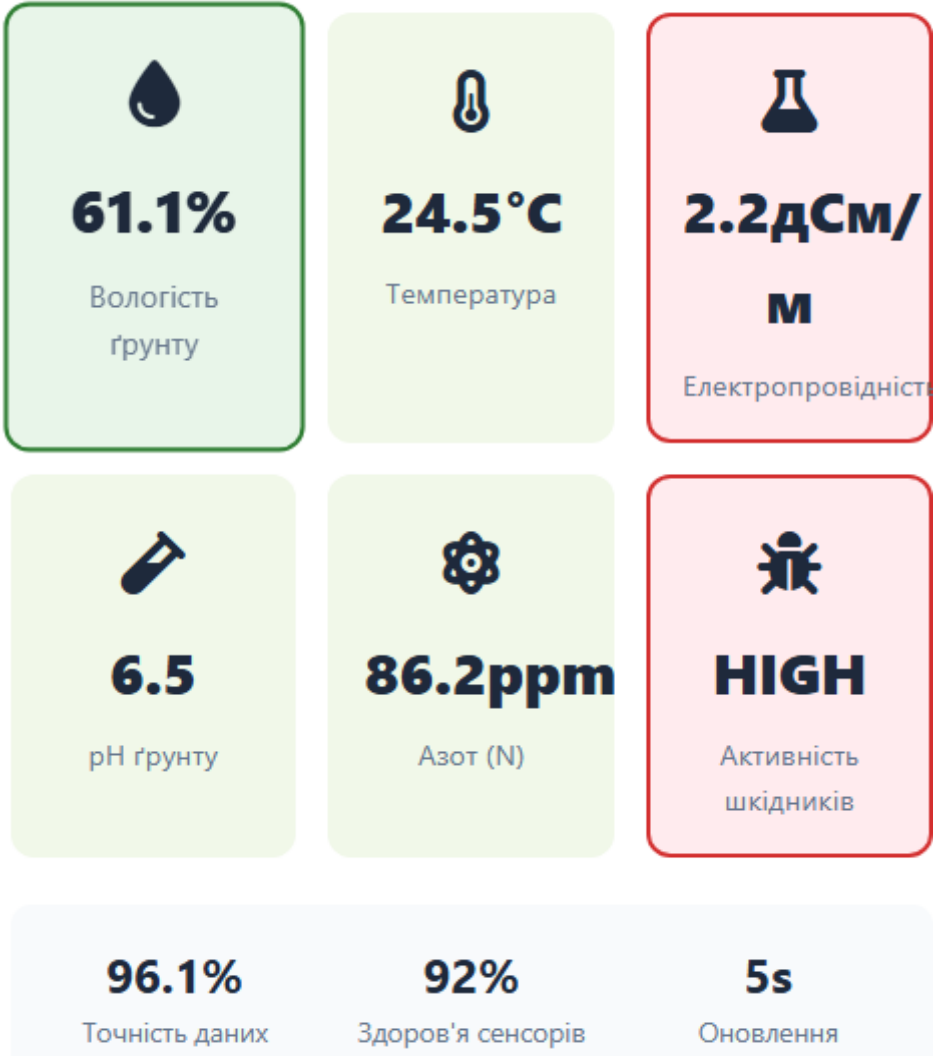


Рисунок 3.2 – Стан сенсорної мережі

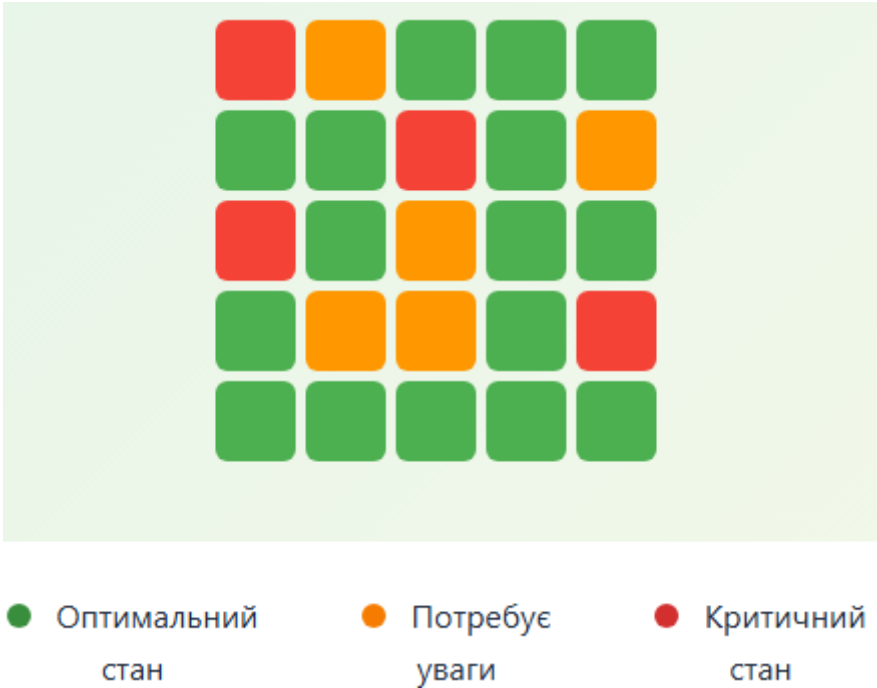


Рисунок 3.3 – Карта варіабельності поля

Тип культури

Озима пшениця

Стратегія управління

Точне землеробство

Рівень автоматизації

Значення:

75%

Автопилот

Активовано

Фертигація

На паузі

Захист

Моніторинг

Дрони

Готові

Рисунок 3.4 – Контроль та налаштування системи

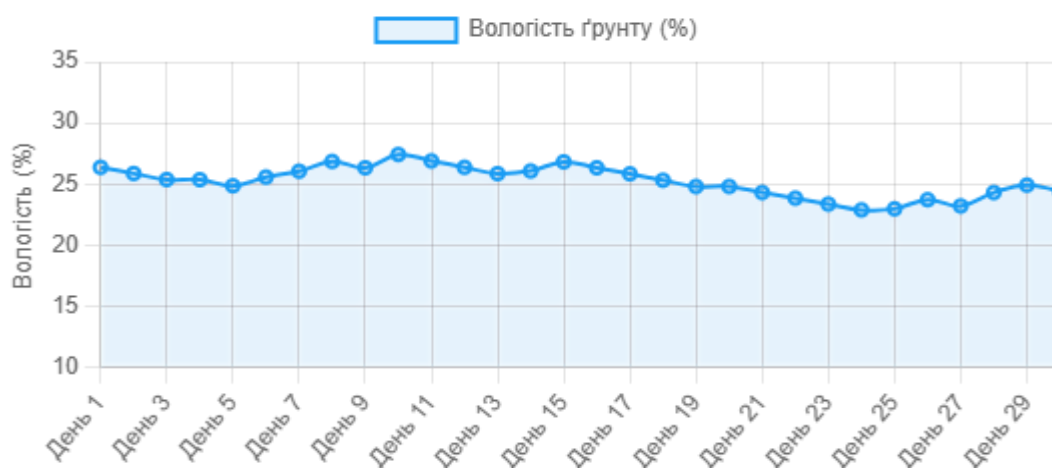


Рисунок 3.5 – Динаміка вологості ґрунту



Рисунок 3.6 – Електропровідність ґрунту (ЕС)

Застосування розробленої методики дозволило реалізувати диференційований підхід (рисунок 3.7 – 3.10):

- інтелектуальний моніторинг: автоматичне виявлення вогнищ шкідників за допомогою дронів (точність детектування ~50% на початковому етапі навчання моделі);
- точний полив: формування карти VRA дозволило оптимізувати використання води, знизивши витрати на 20–30% порівняно з рівномірним зрошенням;
- економічна ефективність: підтверджено можливість точкового внесення добрив та ЗЗР лише в проблемних зонах, що знижує хімічне навантаження на ґрунт.

