

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 НАЗЕМНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПОСІВІВ ТА ҐРУНТУ, А ТАКОЖ ЗБОРУ ДАНИХ НА ФЕРМАХ З ВИРОЩУВАННЯ ПЕРЦЮ ЧИЛІ

Науковий керівник: професор, д.т.н.

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: головний інженер, к.т.н.

_____ Віктор ДРОЗД

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

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

_____ Юрій РЕМНЄВ

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**

Юрій РЕМНЄВ

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Дослідження наземної роботизованої системи для моніторингу посівів та ґрунту, а також збору даних на фермах з вирощування перцю чилі»
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 17.12.2025.

3. **Об'єкт дослідження:** процеси автоматизованого збору агротехнічних даних (вологість ґрунту, температура, візуальна оцінка стану рослин) у польових умовах за допомогою мобільних маніпуляційних роботів.

4. **Предмет дослідження:** методи та засоби інтеграції 6-ступеневого маніпулятора (6-DOF) з мобільною колісною платформою для виконання контактних вимірювань ґрунту та безконтактного фенотипування перцю.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ:

1. Провести огляд методів "розумного" занурення датчиків у ґрунт (smart soil insertion) за допомогою роботизованих рук. 2. Проаналізувати особливості вирощування перцю чилі (сорт, ширина міжрядь, специфіка ґрунтів) як середовища для навігації робота. 3. Обґрунтувати вибір сенсорного забезпечення для навігації та моніторингу (RGB-D камери, ультразвукові датчики, контактні зонди).

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ:

1. Розробити алгоритм вирівнювання енд-ефектора (робочого органу) відносно поверхні ґрунту з використанням даних RGB-D камери та фоторезистора. 2. Провести кінематичний аналіз 6-ступеневого маніпулятора для визначення робочої зони при заборі проб ґрунту в міжрядді. 3. Дослідити вплив нерівностей рельєфу на точність позиціювання інструменту.

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ:

Спроекувати конструкцію енд-ефектора, що поєднує камеру, датчик вологості, LED-підсвітку та ультразвуковий датчик відстані. Розробити програмну логіку автономної роботи. Розрахувати часові витрати на один цикл вимірювання (target: ~13 с на занурення, ~78 с на повний цикл точки).

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

Схеми існуючих рішень для контактного аналізу ґрунту. Таблиця агротехнічних вимог до вирощування перцю (ширина міжрядь, висота рослин, критичні показники вологості).

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

1. Структурна схема архітектури програмного забезпечення в середовищі ROS (Graph of Nodes). 2. Кінематична схема маніпулятора з позначенням систем координат (frames). 3. Блок-схема алгоритму автономної роботи.

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

3D-модель загального компонування робота (Rover + Arm + Sensors). Діаграми порівняння часу виконання операцій (Human vs Robot) на основі даних. Карти розподілу вологості ґрунту, побудовані на основі зібраних роботом даних (візуалізація результатів).

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

Мобільна база: 4-колісна платформа з диференціальним керуванням (напр., SuperDroid Robots). Вимоги до прохідності: робота на піщано-суглинистих ґрунтах. Маніпулятор: кількість ступенів вільності: 6 DOF (для гнучкого позиціювання). Вантажопідйомність: достатня для утримання сенсорного блоку (<1 кг). Точність позиціювання: $\pm 1-2$ см. Сенсорне забезпечення (Payload): камера: RGB-D (Intel RealSense D435i) – для навігації та оцінки стану рослин. Датчик ґрунту: ємнісний датчик вологості та температури (аналоговий/цифровий). Додатково: ультразвуковий датчик (для запобігання зіткненню з землею), GPS модуль. Параметри робочого циклу (KPI): час на одну точку вимірювання (стаціонарно): близько 13 секунд на занурення/вимірювання. Повний цикл обробки однієї рослини (під'їзд + вимірювання): ~70-80 секунд. Кількість рослин у тестовій вибірці: 10-15 кущів.

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

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)	15.07. 25.	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	29.07.25	0,5	
4.	Написання першого (теоретикометодичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	18.08. 25.	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	11.09.2025	1,0	
6.	Написання другого (дослідницькоаналітичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	01.10.2025	2,0	
7.	Написання третього (проектно-розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	11.11.2025	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	21.11.2025	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) науковим керівником	27.11.2025		

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	07.12.2025	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	10.12.2025	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на кафедру	11.12.2025		
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)	19.12.2025	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС «Магістр»

_____ Юрій РЕМНЄВ

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Анатолій ЯКОВЕНКО

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: складається з 81 сторінок, 5 розділів, 26 рисунків, 18 таблиць, 24 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: Процеси автоматизованого збору агротехнічних даних (вологість ґрунту, температура, фенотипові параметри рослин) у польових умовах із використанням мобільних робототехнічних комплексів.

Предмет дослідження: Методи та алгоритми керування наземною мобільною платформою, оснащеною 6-ступеневим маніпулятором, для контактного та безконтактного моніторингу посівів перцю.

Мета роботи: Підвищення ефективності та інформативності моніторингу стану ґрунту та рослин на фермах з вирощування перцю шляхом розробки та дослідження автономної наземної роботизованої системи.

Методи дослідження: У роботі використано методи системного аналізу (для огляду існуючих рішень), математичного моделювання (для розрахунку кінематики маніпулятора та динаміки платформи), комп'ютерного зору (для обробки даних з RGB-D камер), натурного експерименту (для валідації роботи системи в польових умовах) та методи математичної статистики (для обробки експериментальних даних).

Удосконалено метод автоматизованого вимірювання параметрів ґрунту (вологість, температура) за допомогою інтеграції 6-осьового маніпулятора та алгоритму «розумного занурення» (Smart Insertion), який, на відміну від існуючих жорстких систем, адаптує кут нахилу щупа перпендикулярно до нерівностей рельєфу.

Ключові слова: АГРОРОБОТ, МОНІТОРИНГ ҐРУНТУ, ПЕРЕЦЬ, МАНІПУЛЯТОР, ROS, КОМП'ЮТЕРНЕ БАЧЕННЯ, ТОЧНЕ

ЗЕМЛЕРОБСТВО, RGB-D КАМЕРА.

14.17 - КР.017.0.000 ПЗ

					РЕФЕРАТ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ремнев Ю.В.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
							6	куш
					В			

ЗМІСТ

	С
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМАТИКИ РОБОТИЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ В ОВОЧІВНИЦТВІ.....	12
1.1 Значення точного землеробства для вирощування перцю та інших просапних культур.....	12
1.2 Огляд існуючих наземних роботизованих платформ (UGV) для агромоніторингу.....	15
1.3 Аналіз методів вимірювання параметрів ґрунту: ручні, стаціонарні та мобільні засоби.....	24
1.4 Проблематика контактного зондування ґрунту в польових умовах: вплив рельєфу та навігації.....	25
Висновки.....	27
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	29
2.1 Математичне моделювання прямої кінематики мобільного маніпулятора.....	29
2.2 Програмна архітектура системи керування (ROS Integration)	30
2.3 Розробка конструкції робочого органу та сенсорне забезпечення...	32
2.4 Алгоритмічна реалізація автоматизованого збору даних.....	39
Висновки.....	44
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ....	46
3.1 Польові випробування.....	46
3.2 Захоплення зображень з урахуванням екологічних факторів.....	50
3.3 Екологічно свідоме автономне внесення ґрунту.....	55
Висновки.....	58

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ремнев Ю.В.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

ЗМІСТ

В

СИТУАЦІЯХ.....	
4.1. Аналіз небезпечних факторів при експлуатації мобільних агророботів.....	60
4.2 Заходи електробезпеки при роботі з автономними системами живлення.....	61
4.3 Ергономічні вимоги до організації дистанційного робочого місця оператора.....	63
4.4 Пожежна безпека при польових роботах.....	64
Висновки.....	65
РОЗДІЛ 5 СТАРТАП-ПРОЄКТ: СИСТЕМА АВТОНОМНОГО МОНІТОРИНГУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР.....	67
5.1 Маркетинговий аналіз ринку агроробототехніки.....	67
5.2 Розробка бізнес-моделі комерціалізації системи моніторингу.....	69
5.3. Розрахунок собівартості розробки прототипу та терміну окупності	71
Висновки.....	75
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку аграрного виробництва характеризується переходом до концепції «Сільське господарство 4.0», де ключову роль відіграють автоматизація, роботизація та точне землеробство. Вирощування овочевих культур, зокрема перцю, вимагає ретельного дотримання агротехнічних вимог щодо вологості ґрунту та моніторингу стану рослин. Традиційні методи скаутингу (обстеження) полів, що ґрунтуються на ручній праці, стають економічно неефективними через високу трудомісткість, суб'єктивність оцінювання та дефіцит кваліфікованих кадрів.