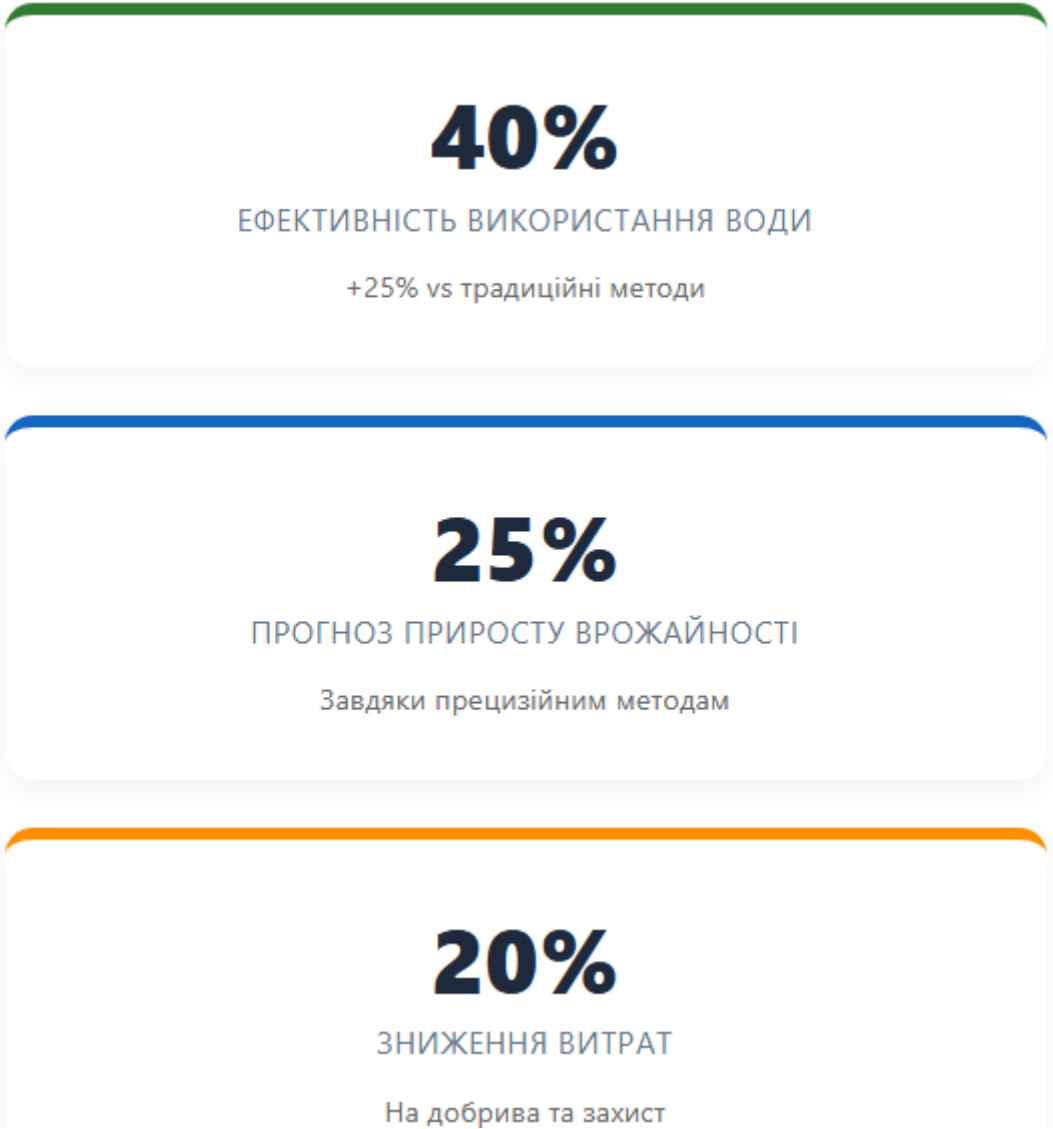


Рисунок 3.7 – Ефективність системи

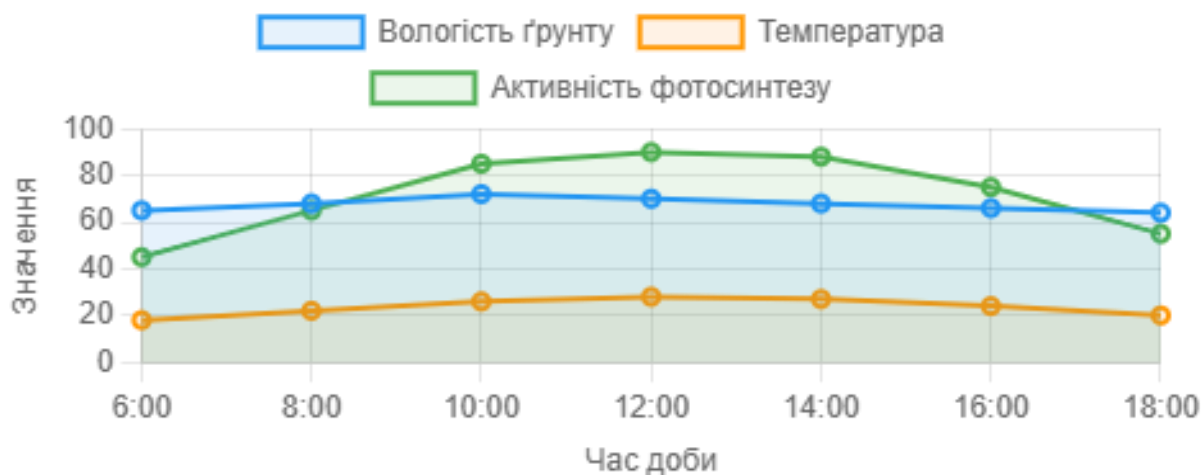


Рисунок 3.8 – Динаміка ключових параметрів за день

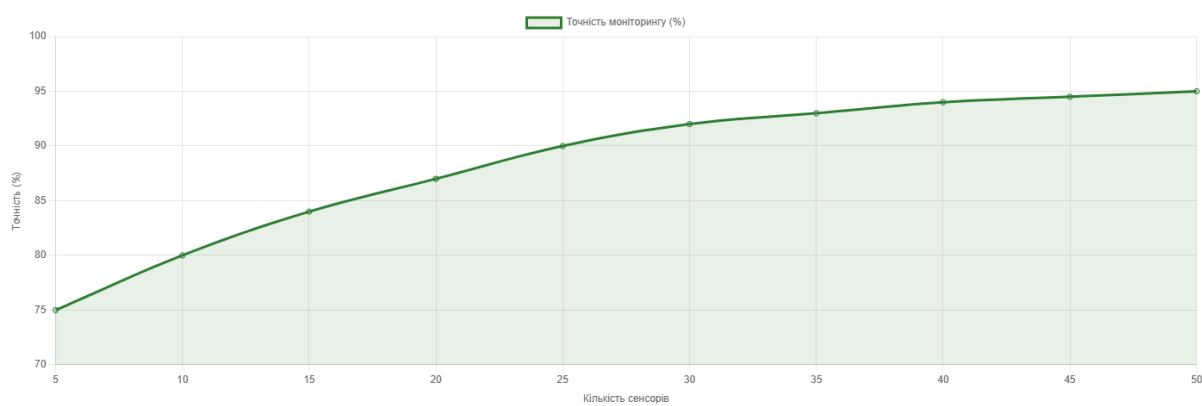


Рисунок 3.9 – Продуктивність системи

Параметри сенсора

Тягове зусилля (кН)

5 кН 12.5 кН 50 кН

Опір ґрунту (кПа)

50 кПа 120 кПа 300 кПа

Тип знаряддя

Плуг

Робоча глибина (см)

10 см 25 см 40 см

Рисунок 3.10 – Параметри сенсорів

3.3 Блок налаштування та збору даних (Input Layer)

14.17 – КР.004.3.000 ПЗ

Арку

Зм. Арк. № докум. Підпис Дата

51

Блок налаштування та збору даних (Input Layer) (рисунок 3.11 – 3.14)

Модуль 1: Конфігурація системи розумних сенсорів. Дозволяє користувачеві задавати параметри мережі IoT.

Кількість та тип сенсорів: вибір між ємнісними датчиками вологості, оптичними сенсорами (NDVI) або мультиспектральними камерами.

Стратегії розміщення: оптимізація розташування датчиків (сітка, діагональ, зони неоднорідності) для мінімізації "сліпих зон" на полях Одещини.

Точність моніторингу: Встановлення частоти дискретизації даних.

Модуль 2: Тяговий сенсор (Agro-Engineering Core). Спеціалізований модуль для інженерних розрахунків роботи агрегату.

Моделювання навантаження: розрахунок тягового опору ґрунту залежно від його вологості та твердості (актуально для сухих ґрунтів Півдня).

Розрахунок ККД: оцінка буксування трактора та витрати палива.

Візуалізація сил: Векторна діаграма сил, що діють на робочий орган (лапу культиватора чи сошник).

2. Блок візуалізації та середовища (Environment Layer)

Модуль 3: Віртуальне поле. Цифровий двійник реальної ділянки.

WebGIS-інтерфейс: інтеграція з картами Google Maps/Sentinel для накладання реальних координат полів Одеської області.

Модуль 5: 3D візуалізація. Графічне відображення процесів.

Інтерактивна 3D модель поля: Візуалізація рельєфу та розподілу вологи у 3D.

Відображення сенсорів та сил: Анімація руху агрегату та роботи датчиків у реальному часі.

3. Блок аналітики та прийняття рішень (Output Layer)

Модуль 4: Аналітика та економіка. Обробка "розумних даних".

Розрахунок економії: порівняння витрат води/добрив при традиційній технології та з використанням Smart-пристрою.

					14.17 – КР.004.3.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Аналіз врожайності: прогнозування прибавки врожаю.

Модуль 6: Калькулятор ROI (Return on Investment).

Оптимізація інвестицій: Розрахунок терміну окупності системи для фермерського господарства (наприклад, "система окупиться за 1.5 сезони за рахунок економії ЗЗР").