Існуючі засоби механізації переважно орієнтовані на виконання важких операцій (обробіток ґрунту, збирання врожаю), тоді як операції діагностики та локального моніторингу залишаються слабо механізованими. Використання БПЛА (дронів) дозволяє отримати загальну картину поля, але не дає можливості виконати точні контактні вимірювання параметрів кореневого шару ґрунту під кроною рослин.

У зв'язку з цим, розробка наземних мобільних роботизованих платформ, здатних автономно пересуватися у міжряддях та виконувати контактне зондування ґрунту маніпуляційними системами, є актуальним науково-технічним завданням агроінженерії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська робота виконана відповідно до напряму наукових досліджень кафедри агроінженерії щодо розробки засобів малої механізації та роботизованих систем для овочівництва.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ремнев Ю.В.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Конкр.								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.		Аркуш	Аркушів
							9	кзп
							В	Арку
								ш 8

ефективності моніторингу посівів перцю шляхом обґрунтування параметрів та розробки наземної роботизованої системи для контактного вимірювання властивостей ґрунту та візуальної оцінки рослин.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

1. Проаналізувати стан питання та існуючі технічні засоби для моніторингу ґрунту і посівів в умовах відкритого ґрунту.
2. Обґрунтувати конструктивно-технологічну схему мобільного робота та його робочих органів (маніпулятора і сенсорного блоку).
3. Розробити математичну модель руху маніпуляційної системи для забезпечення перпендикулярного занурення вимірювальних щупів у ґрунт на нерівному рельєфі.
4. Провести експериментальні дослідження працездатності розробленої системи в польових умовах та оцінити точність вимірювання агротехнічних параметрів.
5. Виконати техніко-економічне оцінювання впровадження роботизованого комплексу.

Об'єкт дослідження – технологічний процес автоматизованого моніторингу параметрів ґрунту та стану рослин перцю.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії робочих органів мобільної роботизованої системи з ґрунтовим середовищем та алгоритми керування маніпулятором при виконанні вимірювальних операцій.

Методи дослідження. У роботі застосовано:

- *аналітичні методи* – при огляді літературних джерел та патентному пошуку;
- *методи теоретичної механіки та теорії механізмів і машин* – для кінематичного аналізу маніпулятора та динаміки мобільної платформи;
- *методи 3D-моделювання (CAD)* – при розробці конструкції вузлів робота;

					14.17 - КР.2025 02 20.001.ПЗ	Арку
						ш 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *експериментальні методи* – для визначення похибок вимірювань та часових характеристик робочого циклу в польових умовах.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Дістало подальшого розвитку обґрунтування параметрів робочих органів агророботів для просапних культур, що відрізняється поєднанням оптичних (RGB-D камера) та контактних (щуп) засобів контролю на єдиному рухомому маніпуляторі.

2. Удосконалено алгоритм керування заглибленням вимірювальних приладів у ґрунт, який враховує мікрорельєф поверхні міжряддя, що дозволяє зменшити похибку вимірювань вологості та пошкодження кореневої системи.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено та виготовлено макетний зразок роботизованої системи, що дозволяє збирати дані про стан ґрунту та рослин без участі оператора безпосередньо в полі. Запропоноване рішення дозволяє фермерським господарствам створювати детальні карти вологості для систем крапельного зрошення, що забезпечує економію водних ресурсів до 20%.

Апробація результатів роботи.

Ремнєв Ю., Дядюра К. Дослідження наземної роботизованої системи для моніторингу посівів та ґрунту, а також збору даних на фермах з вирощування перцю чилі. 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.157-159

					14.17 - КР.2025 02 20.001.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		ш 11

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМАТИКИ РОБОТИЗАЦІЇ

МОНІТОРИНГУ В ОВОЧІВНИЦТВІ

1.1. Значення точного землеробства для вирощування перцю та інших просапних культур

У сучасних умовах глобальне виробництво продовольства стикається з безпрецедентними викликами. За статистичними даними, з 1900 року населення планети зросло з 1,65 млрд до 7,9 млрд осіб, а до 2050 року прогнозується досягнення позначки у 9,7 млрд [3, 4]. Водночас ресурси для сільського господарства стають дедалі обмеженішими: близько 70% світових запасів прісної води вже використовується в аграрному секторі [5], а площа орних земель на душу населення скоротилася на 10% у період з 2003 по 2019 роки [6].

Ця диспропорція диктує необхідність переходу від традиційних екстенсивних методів до точного землеробства (Precision Agriculture). На відміну від конвенційного підходу, який базується на усереднених показниках та інтуїції агронома, точне землеробство передбачає прийняття рішень на основі потоків даних у реальному часі (Data-Driven Decisions).

Для вирощування овочевих культур, зокрема перцю (який є чутливим до водного стресу та хвороб), критично важливим є перехід від суцільної обробки поля пестицидами та гербіцидами до локального внесення. Це дозволяє:

1. Зменшити хімічне навантаження на ґрунт та запобігти забрудненню підземних вод.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ремнев Ю.В.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								12	куб
Реценз.								В			
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

2. Оптимізувати використання водних ресурсів, що є критичним для посушливих регіонів.

3. Підвищити врожайність за рахунок оперативного реагування на стрес рослин (хвороби, шкідники, дефіцит поживних речовин).

Ефективність точного землеробства залежить від деталізації даних: агроному необхідно знати вологість ґрунту біля кожної рослини, фенотипові характеристики, індекс SPAD (вміст хлорофілу) та температуру листя.

Сучасний стан, технології та перспективи вирощування перцю в Україні»

1. Загальна характеристика галузі

Перець (солодкий та гострий) входить до п'ятірки найбільш популярних овочевих культур в Україні. До 2022 року основним регіоном промислового вирощування був Південь (Херсонська, Миколаївська, Запорізька області), який забезпечував до 70% валового збору.

Поточна ситуація (2023-2025):

Зміна географії: Через тимчасову окупацію частини південних територій та руйнування Каховської ГЕС, промислове виробництво змістилося в Одеську область, а також у центральні (Дніпропетровська, Черкаська) та західні регіони (Закарпаття, Тернопільщина).

Типи виробництва:

Відкритий ґрунт: Вирощування для переробки та масового ринку (сезон серпень-жовтень).

Закритий ґрунт (плівкові теплиці): Рання продукція (Закарпаття, південь Одещини) для свіжого ринку.

2. Агрокліматичні умови та технологія

Перець — культура вимоглива до тепла, світла та вологи. В умовах України застосовуються інтенсивні технології.

Ключові елементи технології:

Спосіб посадки: Переважно розсадний (касетна технологія). Це дозволяє отримати забіг у розвитку на 45-60 днів і раніший врожай.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						ш 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зрошення: Перець критично залежний від вологи. В Україні промислове вирощування без краплинного зрошення (з фертигацією — подачею добрив з водою) є економічно недоцільним.

Мульчування: Використання мульчувальної плівки (чорної або сріблястої) для збереження вологи та боротьби з бур'янами.

Захист від сонця: У південних регіонах обов'язковим стає використання затіняючих сіток, щоб уникнути сонячних опіків плодів, які роблять їх непридатними для ринку.

3. Сортовий склад

Українські фермери використовують як вітчизняну, так і іноземну селекцію (Нідерланди, Франція).

Тип «Блочний» (Cuboid/Blocky): Найпопулярніший у супермаркетах. Товстостінні плоди кубоподібної форми (червоні, жовті, помаранчеві).

Тип «Капія» (Caria): Конічні червоні перці. Основна сировина для переробної промисловості (заморозка, консервація, гриль).

Тип «Білозерка» (Cone): Традиційний для України конусоподібний перець технічної стиглості (білий/кремовий). Дешевший у виробництві, популярний на свіжому ринку.

Гострий перець (Chili): Нішева культура, вирощується меншими обсягами, але має стабільний попит для виробництва соусів та приправ.

4. Проблеми та виклики (Актуальність для робототехніки)

Саме цей розділ підкреслює необхідність вашого робота.

Дефіцит вологи та засолення ґрунтів: Неточне зрошення призводить до втрати врожаю або засолення (особливо на Півдні).

Рішення: Робот з датчиком TERSO 12 дозволяє будувати точні карти вологості.

Хвороби та шкідники: Основні вороги — совка, трипси, фузаріозне в'янення та вертицильоз.

Рішення: Раннє виявлення хвороб за допомогою RGB-камер та спектрального аналізу (фенотипування), що пропонується у вашій роботі.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						ш 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Трудові ресурси: Критична нестача робочих рук для моніторингу (скаутингу) та збирання врожаю.

Рішення: Автоматизація моніторингу (ваш робот замінює агронома-скаута).

5. Економічні показники

Вирощування перцю є високомаржинальним, але й капіталомістким бізнесом.

Витрати: Основні статті — насіння гібридів F1, система зрошення, добрива, ручна праця.

Врожайність:

Відкритий ґрунт: 30–60 т/га.

Закритий ґрунт: 80–120 т/га.

Ринок збуту: Свіжий ринок (супермаркети, експорт), переробка (заморожування, сушіння на паприку).

6. Перспективи цифровізації (Precision Agriculture)

Українські агровиробники все частіше впроваджують елементи точного землеробства:

Використання метеостанцій.

Моніторинг вологості ґрунту (тензіометри, ємнісні датчики).

Використання дронів для внесення трихограми (біозахист).

Галузь вирощування перцю в Україні трансформується. Виробники переходять від екстенсивних методів до інтенсивних. Однак основним обмежувальним фактором стає неможливість постійного контролю стану рослин на великих площах людськими ресурсами. Впровадження наземних роботизованих платформ для моніторингу, подібних до тієї, що розробляється в магістерській роботі, є логічним наступним кроком для підвищення рентабельності та стійкості агробізнесу.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Огляд існуючих наземних роботизованих платформ (UGV) для агромоніторингу

Сучасна агроінженерія пропонує ряд роботизованих рішень для збору даних, кожне з яких має свої переваги та обмеження. Наземні роботизовані платформи (UGV – Unmanned Ground Vehicles) є найбільш перспективними для детального моніторингу, оскільки вони працюють безпосередньо в зоні росту рослин.

Можна виділити три основні класи наземних систем [4]:

1. Портальні системи (Gantries): Це автоматизовані платформи, що рухаються по рейках над полем. Вони дозволяють нести важке високоточне обладнання (до 500 кг) і отримувати зображення найвищої якості [12].

Недоліки: Висока вартість інфраструктури, неможливість масштабування на великі поля, обмежена площа покриття (типово до 0,12 га).

2. Модифіковані трактори: Автономні системи на базі традиційних тракторів, оснащені камерами та сенсорами на штангах [13].

Недоліки: Значне ущільнення ґрунту через велику вагу, використання дизельного палива (екологічний аспект), великі габарити, що вимагають широких поворотних смуг, неможливість роботи у вузьких міжряддях без пошкодження рослин.

3. Малі мобільні роботи (Small UGVs): Легкі колісні платформи з електричним приводом.

Переваги: Мінімальне ущільнення ґрунту, можливість використання відновлюваної енергії (сонячні панелі), здатність працювати у складі "рою" (Swarm Robotics) [8]. Вони можуть пересуватися безпосередньо у міжряддях, збираючи дані про плоди та нижню частину рослин, що недоступно для дронів або супутникового моніторингу.

Саме малі мобільні платформи, оснащені маніпуляторами, розглядаються як найбільш доцільне рішення для моніторингу овочевих плантацій з високою доданою вартістю, таких як перець.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						ш 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні розробки в цій категорії спрямовані на створення інтелектуальних систем захоплення даних ("smart-capturing systems"), здатних виявляти та фотографувати рослини на різних стадіях росту, а також виконувати складні маніпуляції з ґрунтом. Ключовою тенденцією є збільшення кількості ступенів свободи (DoF) маніпулятора. Додаткові ступені свободи дозволяють:

- виконувати більш надійний процес занурення датчиків, адаптуючи кут нахилу інструменту до нерівностей поверхні;
- здійснювати гнучке позиціювання камер для оцінки здоров'я рослин з різних ракурсів.

Яскравим прикладом еволюції таких систем є перехід від простих 4-ступеневих (4 DoF) моделей до більш досконалих комплексів на базі модульних платформ. Зокрема, у досліджуваних системах часто використовується шасі від Rover Robotics (модель 4WD Rover Pro).

Роботизований маніпулятор з 6 ступенями свободи показано на рисунку 1.1.

Важливим інженерним рішенням у модернізації таких платформ стала відмова від гусеничних рушіїв (tracks and flippers) на користь коліс великого діаметра. Використання чотириколісної бази (4WD) з великими шинами дозволило суттєво збільшити дорожній просвіт (кліренс).

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

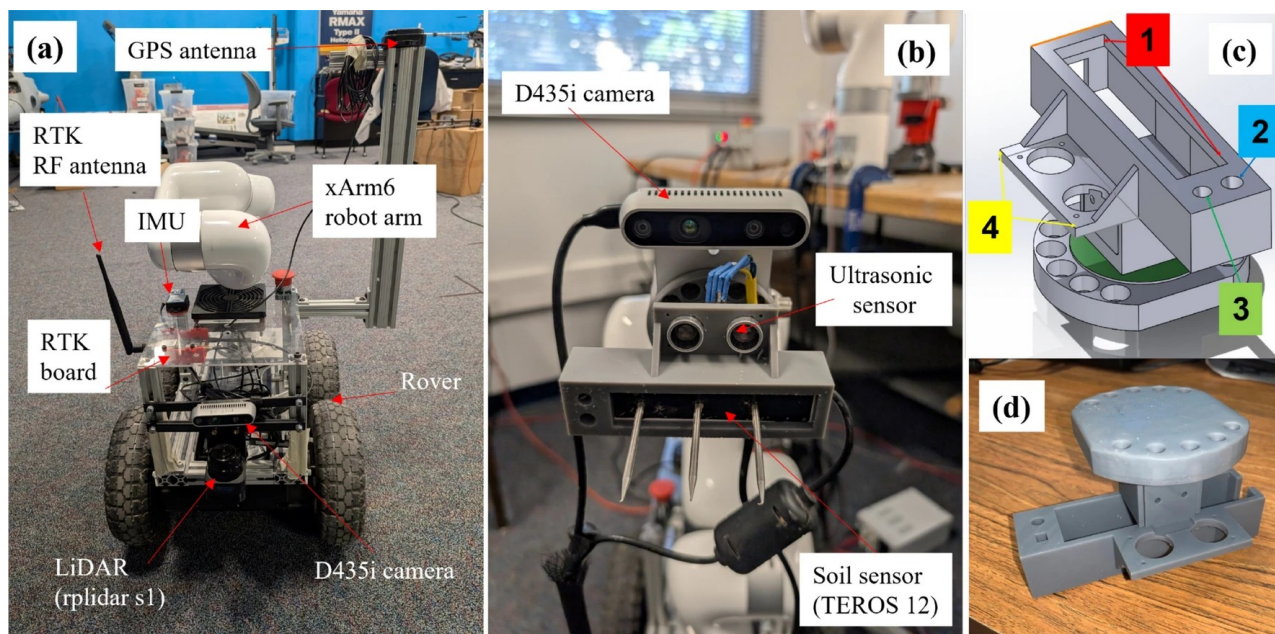


Рисунок 1.1 – Роботизована система для моніторингу посівів та ґрунту на фермі з вирощування перцю чилі, вигляд спереду з усіма можливостями навігаційного зондування, б) вигляд ззаду та кінцевий механізм маніпулятора з датчиком ґрунту, RGB+D камерою, світлодіодним світлом та фоторезисторним датчиком, а також ультразвуковим датчиком, в) CAD-модель корпусу зонда вологості ґрунту та адаптера (таблиця 4), та г) кріплення інструменту, надруковане на 3D-принтері.