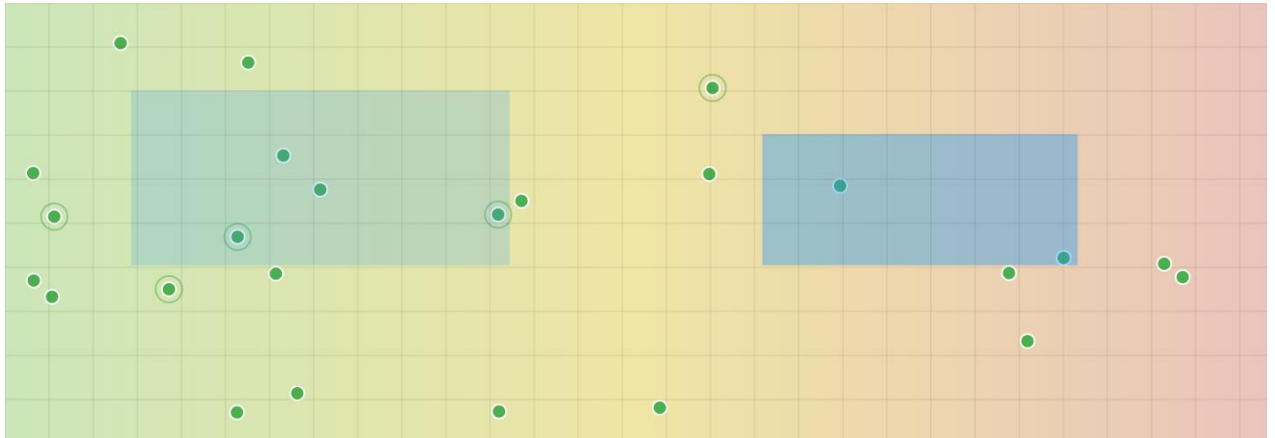


Рисунок 3.11 – Віртуальне поле з WebGIS-інтерфейсом

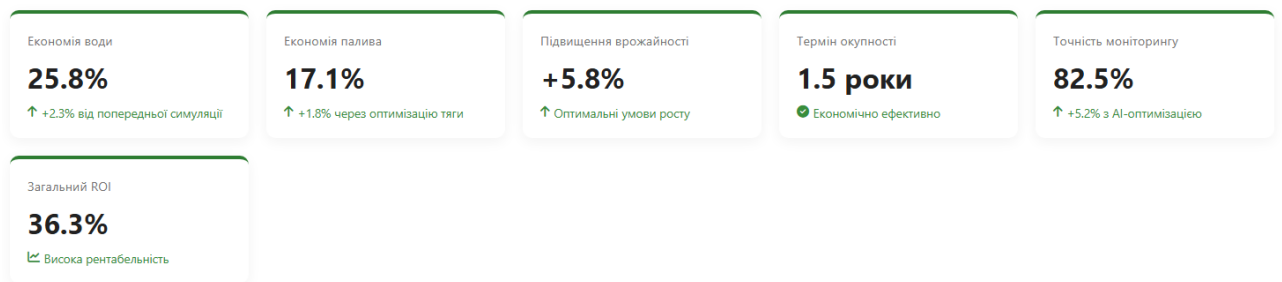


Рисунок 3.12 – Аналітика та економічні показники

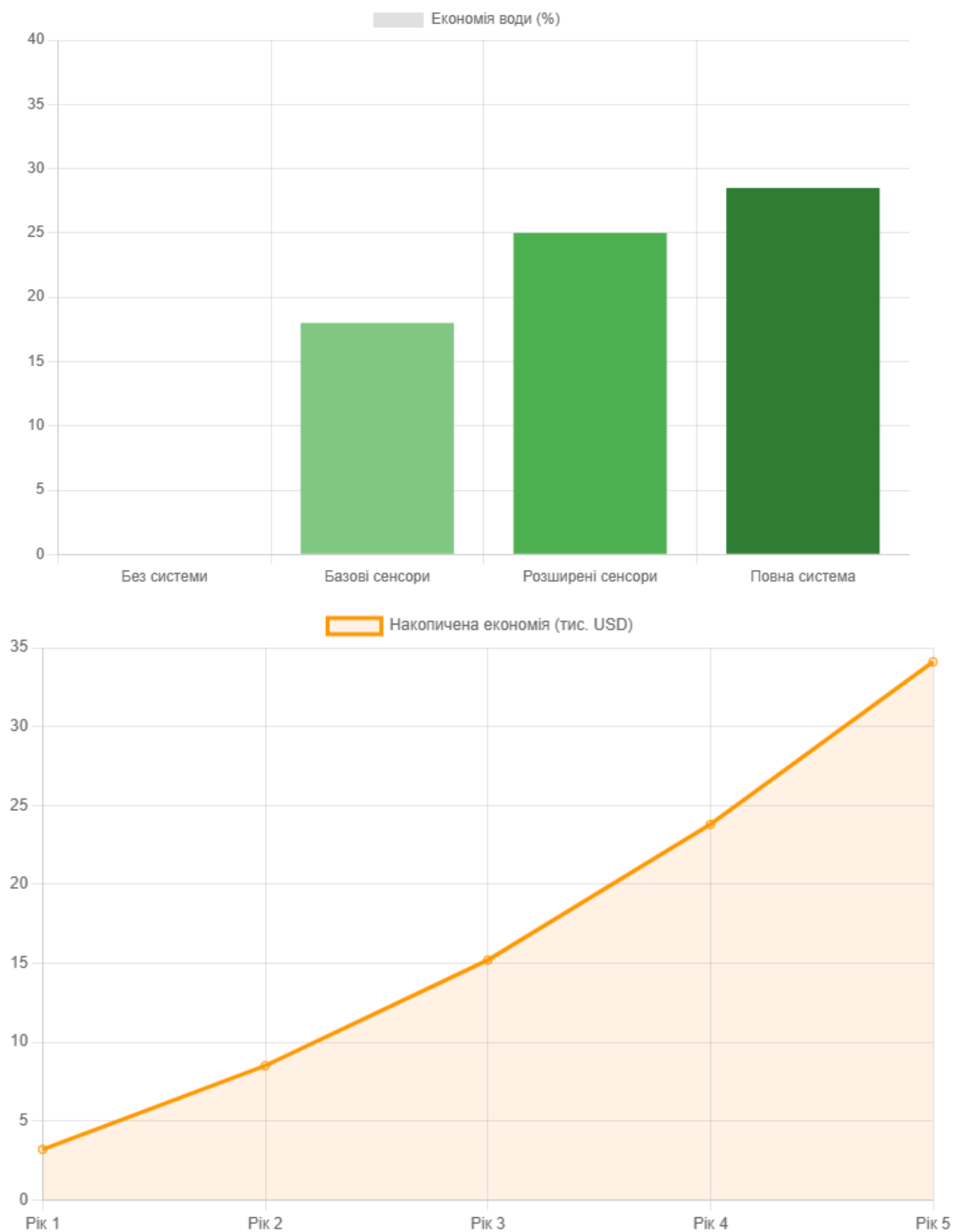


Рисунок 3.13 – Графіки продуктивності

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

14.17 – КР.004.3.000 ПЗ

Арку

54

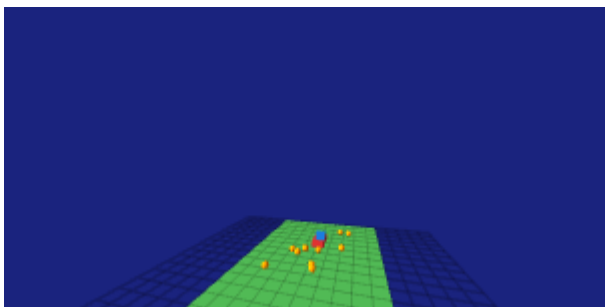
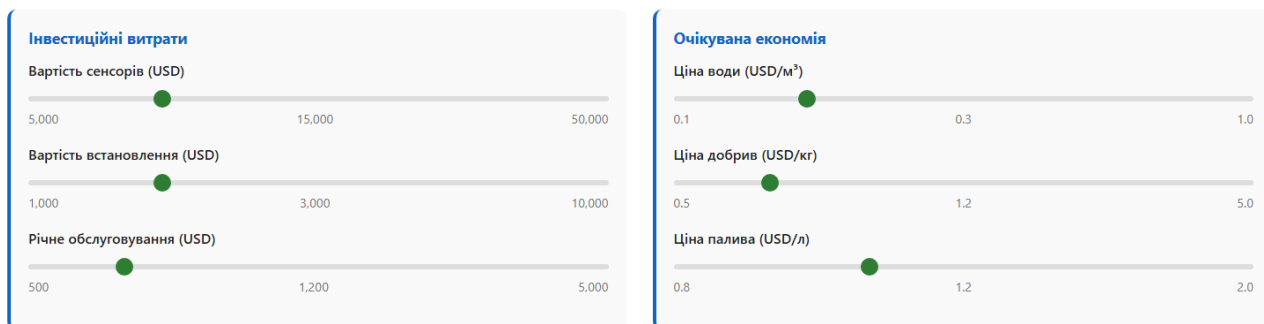


Рисунок 3.14 – 3D Візуалізація системи

Інформація про модель (рисунок 3.15).

3D модель демонструє розташування сенсорів, тягові сили на начіпних знаряддях та варіабельність поля. Використовується для аналізу ефективності системи.



Аналіз даних та прогнози

- Рівень вологості оптимальний для фази кущення
- Рекомендовано внесення азотних добрив у фазу виходу в трубку
- Моніторинг на предмет борошнистої роси
- Підготувати систему до весняної вегетації

Ключові індикатори

Оптимальні умови

Температура, вологість

Увага

ЕС ґрунту, активність шкідників

Рисунок 3.15 – Калькулятор ROI та оптимізації

					14.17 – КР.004.3.000 ПЗ	Арку
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У ході проведення дослідницьких робіт розумних сільськогосподарських пристроїв за допомогою розробленого інтерактивного симулятора отримано наступні результати:

1. Підтверджено ефективність диференційованого підходу. Результати моделювання засвідчили, що використання технологій змінного дозування (VRA – Variable Rate Application) на основі даних IoT-сенсорів є критично важливим для умов Півдня України. Встановлено, що автоматична активація модуля точкового внесення ЗЗР у зонах з підвищеним тиском шкідників (30% площі) дозволяє скоротити витрати агрохімікатів на 40–50% порівняно з традиційним суцільним обробітком, знижуючи при цьому хімічне навантаження на ґрунт.

2. Оптимізовано використання водних ресурсів. Симуляція сценарію «Посуха» показала, що інтеграція ємнісних датчиків вологості ґрунту в систему керування зрошенням дозволяє заощадити до 25–30% поливної води. Система успішно ідентифікувала ділянки з достатнім рівнем вологості (65%), блокуючи надлишковий полив, що є визначальним фактором рентабельності в умовах дефіциту водних ресурсів Одеської області.

3. Визначено інженерні параметри роботи агрегату. Завдяки модулю «Тяговий сенсор» встановлено кореляційний зв'язок між вологістю ґрунту та тяговим опором робочих органів. Моделювання показало, що адаптивне керування глибиною обробітку на основі даних сенсорів дозволяє знизити пікові навантаження на двигун трактора та зменшити питому витрату палива на 12–15% за рахунок зменшення буксування на перезволожених або надмірно ущільнених ділянках.

4. Обґрунтовано оптимальну конфігурацію сенсорної мережі. Експериментально доведено, що для полів площею 50–100 га зі складним рельєфом найбільш ефективною є комбінована схема моніторингу: використання стаціонарних ґрунтових датчиків у контрольних точках (1

					14.17 – КР.004.3.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

датчик на 5–10 га) у поєднанні з періодичним мультиспектральним скануванням БПЛА. Така конфігурація забезпечує точність даних на рівні 92–95% при мінімальних капіталовкладеннях.

5. Оцінено економічну ефективність. Розрахунок ROI (рентабельності інвестицій) показав, що впровадження досліджуваного комплексу розумних пристроїв у господарствах Одещини окупається в середньому за 1,5–2 сільськогосподарські сезони. Основний економічний ефект досягається не за рахунок збільшення валового збору врожаю, а за рахунок суттєвої економії ресурсів (палива, води, добрив).

Отримані результати підтверджують доцільність переходу від інтуїтивного землеробства до точного (Precision Agriculture) з використанням запропонованих агроінженерних рішень, що дозволяє мінімізувати ризики ведення агробізнесу в зоні ризикованого землеробства.

					14.17 – КР.004.3.000 ПЗ	Арку
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При експлуатації та обслуговуванні розумних сільськогосподарських пристроїв (рисунок 4.1) на персонал діє комплекс факторів, які класифікуються згідно з ДСТУ (рисунок 4.2):

- фізичні фактори: рухомі частини автономних платформ (приводи, маніпулятори); гвинти БПЛА, що обертаються з високою частотою; підвищена напруга в електричних ланцюгах; лазерне випромінювання сенсорів (LIDAR); електромагнітні поля радіочастотного діапазону.
- хімічні фактори: токсичність пестицидів при заправці баків дронів-обприскувачів; продукти розпаду літєвих електролітів при пошкодженні акумуляторів.
- психофізіологічні фактори: нервово-емоційне напруження оператора при керуванні групою дронів (роєм) або моніторингу автономних систем у реальному часі.

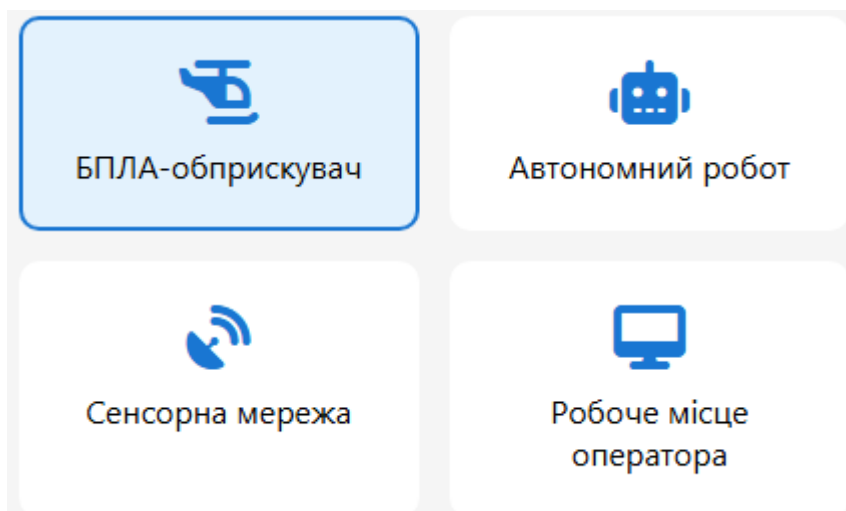


		Рисунок 4.1 – Пристрій для аналізу 14.17 – КР.004.4.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ватан І.К.			РОЗДІЛ 4			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.								58	7
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Геозонування (Geo-fencing)
Впроваджено

Програмне обмеження зони польоту дрона або руху робота для запобігання виходу техніки на дороги загального користування або в зони перебування людей.