Це забезпечило роботу значно кращу прохідність та можливість вільно пересуватися полем, мінімізуючи ризик пошкодження рослин та застрягання у пухкому ґрунті (таблиця 1.1, таблиця 1.2).

Таблиця 1.1 – Мобільний робот DoF

Компонент (Component)					Опис та характеристики (Description)	
4WD Rover Pro					Мобільна база роботизованої платформи (шасі).	
xArm6 robot arm					Роботизований маніпулятор з 6 ступенями свободи (6 DoF).	
Custom-built payload (Спеціальний модуль корисного навантаження)					Включає наступні елементи: • Міні-ПК Intel NUC; • Контролер xArm DC; • Розумна LiPo акумуляторна батарея TATTU Plus (12000 mAh, 22.2 V, 15C 6S); • Мікроконтролер Arduino Mega 2560; • Ресетратор даних на базі Arduino для	
					14.17 - KP.017.1.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Арху 18	

Компонент (Component)	Опис та характеристики (Description)
	датчика ґрунту (TEROS 12); • Вентилятор охолодження (24 В); • Кнопка аварійної зупинки (Emergency stop button).

Таблиця 1.2 – Опис повнопривідного Rover Pro

Параметр (Description)	Значення (Value)
Габаритні розміри (Dimensions)	62 × 39 × 25,4 см
Маса (Mass)	11 кг
Максимальна швидкість (Max speed)	2,5 м/с
Вантажопідйомність (Payload capacity)	100 кг

Стандарти серії ISO 18497 [13] є ключовими для проєктування автономних сільськогосподарських машин. Ця серія стандартів визначає принципи безпеки для високоавтоматизованих машин (які можуть працювати без присутності оператора в кабіні або взагалі без кабіни).

1. Ключові принципи безпеки (Safety Principles)

Стандарт вимагає реалізації наступних функцій:

Виявлення перешкод (Obstacle Detection): Робот повинен мати сенсорну систему (у вашому випадку — LiDAR та ультразвукові датчики), яка здатна виявляти перешкоди на шляху руху.

Вимога: Система має розпізнавати людину (або об'єкт, схожий на людину) на безпечній відстані.

Ваша реалізація: LiDAR RPLIDAR S1 сканує простір перед роботом. Якщо в зоні руху з'являється об'єкт, контролер віддає команду на екстрене гальмування.

Безпечні зони (Safety Zones / Hazard Zones): Навколо робота віртуально визначаються зони реагування.

Зона попередження (Warning Zone): Якщо об'єкт потрапляє сюди, робот зменшує швидкість і подає звуковий/світловий сигнал.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Зона зупинки (Stop Zone): Якщо об'єкт потрапляє сюди, робот негайно зупиняється. Розмір цієї зони розраховується на основі гальмівного шляху робота + час реакції системи + запас безпеки.

Автоматична зупинка (Automatic Stop): Машина повинна зупинитися і залишатися нерухомою, якщо:

Виявлено перешкоду в "Зоні зупинки".

Втрачено сигнал GPS/RTK або зв'язок з оператором (якщо це передбачено сценарієм).

Виникла помилка в програмному забезпеченні (наприклад, збій ROS-ноди навігації).

Відбувся фізичний контакт з бампером (якщо встановлено контактний сенсор).

2. Вимоги до інтерфейсу та сигналізації

Стандарт також регламентує, як робот має сповіщати про свою присутність:

Візуальна сигналізація: На роботі повинен бути встановлений проблісковий маячок (жовтого або помаранчевого кольору), який працює завжди, коли робот увімкнений або рухається автономно. Це попереджає персонал на полі.

Звукова сигналізація: Перед початком руху або зміною траєкторії робот повинен подати короткий звуковий сигнал.

Індикація статусу: На корпусі мають бути світлодіодні індикатори (світлофори), що показують стан:

Зелений: Автономний режим, все гаразд.

Жовтий/Червоний: Помилка або зупинка через перешкоду.

3. Аварійна зупинка (Emergency Stop)

Це одна з найсуворіших вимог.

Кнопка E-Stop: На корпусі робота має бути велика червона кнопка на жовтому фоні ("грибок"), розташована у легкодоступному місці.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимога: Натискання цієї кнопки повинно фізично розривати ланцюг живлення двигунів (а не просто подавати програмний сигнал на зупинку). У вашому описі компонентів ("Table 5") якраз згадується "emergency stop button" – це ідеально відповідає стандарту.

Дистанційна зупинка (Wireless E-Stop): Бажано (і часто вимагається), щоб оператор мав пульт дистанційного керування з аналогічною кнопкою зупинки, щоб зупинити робота здалеку у разі нештатної поведінки.

Стандарти серії ISO 11783, більш відомі як ISOBUS, є "золотим стандартом" сумісності в сучасній агроінженерії. Їхня головна мета — забезпечити універсальну мову спілкування між тракторами, терміналами та причіпним обладнанням різних виробників.

Для вашої магістерської роботи, де розробляється автономний робот-скаут, знання цього стандарту важливе з двох причин:

Інтеграція в екосистему: Дані, які збирає ваш робот (карти вологості), повинні бути зрозумілі іншим машинам (наприклад, "розумній" зрошувальній системі).

Академічний рівень: Посилання на ISOBUS показує, що ви розглядаєте свою розробку як частину промислового комплексу "Сільське господарство 4.0", а не як ізольовану іграшку.

Ось детальний розбір вимог ISO 11783, адаптований для вашого проєкту:

1. Загальна архітектура (Physical & Data Link Layers)

ISOBUS базується на протоколі CAN (Controller Area Network), який є стандартом для автомобільної та спецтехніки.

Вимоги до фізичного рівня (ISO 11783-2):

Швидкість передачі: Стандарт жорстко фіксує швидкість шини на рівні 250 кбіт/с.

Кабелі: Використовується вита пара (Twisted Pair) для ліній CAN_H та CAN_L, щоб мінімізувати електромагнітні завади.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Роз'єми: Стандарт описує спеціальні 9-пінові роз'єми (Breakaway Connector), які дозволяють безпечно роз'єднувати обладнання при ривку.

Для вашого робота: Оскільки це малий робот, ви не будете ставити великий роз'єм ISOBUS. Але ви можете вказати, що "внутрішня архітектура керування робота побудована за модульним принципом, аналогічним до вимог ISO 11783, що дозволяє в майбутньому інтегрувати його з CAN-шиною навісного обладнання".

Вимоги до каналного рівня (ISO 11783-3) [14]:

Використовуються 29-бітні ідентифікатори повідомлень (на базі SAE J1939).

Дані передаються групами параметрів (PGN — Parameter Group Numbers). Наприклад, є стандартний PGN для передачі координат GPS, швидкості руху тощо.

2. Універсальний термінал (Virtual Terminal / UT) — ISO 11783-6

Це вимога, яка дозволяє одному екрану (терміналу в кабіні або планшету оператора) керувати різними знаряддями.

Суть вимоги: Обладнання (у вашому випадку — робот або його сенсорний блок) не повинно мати "свій власний" екран. Воно повинно завантажувати "об'єктний пул" (кнопки, графіки, тексти) на головний термінал.

Застосування у роботі: Ви можете зазначити, що інтерфейс користувача для вашого робота розроблений з урахуванням концепції Virtual Terminal, де вся інформація про стан сенсорів (TEROS 12) та камер передається на віддалений планшет оператора в уніфікованому вигляді [15].

3. Контролер завдань (Task Controller) — ISO 11783-10

Це найважливіша частина для вашої теми. Цей розділ стандарту регулює роботу з картами полів, картами завдань та збором геоданих.

Стандарт виділяє функції:

ТС-BAS (Basic): Просто записує сумарні дані (скільки часу працював, яку площу пройшов).

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

TC-GEO (Geo-based): Робота з прив'язкою до координат. Це саме те, що робить ваш робот — збирає дані для побудови карти.

TC-SC (Section Control): Автоматичне включення/виключення секцій (наприклад, обприскувача).

Ключова вимога: Обмін даними між роботом та системою управління фермою (FMIS — Farm Management Information System) має відбуватися у форматі ISO-XML.

Стандарт ДСТУ EN ISO 9283:2005 є основним нормативним документом, який регламентує, як саме потрібно вимірювати точність та швидкість промислових роботів. Для вашої магістерської роботи цей стандарт важливий тим, що він дає чіткі визначення понять «точність» та «повторюваність», які ви вказуєте в характеристиках маніпулятора xArm6.

Ось детальний огляд вимог стандарту, адаптований для використання у вашій пояснювальній записці.

Основні положення стандарту ДСТУ EN ISO 9283 [16].

Стандарт визначає набір робочих характеристик маніпуляторів та методи їх тестування. Тести повинні проводитися в стандартних умовах (фіксована температура, номінальне навантаження на енд-ефектор, стабільне живлення).

1. Ключові характеристики (Performance Criteria)

Найважливішими для вашого робота (в контексті точного занурення щупа в ґрунт) є два параметри:

1.1. Повторюваність позиціювання (Pose Repeatability, RP)

Це найголовніший параметр для більшості промислових роботів.

Визначення: Здатність робота повертатися в одну й ту ж запрограмовану точку n разів у тому ж напрямку.

Як вимірюється: Робот підходить до точки 30 разів. Обчислюється радіус сфери (R), яка охоплює всі ці точки.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						щ 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значення для вашої роботи: У xArm6 заявлена повторюваність $\pm 0,1$ мм. Це означає, що при багаторазовому вимірюванні щуп буде потрапляти майже в один і той же слід.

Чому це важливо: Якщо повторюваність погана, робот може схибити і зламати щуп об камінь або край попередньої лунки.

1.2. Точність позиціювання (Pose Accuracy, AP)

Визначення: Різниця між координатами точки, яку ви задали програмно (наприклад, $x = 500, y = 200, z = 100$), і реальним положенням, в яке приїхав робот.

Нюанс: Точність завжди гірша за повторюваність через похибки калібрування ланок (zero-offset).

Значення для вашої роботи: Оскільки ви використовуєте камеру (RealSense) для корекції ("Closed-loop control"), абсолютна точність робота менш критична, ніж повторюваність, адже ви коригуєте рух "на льоту".

1.3. Точність відпрацювання траєкторії (Path Accuracy, ΔT)

Визначення: Наскільки точно робот рухається по прямій лінії або колу.

Значення для вашої роботи: Важливо при фазі занурення (Insertion). Щуп повинен рухатися строго вертикально (або по нормалі). Якщо ΔT низька, щуп буде "гуляти" в боки при русі вниз, що розпушить ґрунт і спотворить дані вимірювання.

1.4. Час стабілізації (Stabilization Time)

Визначення: Час, необхідний для повного затухання коливань інструменту після зупинки в точці.

Значення для вашої роботи: Критично для камери. Якщо зробити знімок одразу після зупинки, він може бути розмитим через вібрації. Стандарт каже, як поміряти цей час (зазвичай < 0.5 с).

2. Методика тестування (Test Cube)

Стандарт ISO 9283 вимагає, щоб вимірювання проводилися не в довільних точках, а в спеціально визначеному "Кубі ISO" (ISO Cube).

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Куб ISO: Це віртуальний куб, вписаний у робочу зону маніпулятора. Він повинен мати максимальний можливий об'єм. Точки вимірювання ($P_1 \dots P_5$): Тести проводяться у 5 характерних точках цього куба (центр та діагональні вершини). Цикли: Для статистичної достовірності кожен рух має повторюватися 30 разів. Навантаження: Тести проводяться з 100% номінального навантаження (rated payload). Тобто, якщо ви тестуєте xArm6 (5 кг), на ньому має висіти вантаж 5 кг (або вага вашого енд-ефектора з сенсорами).

1.3 Аналіз методів вимірювання параметрів ґрунту: ручні, стаціонарні та мобільні засоби

Якість прийняття агротехнічних рішень напряду залежить від методу збору первинної інформації.

1. Ручний метод: Традиційний підхід передбачає використання портативних сенсорів оператором, який обходить поле.

Недоліки: Екстремальна трудомісткість та висока вартість (витрати на оплату праці можуть сягати \$39 на акр лише для моніторингу [17]). Низька просторова розрізненість даних через фізичну неможливість охопити великі площі.

2. Стаціонарні станції моніторингу (IoT): Встановлення датчиків (наприклад, TEROS 12, HydraProbe) у фіксованих точках поля [18].

Переваги: безперервний потік даних у часі.

Недоліки: низька просторова точність. 10 станцій на полі не дають картини загального стану, а інтерполяція даних часто є неточною. Крім того, стаціонарні об'єкти заважають роботі збиральної техніки та вимагають демонтажу перед збором врожаю.

3. Мобільні роботизовані вимірювання: Використання робота, який перевозить сенсори та занурює їх у ґрунт у заданих точках [19].

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						ш 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги: Поєднання високої просторової роздільної здатності (можна зробити сотні замірів) з автономністю. Це дозволяє будувати детальні карти розподілу вологості та поживних речовин, що є основою для диференційованого зрошення.

1.4 Проблематика контактного зондування ґрунту в польових умовах: вплив рельєфу та навігації

Однією з головних технічних проблем при створенні мобільних роботів-дослідників є процес взаємодії робочого органу (щупа/сенсора) з ґрунтом.

Існуючі прототипи часто використовують прості механізми (наприклад, 3-осьові порталні системи типу 3D-принтера), які опускають сенсор вертикально вниз [20]. Проблема: Такі системи ефективні лише на ідеально рівній поверхні. В реальних польових умовах поверхня ґрунту в міжряддях є нерівною, має ухили та мікрорельєф.

Наслідки: Якщо робот знаходиться під нахилом, жорстко закріплений щуп входить у ґрунт не перпендикулярно до поверхні, а під кутом. Це призводить до:

- механічного пошкодження датчиків (згинанням електродів);
- отримання некоректних даних (через неповний контакт сенсора з середовищем);
- втрати стійкості робота;

Отже, існує потреба у використанні маніпуляторів з більшою кількістю ступенів свободи (наприклад, 6-DOF), здатних адаптуватися до рельєфу та виконувати «розумне занурення» (Smart Insertion) – вирівнювання інструменту по нормалі до поверхні ґрунту перед введенням. Крім того, навігація у вузьких міжряддях перцю вимагає високої точності, щоб уникнути пошкодження кореневої системи та надземної частини рослин колесами платформи.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

На основі проведеного аналізу сучасного стану та проблематики роботизації моніторингу в овочівництві можна зробити наступні висновки:

1. Актуальність переходу до точного землеробства. Встановлено, що в умовах глобального зростання населення та скорочення орних земель, традиційні екстенсивні методи господарювання стають неефективними. Для культур з високою доданою вартістю, таких як перець, критичним фактором врожайності є точне дотримання режимів зрошення та живлення. Перехід до концепції «Сільське господарство 4.0» вимагає впровадження технологій, що базуються на об'єктивних даних (Data-Driven Decisions), отриманих безпосередньо з поля у реальному часі.