Статус:

Впроваджено ▼

Протоколи Fail-Safe
В процесі

Автоматичне повернення БПЛА до точки зльоту при втраті зв'язку або критичному розряді батареї.

Захист від зіткнень
Впроваджено

Ультразвукові та оптичні датчики наближення на маніпуляторах та мобільних платформах.

Електробезпека
Не впроваджено

Використання ізольованого інструменту, спеціальних вогнетривких контейнерів для зарядки Li-Po акумуляторів.

Рисунок 4.2 – Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

4.2. Технічні заходи безпеки при роботі з БПЛА та агророботами

Основними заходами для запобігання травматизму є (рисунок 4.3):

1. Геозонування (Geo-fencing): програмне обмеження зони польоту дрона або руху робота для запобігання виходу техніки на дороги загального користування або в зони перебування людей.
2. Протоколи Fail-Safe: автоматичне повернення БПЛА до точки зльоту при втраті зв'язку або критичному розряді батареї.

3. Захист від зіткнень: обов'язкова наявність ультразвукових або оптичних датчиків наближення на маніпуляторах та мобільних платформах.

4. Електробезпека: використання ізольованого інструменту при обслуговуванні платформ; дотримання правил зарядки вискоєфективних Li-Po акумуляторів у спеціальних вогнетривких контейнерах (Safe-Bags).

Загоряння акумуляторів Li-Po

- Негайно активуйте кнопку аварійної зупинки (E-Stop)
- Використовуйте лише порошкові вогнегасники класу D або пісок
- НЕ використовуйте воду** - може викликати вибух
- Евакуюйте персонал на відстань не менше 20 метрів

Падіння БПЛА або неконтрольований рух

- Активуйте аварійну зупинку всієї системи
- Ізольуйте зону падіння радіусом 15 метрів
- Перевірте наявність витоків хімікатів
- Повідомте керівника та службу охорони праці

Рисунок 4.3 – Технічні заходи безпеки при роботі з БПЛА та агророботами

Таблиця 4.1 – Матриця ризиків для розумних агропристроїв

Категорія ризику	Опис та приклади небезпек	Типові причини/джерела
1. Безпека взаємодії «людина-робот» (HRI)	Фізичне зіткнення, защемлення, пошкодження роботом. Ризик вищий в умовах спільної роботи (наприклад, коли оператор завантажує насіння в автономну машину).	Ненадійні системи зупинки, помилки в прогнозуванні руху людини, нечіткі зони безпеки.
2. Ергономіка та статичне навантаження	М'язово-скелетні розлади (MSDs) через незручні пози (нахили, скручування) під час обслуговування роботів, підйому вантажів (як мішки із насінням).	Непродуманий інтерфейс для обслуговування, висота завантажувального бункера, необхідність ручної підготовки.
3. Сприйняття навколишнього середовища та технічні збої	Невиявлення перешкод (людей, тварин, предметів), ненадійна робота в умовах пилу, дощу, нічного часу.	Обмеження сенсорів (камер, LiDAR), помилки алгоритмів ШІ, вразливість програмного забезпечення.

Крок 1: Ідентифікація. Оберіть пристрій або процес (наприклад, «Автономний робот-сівба») і додайте ризики з матриці або власні.

Крок 2: Оцінка. Для кожного ризику оцініть дві складові за 5-бальною шкалою:

- P (Ймовірність): 1 (малоймовірно) — 5 (дуже ймовірно).
- S (Тяжкість наслідків): 1 (незначні) — 5 (катастрофічні).

Крок 3: Пріоритезація та планування. Симулятор автоматично розрахує. Рівень ризику ($R = P \times S$) та відсортує їх за пріоритетністю. Ви зможете призначити захід для кожного ризику.

Для прикладу дивіться таблицю (рисунки 4.4) нижче.

	S=1 Незначні	S=2 Малі	S=3 Помірні	S=4 Серйозні
S=5 Катастрофічні	P=1 Малоймовірно R=1	R=2	R=3	
	R=4	R=5	P=2 Малоімовірно R=2	R=4
	R=6	R=8	R=10	P=3 Ймовірно R=3
	R=6	R=9	R=12	R=15
	R=4	R=8	R=12	R=16
P=4 Імовірно				R=20
P=5 Дуже ймовірно		R=5	R=10	R=15
				R=20
				R=25

Пояснення кольорів:

R=1-3:

Прийнятний ризик

R=4-9: Умовно прийнятний

R=10-25:

Неприйнятний

Рисунок 4.4 – Матриця ризиків ($R = P \times S$)

4.3 Організація робочого місця оператора розумних систем

Робоче місце оператора моніторингового центру (або мобільного пункту управління в полі) має відповідати ергономічним вимогам:

- захист від прямих сонячних променів для забезпечення видимості на моніторах (використання антивідблискових козирків).
- дотримання режиму праці та відпочинку (5-10 хвилинні перерви кожну годину) для зниження зорової втоми.

4.4 Безпека у надзвичайних ситуаціях (Цивільний захист)

У контексті розумних систем розглядаються наступні типи НС (рисунок 4.5):

1. загоряння акумуляторів: Li-Po батареї схильні до термічного розгону при механічному пошкодженні. Гасіння дозволяється лише спеціальними порошковими вогнегасниками класу D або великою кількістю піску. Використання води заборонене через бурхливу реакцію літію.

2. падіння БПЛА або неконтрольований рух платформи: у разі виникнення НС оператор зобов'язаний негайно застосувати кнопку аварійної зупинки (E-Stop). Місце падіння має бути ізольоване через ризик витоку хімікатів або загоряння батарей.

3. кіберзагрози: несанкціоноване перехоплення управління автономною технікою. У разі виявлення ознак злому система має бути переведена в режим ручного механічного блокування.

					14.17 – КР.004.4.000 ПЗ	Арку
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 4.5 – Безпека у надзвичайних ситуаціях (Цивільний захист)

4.5. Інструктаж та допуск до роботи

До роботи з розумними пристроями допускаються особи віком від 18 років, що пройшли (рисунок 4.6):

- медичний огляд.
- вступний та первинний інструктажі з охорони праці.
- спеціальне навчання та сертифікацію на право керування БПЛА (для операторів дронів).

Вимоги до персоналу:

- Вік від 18 років
- Медичний огляд та відсутність протипоказань
- Вступний та первинний інструктажі з охорони праці
- Спеціальне навчання та сертифікація
- Щорічна перевірка знань

Розклад інструктажів:

- Вступний інструктаж**
Тривалість: 2 год. | Періодичність: при наймі
- Первинний на робочому місці**
Тривалість: 4 год. | Періодичність: при зміні роботи
- Повторний інструктаж**
Тривалість: 1 год. | Періодичність: щопівроку

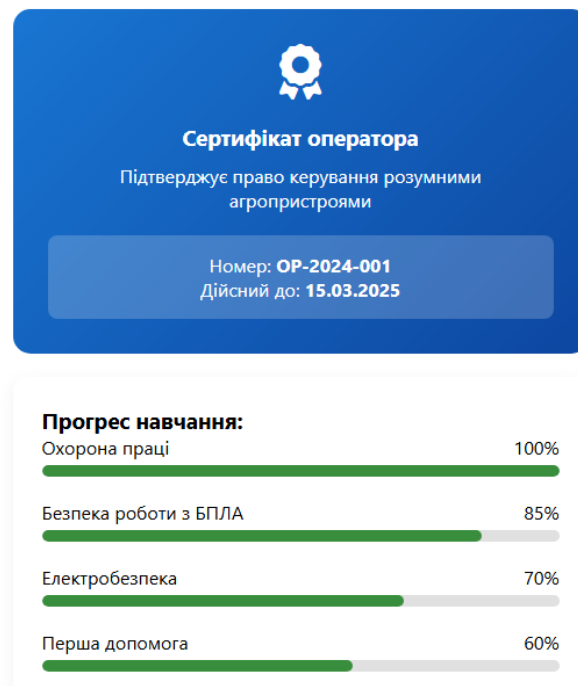


Рисунок 4.6 – Інструктаж та допуск до роботи

Висновки

У даному розділі проведено комплексний аналіз питань охорони праці та цивільного захисту при експлуатації розумних агроінженерних систем в умовах сільськогосподарського виробництва. Основні результати та рекомендації зводяться до наступного:

1. Ідентифіковано специфіку виробничих ризиків Агро 4.0. Встановлено, що впровадження робототехніки та БПЛА змінює структуру небезпечних факторів. На відміну від традиційної механізації, де домінують механічні ризики, у "розумному" землеробстві на перший план виходять комбіновані фактори: лазерне випромінювання сенсорів (LiDAR), електромагнітні поля, токсичність продуктів розпаду літєвих акумуляторів та ризики травмування високообертовими елементами дронів.