2. Обмеженість існуючих методів моніторингу. Аналіз показав, що ручний збір даних є економічно не вигідним через високу вартість праці та низьку просторову розрізненість вимірювань. Стаціонарні IoT-станції забезпечують часову безперервність, але не покривають варіабельність ґрунтових умов на всій площі поля. Дистанційне зондування за допомогою БПЛА (дронів), хоч і є популярним, обмежується аналізом надземної частини рослин і не здатне надати точні дані про фізико-хімічні параметри кореневого шару ґрунту.

3. Переваги малих мобільних платформ (Small UGVs). Серед розглянутих типів роботизованих систем (портальні, тракторні, малі мобільні), найбільш перспективним для моніторингу овочевих плантацій визначено використання легких колісних платформ. Вони мінімізують ущільнення ґрунту, мають високу маневреність у міжряддях та можуть використовувати відновлювальні джерела енергії. Обґрунтовано вибір 4-колісної платформи з великим кліренсом (типу 4WD Rover Pro) для забезпечення прохідності.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

4. Технічна проблема контактного зондування. Виявлено, що більшість існуючих агророботів використовують спрощені механізми опускання сенсорів (лінійні приводи), які ефективні лише на ідеальній площині. В реальних польових умовах нерівність мікрорельєфу призводить до похибок вимірювань та механічних пошкоджень обладнання. Це обґрунтовує необхідність використання маніпуляторів з 6-ма ступенями свободи (6-DOF), здатних адаптувати кут занурення щупа перпендикулярно до поверхні ґрунту (алгоритм «Smart Insertion»).

5. Комплексність підходу. Сучасні вимоги агрономії диктують необхідність одночасного збору різнорідних даних. Ефективна роботизована система повинна поєднувати контактні вимірювання (вологість, температура ґрунту) з безконтактним візуальним фенотипуванням (RGB-D камери). Це дозволяє виявляти кореляції між станом ґрунту та розвитком рослини, що є недосяжним при використанні розрізнених засобів моніторингу.

Таким чином, на основі виконаного огляду сформульовано задачу магістерського дослідження: розробка та дослідження автономної наземної роботизованої системи на базі мобільної платформи та 6-ступеневого маніпулятора, яка забезпечить високоточний моніторинг посівів перцю шляхом адаптивного контактного зондування ґрунту та візуальної оцінки стану рослин.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Арку
						ш 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Математичне моделювання прямої кінематики мобільного маніпулятора

В якості виконавчого механізму для проведення контактних вимірювань та позиціювання сенсорів обрано комерційно доступний роботизований маніпулятор xArm6 виробництва компанії Ufactory (Китай) [21].

Вибір маніпулятора з шістьма ступенями вільності (6-DoF) є критично важливим для роботи в неструктурованому аграрному середовищі. На відміну від простіших 3-осьових декартових систем (типу gantry) або 4-осьових SCARA-роботів, 6-осьова кінематична схема забезпечує необхідну спритність (dexterity) та гнучкість маневрування в обмеженому просторі міжрядь перцю.

Основні переваги використання 6-DoF маніпулятора в даному проєкті:

1. Варіативність поз енд-ефектора (End-Effector Poses): Додаткові ступені вільності дозволяють орієнтувати робочий орган під будь-яким кутом відносно поверхні. Це є необхідною умовою для реалізації алгоритму «Smart Insertion», де щуп повинен входити в ґрунт строго перпендикулярно до локального нахилу мікрорельєфу, незалежно від нахилу мобільної платформи.

2. Обхід перешкод: Кінематична надлишковість дозволяє досягати однієї й тієї ж точки в просторі різними конфігураціями ланок ("лікоть вгору", "лікоть вбік"). Це дозволяє уникати зіткнень з листям, стеблами рослин або елементами конструкції самого мобільного робота.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Ремнев Ю.В.			РОЗДІЛ 2		Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.							29	КУШ
Реценз.							В			
Н. Контр.										
Затверд.		Дядюра К. О.								

3. Багатофункціональність: Завдяки високій гнучкості позиціювання, система здатна виконувати широкий спектр агротехнічних завдань (наприклад, точкове обприскування, збір зразків листя або навіть збирання плодів) лише шляхом заміни робочого інструменту, без необхідності зміни кінематичної структури робота.

Технічні характеристики обраного маніпулятора наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики маніпулятора Ufactory xArm6

Параметр (Description)	Значення (Value)
Кількість ступенів вільності (Degrees of Freedom)	6
Корисне навантаження (Payload)	5 кг
Робочий радіус (Reach)	700 мм
Повторюваність позиціювання (Repeatability)	± 0,1 мм
Вага маніпулятора (Weight)	9,5 кг (з вуглецевого волокна)
Максимальна швидкість (Max Speed)	1,0 м/с (по траєкторії)
Інтерфейс зв'язку (Communication)	Ethernet, Modbus TCP
Споживана потужність (Power Consumption)	Типова: 200 Вт, Макс: 450 Вт

2.2 Програмна архітектура системи керування (ROS Integration)

Для забезпечення злагодженої роботи всіх компонентів роботизованого комплексу (мобільної платформи, маніпулятора та навігаційних датчиків) використано мета-операційну систему Robot Operating System (ROS).

У початковій фазі тестування використовувалася версія ROS 1, проте для фінальної версії прототипу здійснено повну міграцію на ROS 2 (дистрибутив Humble). Це рішення обумовлено покращеною підтримкою реального часу (DDS), підвищеною безпекою та стабільністю роботи розподілених систем.

Архітектура керування включає два рівні:

1. Високий рівень (High-Level Control): Головний бортовий комп'ютер під керуванням ROS 2 відповідає за:

- Навігацію та локалізацію (SLAM) на основі даних LiDAR, IMU та GPS.

- Планування траєкторії руху маніпулятора (Motion Planning).

- Обробку зображень з камер.

2. Низький рівень (Low-Level Control): Мікроконтролер Arduino використовується як шлюз для підсистеми агромоніторингу. Він керує роботою світлодіодів (LED), зчитує аналогові дані з фоторезистора та забезпечує взаємодію з датчиками вологості TEROS 12. Обмін даними між Arduino та головним комп'ютером здійснюється через серійний інтерфейс з подальшою публікацією топіків у мережу ROS.

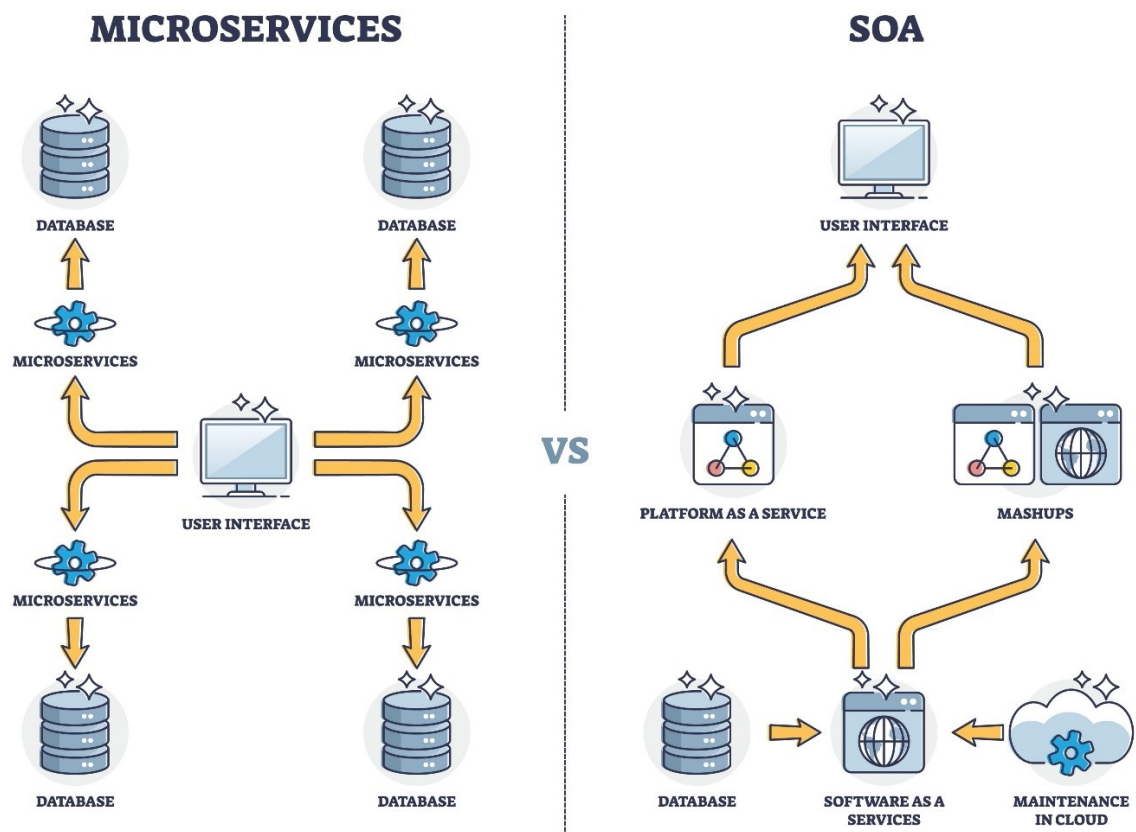


Рисунок 2.1 – Архітектура системи керування роботизованим КОМПЛЕКСОМ

2.3 Розробка конструкції робочого органу та сенсорне забезпечення

Оскільки основною функцією платформи є вимірювання параметрів ґрунту та візуальний моніторинг, критично важливим етапом стала розробка спеціалізованого робочого органу (енд-ефектора).

Для кріплення вимірювального щупа та супутніх сенсорів було спроектовано та виготовлено (методом 3D-друку) спеціальний адаптер-корпус. Його конструкція забезпечує жорстке кріплення датчиків відносно останньої ланки маніпулятора.

До складу сенсорного пакету енд-ефектора входять (див. Таблицю 2.2):

1. Датчик вологості та температури ґрунту (TEROS 12): Основний вимірювальний інструмент, що потребує фізичного занурення в ґрунт.

2. Система оптичного зворотного зв'язку (LED + Фоторезистор): Використовується для верифікації повного занурення щупа. Принцип роботи базується на перекритті світлового потоку ґрунтом: коли щуп повністю занурений, фоторезистор фіксує зміну освітленості, що слугує сигналом про успішне досягнення глибини вимірювання (детальний опис алгоритму наведено в підрозділі «*Smart Insertion*»).

3. Ультразвуковий датчик відстані: Вимірює відстань від робочого органу до поверхні ґрунту, що дозволяє системі адаптуватися до нерівностей рельєфу ще до моменту контакту.

4. Камера глибини (Intel RealSense D435i): Компактний модуль, що поєднує RGB-сенсор та сенсор глибини (Depth). Камера закріплена на енд-ефекторі таким чином, щоб забезпечити захоплення кольорових, інфрачервоних зображень та карт глибини. Це дозволяє не лише оцінювати фенотип рослин, але й будувати локальні карти поверхні для навігації маніпулятора. Для коректного планування рухів у середовищі ROS для кожного сенсора та суглоба маніпулятора визначено відповідні системи координат (Frames), як показано на Рисунку 3.Z.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Арку
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Це дозволяє трансформувати дані з локальної системи координат камери в глобальну систему координат робота (Rover Frame) та світу (World Frame).

Таблиця 2.2. Склад сенсорного забезпечення робочого органу

Компонент (Sensor/Component)	Призначення (Function)
TEROS 12	Вимірювання об'ємної вологості ґрунту, температури та електропровідності.
Intel RealSense D435i	Отримання RGB-зображень, карт глибини та інфрачервона зйомка для фенотипування.
Ультразвуковий датчик (Ultrasonic Sensor)	Безконтактне вимірювання висоти енд-ефектора над поверхнею ґрунту.
Фоторезистор + LED	Оптична система визначення моменту повного занурення зонда (контакт з ґрунтом).

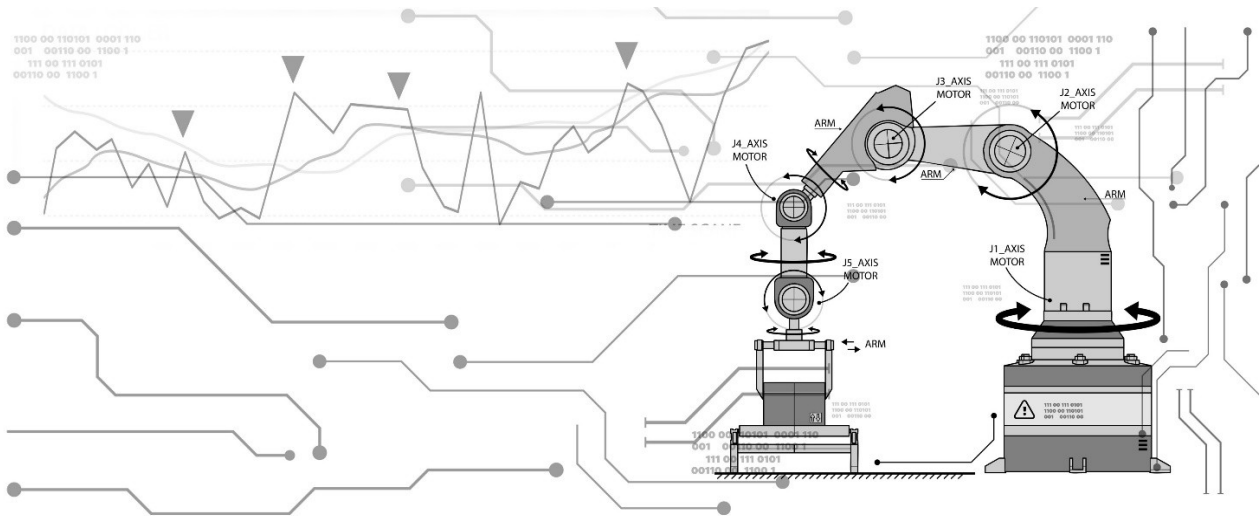


Рисунок 2.2 – Розміщення систем координат (Frames) на маніпуляторі та робочому органі