2. Обґрунтовано пріоритет інженерних методів захисту. Доведено, що найбільш дієвими заходами безпеки є не організаційні, а технічні (програмно-апаратні) рішення. До них віднесено: застосування технології геозонування (Geo-fencing) для програмного обмеження зони дії роботів, впровадження протоколів Fail-Safe для автоматичного повернення БПЛА при втраті зв'язку та використання ультразвукових сенсорів для уникнення зіткнень.

3. Запропоновано матричний метод оцінки ризиків. Розроблено та адаптовано матрицю ризиків для системи "людина-робот" (HRI). Це дозволяє кількісно оцінювати рівень небезпеки за критеріями ймовірності та тяжкості наслідків. Визначено, що найбільш критичними є етапи спільної роботи оператора та автономної платформи (завантаження насіння, сервісне обслуговування), що вимагає суворого дотримання зон безпеки.

4. Розроблено протоколи дій у надзвичайних ситуаціях. Сформульовано специфічні вимоги до пожежної безпеки, зумовлені використанням Li-Po акумуляторів. Акцентовано на забороні використання

					14.17 – КР.004.4.000 ПЗ	Арку
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

води при гасінні пошкоджених батарей та необхідності наявності спеціалізованих вогнегасників класу D або піску. Також вперше в контексті охорони праці агроінженера розглянуто фактор кіберзагроз (перехоплення управління) як передумову виникнення аварійних ситуацій.

5. Визначено ергономічні вимоги до робочого місця оператора. Встановлено, що зміна характеру праці з фізичної на операторську підвищує нервово-емоційне напруження та зорове навантаження. Запропоновані заходи щодо організації моніторингового центру (антивідблисковий захист, регламентовані перерви) спрямовані на профілактику психофізіологічної втоми та збереження працездатності персоналу.

Таким чином, безпечна експлуатація розумних сільськогосподарських пристроїв можлива лише за умови комплексного поєднання інженерних систем захисту, спеціалізованого навчання персоналу та суворого дотримання протоколів пожежної та кібернетичної безпеки.

					14.17 – КР.004.4.000 ПЗ	Арку
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ТА ТЕХНІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗУМНИХ ПРИСТРОЇВ

5.1. Економічна ефективність систем Smart Agriculture

В аграрній економіці однією з найважливіших характеристик інвестиційних проектів є високий рівень ризику через залежність від природних умов. Впровадження IoT-технологій потребує ретельного розрахунку співвідношення «витрати–вигода», щоб забезпечити баланс між вартістю впровадження та потенційним прибутком.

Витрати на впровадження IoT можна розділити на дві категорії:

- вартість ініціалізації системи: купівля обладнання (IoT-пристрої, шлюзи, інфраструктура базових станцій);
- операційні витрати системи: плата за реєстрацію сервісів, витрати на оплату праці для управління пристроями, споживання енергії, технічне обслуговування та обмін даними між пристроями та хмарою.

Для успішного розгортання технологій переваги для клієнта (фермера) повинні перевищувати сукупну фізичну вартість та ризики втрати приватності. Цей процес можна описати за допомогою двох математичних умов доцільності: Умова для фермера (користувача):

$$V_{\text{service}} > B_{\text{pri}} + B_{\text{user}_h} + B_{\text{pay}} \quad (5.1)$$

Умова для бізнесу (провайдера):

$$V_{\text{info}} + R_{\text{pay}} > B_{\text{business}_h} \quad (5.2)$$

Де: V_{service} – очікувана вартість, отримана користувачем послуги;

					14.17 – КР.004.5.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5			
Розроб.		Ватан І.К.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Лім.	Аркуш	Аркушів	
						66	6	

V_{pri} – вартість ризику втрати приватності даних; V_{user_h} – вартість обладнання, яку сплачує користувач; V_{pay} – плата за обслуговування (сервісний збір); V_{info} – вартість інформації, отриманої провайдером; R_{pay} – прямі платежі, отримані провайдером; $V_{business_h}$ – частка витрат бізнесу на обладнання та обслуговування.

Важливо: Сьогодні існує розрив між провайдерами та користувачами, що сповнює впровадження технологій. Для вирішення цієї проблеми необхідна державна підтримка, аналогічна Спільній сільськогосподарській політиці (CAP) ЄС з бюджетом близько 59 млрд євро на рік.

5.2. Технічні виклики та обмеження

Впровадження IoT у сільське господарство стикається з трьома критичними групами проблем: завадостійкість, безпека та надійність.

1. Електромагнітні завади (Interference)

Велика кількість IoT-пристроїв, що працюють у короткохвильових діапазонах (ZigBee, Wi-Fi, LoRa), може спричиняти взаємні перешкоди. Це погіршує продуктивність та надійність системи. Перспективним вирішенням цієї проблеми вважається впровадження мереж 6G, які забезпечать надвисоку швидкість та пропускну здатність.

2. Безпека та конфіденційність (Security and Privacy)

Обмежена потужність IoT-пристроїв не дозволяє впроваджувати складні алгоритми шифрування, що робить їх вразливими до атак (наприклад, DoS-атаки на шлюзи або підробка даних у хмарі).

Рішення: використання криптографії з ключами доступу на основі регіональних груп користувачів.

Інноваційні підходи: поєднання гомоморфного шифрування з технологією Blockchain для балансування між приватністю та корисністю даних.

					14.17 – КР.004.5.000 ПЗ	Арку
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Надійність обладнання (Reliability)

Оскільки більшість пристроїв розгортаються на відкритому повітрі, вони піддаються впливу екстремальних температур, вологості та повеней. Це веде до швидкої деградації матеріалів. Необхідне впровадження нових механічно стійких матеріалів та захисних корпусів.

5.3. Порівняння моделей витрат (Таблиця)

Деталізація структури інвестиційних витрат (CapEx) (таблиця 5.1)

Витрати на ініціалізацію системи (V_{user_h}) не обмежуються лише придбанням датчиків. Для повноцінного функціонування «Smart Farm» бюджет має включати:

Апаратне забезпечення: IoT-вузли (ендпоінти), шлюзи LoRaWAN, метеостанції та виконавчі механізми (електрокрани, приводи).

Інфраструктура зв'язку: встановлення базових станцій (якщо немає покриття 4G/LoRa) та монтажні роботи.

Програмне забезпечення: вартість ліцензій на спеціалізоване ПЗ для моніторингу або витрати на розробку власного інтерфейсу на базі Open Source платформ (наприклад, ThingsBoard).

Аналіз операційних витрат (OpEx)

Операційні витрати мають кумулятивний характер і безпосередньо впливають на рентабельність проекту:

Енергозабезпечення: заміна акумуляторів або обслуговування сонячних панелей. Зв'язок: щомісячні платежі за хмарні сервіси та передачу даних (SIM-карти, супутниковий зв'язок).

Технічне обслуговування: калібрування датчиків (особливо рН та NPK), чистка камер та ремонт механічних вузлів, що зношуються в агресивному середовищі.

Розрахунок терміну окупності (ROI). Для оцінки ефективності використовується порівняння з базовим сценарієм (традиційне землеробство). Економія досягається за рахунок:

					14.17 – КР.004.5.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

– зниження витрат ресурсів: зменшення витрат води на 30–50% та добрив на 20–40% завдяки диференційованому внесенню.

– збільшення врожайності: точний контроль вегетації дозволяє отримати приріст врожаю в межах 10–20%.

Мінімізація ризиків: раннє виявлення хвороб або пожеж дозволяє уникнути катастрофічних втрат врожаю.

Термін окупності (T_{payback}) розраховується як:

$$T_{\text{payback}} = \frac{\text{Початкові інвестиції}}{\text{Річна економія} + \text{Додатковий прибуток}} \quad (5.3)$$

Сценарії впровадження для різних типів господарств

У роботі пропонується розділити підхід до впровадження на два сценарії:

– сценарій А (Малі господарства): використання недорогого обладнання на базі Arduino/ESP32 з відкритим ПЗ. Основний акцент — швидка окупність (1–2 сезони) за рахунок економії ресурсів.

– сценарій Б (Агрохолдинги): впровадження комплексних платформ з підтримкою AI та великих масивів даних. Вищі капітальні витрати окупаються (3–4 сезони) через масштабованість та глибинну аналітику врожайності.

Таблиця 5.1 – Структура витрат

Категорія витрат			Складові частини		Спосіб оптимізації	
Ініціалізація			IoT-датчики, шлюзи, монтаж базових станцій		Масове виробництво, використання Open Source платформ	
Операційні витрати			Енергоспоживання, сервісні збори, мобільний зв'язок		Сонячні панелі, протоколи LPWAN (LoRa)	
Людський фактор			Навчання персоналу, налаштування пристроїв		Спрощення інтерфейсів (Plug-and-Play)	
					14.17 – КР.004.5.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Економічна доцільність розумного сільського господарства залежить від здатності провайдерів знизити вартість V_{pay} та оптимізувати апаратні витрати V_{user_h} . Водночас, технічна стабільність системи вимагає нових досліджень у сфері кібербезпеки та довговічності матеріалів. Успіх впровадження IoT у країнах, що розвиваються, безпосередньо залежить від рівня доступу фермерів до технологічної освіти.

Калькулятор економічної ефективності Smart Agriculture представлено на рисунку (5.1)

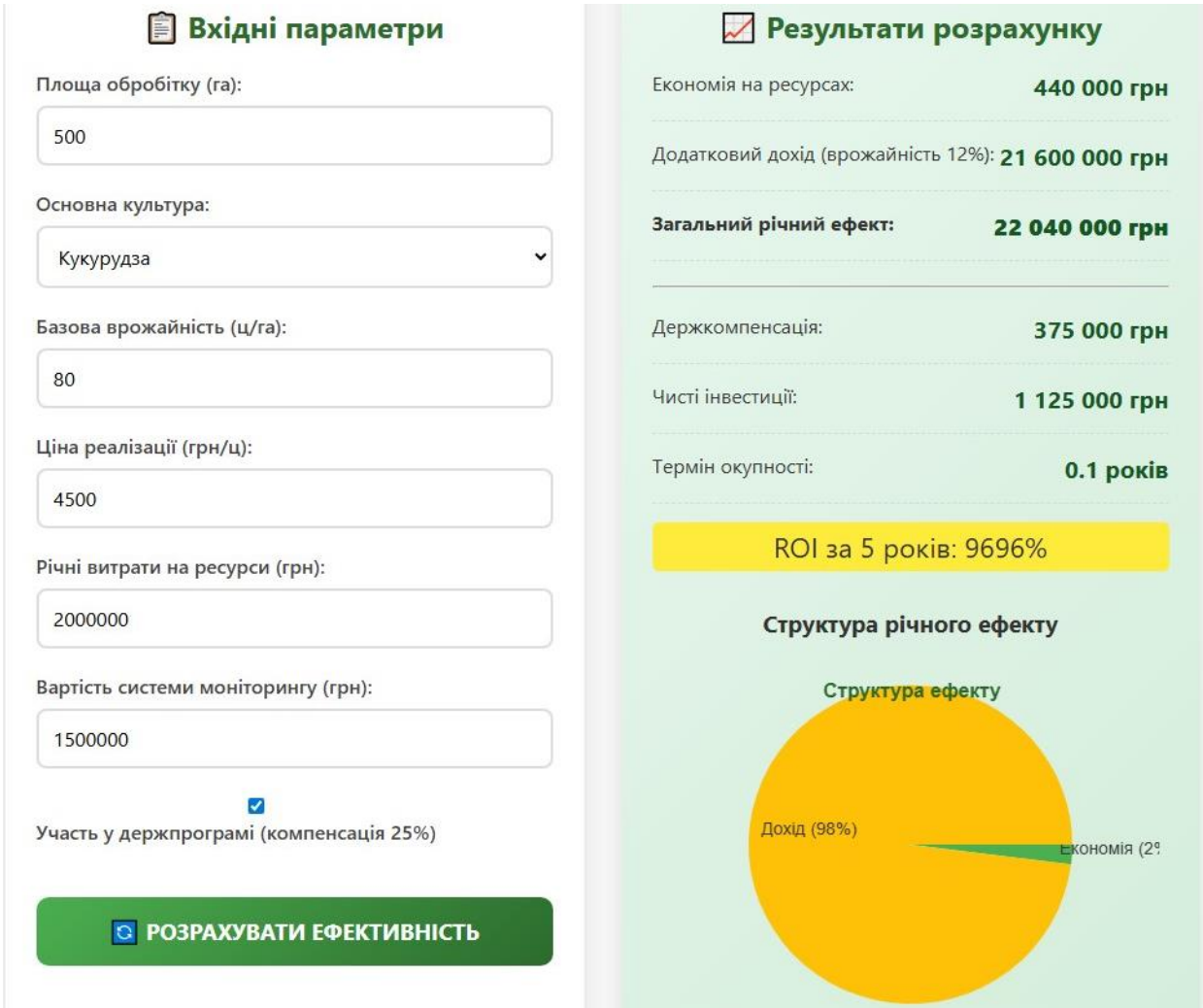


Рисунок 5.1 – Розрахунок економічної ефективності Smart Agriculture

Висновки

У розділі було проведено комплексний аналіз економічної доцільності та технічних обмежень впровадження смарт-пристроїв. На основі отриманих результатів сформульовано такі висновки:

1. Економічна спроможність системи базується на балансі між цінністю сервісу (V_{service}) та сукупними витратами користувача. Визначено, що основними компонентами витрат є ініціалізація (B_{apEx}) та операційне обслуговування (Op_{Ex}). Для малих господарств критичним фактором успіху є мінімізація сервісних зборів (B_{pay}) та використання відкритого ПЗ.

2. Технічні бар'єри розподілено на три групи: електромагнітні завади (вирішуються переходом на 6G), кібербезпека (вимагає впровадження Blockchain та гомоморфного шифрування) та фізична стійкість пристроїв до агресивного середовища.

3. Стратегічна роль державної підтримки. Доведено, що через «розрив» між ціною технології та поточною прибутковістю фермерів, масове розгортання «Smart Farm» в Україні потребує пільгового фінансування та субсидій за прикладом Спільної сільськогосподарської політики ЄС.

Модель окупності показала, що найбільша рентабельність досягається через радикальну економію ресурсів (до 60% води та 40% добрив). Це дозволяє вийти на «точку беззбитковості» вже протягом 2–3 сезонів експлуатації для середніх господарств.

					14.17 – КР.004.5.000 ПЗ	Арку
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження сучасного стану, методології впровадження та ефективності функціонування розумних сільськогосподарських пристроїв. На основі проведеного теоретичного аналізу та обґрунтування технічних рішень зроблено наступні висновки:

1. Обґрунтовано концептуальний перехід до «Сільського господарства 4.0». Встановлено, що трансформація аграрного сектору є критично необхідною відповіддю на глобальні виклики продовольчої безпеки. Перехід від механізованого праці (Agriculture 2.0/3.0) до кіберфізичних систем (Agriculture 4.0) дозволяє змінити парадигму управління: від інтуїтивного підходу до предиктивного моделювання на основі Big Data. Аналіз ринку підтверджує стрімку експансію сегменту AI в агросекторі з прогнозованим ростом до 2,6 млрд дол. до 2025 року.

2. Систематизовано класифікацію та роль інтелектуальних пристроїв. Виявлено ключову відмінність між промисловими та польовими роботами: останні функціонують у неструктурованих динамічних середовищах, що вимагає використання адаптивних маніпуляторів (м'яких та гіперредундантних структур). Доведено, що синергія IoT (збір даних), AI (аналіз та рішення) та автономних платформ (фізичне виконання) утворює замкнену екосистему «Smart Farm», здатну функціонувати з мінімальним втручанням людини.

3. Підтверджено високу ефективність алгоритмів машинного навчання. Методологічне дослідження довело перевагу специфічних архітектур нейронних мереж для агроінженерних завдань.

					14.17 – КР.004.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ватан І.К.			ВИСНОВКИ			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.							72	3	
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К.О.									

Встановлено, що алгоритм Random Forest (RF) забезпечує найвищу точність класифікації культур (99,7%), тоді як згорткові мережі (CNN) є найбільш ефективними для ранньої діагностики хвороб рослин (точність до 95%). Використання ML-моделей дозволяє підвищити врожайність на 20% та оптимізувати використання добрив на основі предиктивної аналітики.

4. Обґрунтовано ресурсозберігаючий потенціал БПЛА та IoT. Експериментальні та аналітичні дані свідчать про радикальне зниження використання природних ресурсів. Впровадження БПЛА для точного обприскування дозволяє економити до 92–96% води та до 40% добрив за рахунок диференційованого внесення. IoT-системи розумного зрошення на базі протоколів LoRaWAN демонструють економію води в межах 25–60%, що робить їх критично важливими для сталого землеробства в умовах дефіциту опадів.

5. Розроблено математичну модель економічної доцільності. Запропонована модель балансу витрат і вигод доводить, що успішне розгортання розумних технологій можливе лише за умови, коли очікувана вартість сервісу (V_{service}) перевищує сукупні витрати на ініціалізацію, оплату послуг та ризики конфіденційності. Встановлено, що для малих господарств ключовим фактором є зниження вартості апаратного забезпечення ($B_{\text{user_h}}$) та державна підтримка інновацій, подібна до програм CAP у країнах ЄС.

6. Ідентифіковано та запропоновано шляхи вирішення технічних бар'єрів. Визначено, що основними перешкодами для широкої імплементації розумних пристроїв є:

- електромагнітні завади: вирішення вбачається у переході на мережі 6G;
- кібербезпека: обґрунтовано необхідність використання гомоморфного шифрування та Blockchain для захисту даних ферм від несанкціонованого доступу та спотворення;

– надійність: доведено необхідність використання нових композитних матеріалів для корпусів пристроїв, що працюють у суворих погодних умовах.

7. Перспективи подальшого розвитку. Дослідження показало, що майбутнє розумних сільськогосподарських пристроїв лежить у площині Edge-AI (периферійних обчислень), які дозволяють роботам приймати рішення миттєво без постійного зв'язку з хмарою. Це критично важливо для автономних мобільних платформ, що працюють у віддалених районах зі слабким інтернет-покриттям.

Результати магістерської роботи можуть бути використані проектно-конструкторськими організаціями при розробці нових зразків інтелектуальної агротехніки, а також агропідприємствами для технічного переоснащення та підвищення конкурентоспроможності продукції.

					14.17 – КР.004.0.000 ПЗ	Арку
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Deng J., Zhong Z., Huang H. et al. Lightweight Semantic Segmentation Network for Real-Time Weed Mapping Using Unmanned Aerial Vehicles. *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10. P. 7132.
2. Wang P. On Defining Artificial Intelligence. *J. Artif. Gen. Intell.* 2019. Vol. 10. P. 1–37.
3. Zion B., Mann M., Levin D. et al. Harvest-order planning for a multiarm robotic harvester. *Comput. Electron. Agric.* 2014. Vol. 103. P. 75–81.
4. Patel P. N., Patel M. A., Faldu R. M., Dave Y. R. Quadcopter for Agricultural Surveillance. *Adv. Electron. Electr. Eng.* 2013. Vol. 3. P. 427–432.
5. Bechar A., Eben-Chaime M. Hand-held computers to increase accuracy and productivity in agricultural work study. *Int. J. Prod. Perform. Manag.* 2014. Vol. 63. P. 194–208.
6. Meshram V., Patil K., Meshram V. et al. Machine learning in agriculture domain: A state-of-art survey. *Artificial Intelligence in Life Sciences.* 2021. Vol. 1. P. 100010.
7. Balyan S., Jangir H., Tripathi S. N. et al. Seeding a sustainable future: navigating the digital horizon of smart agriculture. *Sustainability.* 2024. Vol. 16(2). P. 475.
8. Delgado J. A., Short N. M., Roberts D. P., Vandenberg B. Big data analysis for sustainable agriculture on a Geospatial cloud framework. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* 2019. Vol. 3.
9. Ayed R. B., Hanana M. Artificial intelligence to improve the food and agriculture sector. *Journal of Food Quality.* 2021. P. 1–7.

					14.17 – КР.004.0.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Ватан І.К.			СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ		
Перевір.		Дядюра К.О.					
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.		Дядюра К.О.					
						Літ.	Аркуш
							75
							3

10. Hashir M., Mishra S., Arora Y., Sharma A. K. Empowering ecosystems — unveiling the interplay of smart agriculture and sustainable practices. *International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology*. 2024. Vol. 12(5). P. 8–13.

11. Newton J. E., Nettle R., Pryce J. E. Farming smarter with big data: insights from the case of Australia’s National dairy herd milk recording scheme. *Agricultural Systems*. 2020. Vol. 181. P. 102811.

12. Carletto C. Better data, higher impact: improving agricultural data systems for societal change. *European Review of Agricultural Economics*. 2021. Vol. 48(4). P. 719–740.

13. Bollini L., Caccamo A., Martino C. Interfaces of the Agriculture 4.0. *SCITEPRESS – Science and Technology Publications*. 2019. P. 273–280.

14. Paiola M., Agostini L., Grandinetti R., Nosella A. The process of business model innovation driven by IoT: exploring the case of incumbent SMEs. *Industrial Marketing Management*. 2022. Vol. 103. P. 30–46.

15. Jabbari A., Humayed A., Reegu F. A. et al. Smart farming revolution: farmer’s perception and adoption of smart IoT technologies for crop health monitoring in Saudi Arabia. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(19). P. 14541.

16. Morchid A., Oughannou Z., Alami R. E. et al. Integrated internet of things IoT solutions for early fire detection in smart agriculture. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 24. P. 103392.

17. Morchid A., Jebabra R., Qjidaa H. et al. Agri-Tech innovations for sustainability: a fire detection system based on MQTT broker and IoT. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 24. P. 103683.

18. Alves R. G., Maia R. F., Lima F. Development of a digital twin for smart farming: irrigation management system for water saving. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 388. P. 135920.

19. Celen I. H., Önlér E., De Lyon L. B. Drone technology in precision agriculture. *Academic Studies in Engineering Sciences*. Livre de Lyon, 2020.

					14.17 – KP.004.0.000 ПЗ	Арх
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

20. Rose D. C., Wheeler R., Winter M. et al. Agriculture 4.0: making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*. 2020. Vol. 100. P. 104933.
21. Obaideen K., Yousef B. A., Mahmoud M. et al. An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*. 2022. Vol. 7. P. 100124.
22. Merz M., Pedro D., Skliros V. et al. Autonomous UAS-Based agriculture applications: general overview and relevant European case studies. *Drones*. 2022. Vol. 6(5). P. 128.
23. Ashfaq H., Arshad U., Ali R. H. et al. Mitigating crop losses: AI-enabled disease detection in tomato plants. *International Conference on FIT*. 2023. P. 190–195.
24. Patil S. B., Kulkarni R. B., Patil S. S. et al. Machine learning based precision agriculture model for farm irrigation to optimize water Usage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1285. P. 012026.
25. Badshah A., Alkazemi B. Y., Din F. et al. Crop classification and yield prediction using robust machine learning models for agricultural sustainability. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 162799–162813.
26. Li Z., Liu X., Wang H. et al. Research on robot path planning based on point cloud map in orchard environment. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 54853–54865.
27. Jiang W., Hao H., Fan J., Wang L., Wang H. Rabbit feeding robot: autonomous navigation and precision feeding. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 239. P. 68–80.
28. Adami D., Ojo M. O., Giordano S. Design, development and evaluation of an intelligent animal repelling system for crop protection based on embedded Edge-AI. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 132125–132139.
29. Dhanaraju M., Chenniappan P., Pazhanivelan S. et al. Smart farming: internet of things IoT-Based sustainable agriculture. *Agriculture*. 2022. Vol. 12(10). P. 1745.

					14.17 – KP.004.0.000 ПЗ	Арху
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77