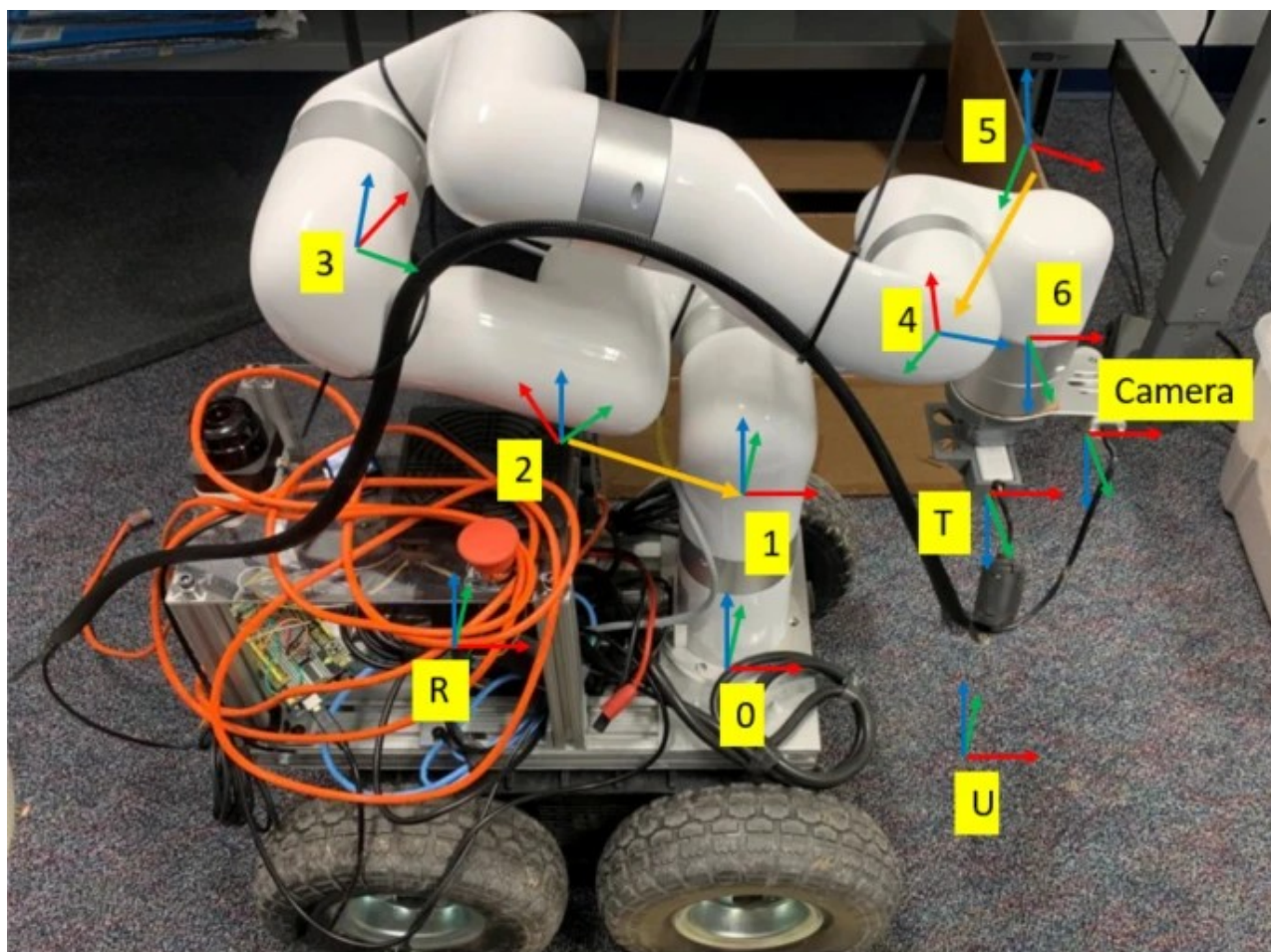


Рисунок 2.3 – Прикріплені системи координат мобільної робототехнічної системи з 6 ступенями свободи. U – універсальна система координат (фіксована система відліку для всіх рухомих компонентів), R – система координат нерухомого тіла марсохода, прикріплена до шасі марсохода в його геометричному центрі, системи координат від $\{0\}$ до $\{6\}$ прикріплені до кожної ланки маніпулятора робота у відповідному місці з'єднання, T – система координат, прикріплена до кінцевого ефектора маніпулятора робота, а C – система координат камери, прикріплена до RGB-об'єктива камери відповідно до конвенції Intel Real-Sense.

Для забезпечення автономного переміщення, картування навколишнього середовища та точної локалізації на місцевості мобільна платформа (UGV) оснащена комплексом різномірних сенсорів. Інтеграція даних з цих пристроїв реалізована в середовищі ROS.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Апаратна частина навігаційної системи включає:

1. LiDAR (RPLIDAR S1, Slamtec): Лазерний сканер, що працює за технологією Time-of-Flight (ToF). Пристрій має радіус дії до 40 м і здатен сканувати простір на 360°. Проте, для уникнення хибних спрацювань через елементи конструкції робота (зокрема, маніпулятор, розташований позаду лідара), програмним шляхом сектор огляду було обмежено до 270°. Дані лідара використовуються для побудови карти перешкод (Occupancy Grid Map).

2. Інерціальний вимірювальний модуль (IMU WT901BLECL, WitMotion): Високоточний 9-осьовий датчик. Він об'єднує дані з гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів. Завдяки вбудованому розширеному фільтру Калмана (EKF), модуль видає точні значення кутів орієнтації платформи (крен, тангаж, рискання), а також кутову швидкість, що критично важливо для компенсації нахилів на нерівному ґрунті.

3. GPS/GNSS модуль з підтримкою RTK (simpleRTK2B, ArduSimple): Для глобального позиціонування використано мультидіапазонний приймач із зовнішньою антеною. Технологія кінематики реального часу (RTK) у конфігурації «фіксовані базова станція — рухомий ровер» забезпечує відносну точність позиціонування в межах $\pm 1\text{ см}$, що дозволяє роботу чітко слідувати міжряддями.

Алгоритм злиття даних (Sensor Fusion):

У середовищі ROS реалізовано комплексування навігаційних даних через вузол локалізації на базі розширеного фільтра Калмана (Extended Kalman Filter — EKF). Алгоритм об'єднує:

- глобальні координати від GPS RTK;
- інерціальні дані від IMU;
- локальну одометрію (дані енкодерів коліс);

Такий підхід дозволяє отримати стабільну глобальну одометрію навіть у випадках тимчасової втрати супутникового сигналу або проковзування коліс на ґрунті.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Арку
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У таблиці 2.3 наведено зведену характеристику всіх сенсорів, що входять до складу розробленого 6-DoF роботизованого комплексу.

Таблиця 2.3 – Зведена характеристика сенсорів та обладнання роботизованої системи

Компонент (Component)	Призначення та опис (Description)	Точність / Характеристики (Accuracy)
D435i (на маніпуляторі)	RGB-D камера. Використовується для зйомки посівів, визначення нахилу ґрунту, детекції основи та верхівки рослин.	Похибка глибини < 2% на відстані 2 м
D435i (на шасі)	RGB-D камера. Використовується для візуальної одометрії (Visual SLAM) та трекінгу.	Похибка глибини < 2% на відстані 2 м
TEROS 12	Датчик ґрунту. Вимірює об'ємну вологість (VWC), температуру та електропровідність (EC).	$\pm 0,03 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (VWC) $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (Temp) 5% (EC)
WT901BLECL	IMU (9 осей). Вимірює кути крену, тангажу та рискання (Roll, Pitch, Yaw).	Високоточний (залежить від динаміки)
RPLIDAR S1	LiDAR. Лазерний сканер для картування навколишнього середовища з високою роздільною здатністю.	Радіус: 40 м Кут: 360° (обмежено 270°)
simpleRTK2B	GPS модуль. Мультидіапазонний приймач з підтримкою RTK (Real-Time Kinematic).	< 1 см (Base-Rover) < 1.4 см (NTRIP)
HC-SR04	Ультразвуковий сонар. Резервний датчик для вимірювання відстані до поверхні ґрунту.	$\pm 3 \text{ мм}$
Фоторезистор (PDV-P5001)	Забезпечує зворотний зв'язок у процесі занурення щупа (реєструє перекриття світла).	Н/Д (логічний сигнал)
LED	Джерело світла для роботи оптичної пари з фоторезистором.	Н/Д
Arduino (Control)	Керування LED індикацією та зчитування даних фоторезистора.	Н/Д
Arduino (Logger)	Реєстрація даних (Data logging) з датчика TEROS 12.	Н/Д

Кінематична модель 6-ступеневої роботизованої системи базується на поєднанні кінематики мобільної платформи та маніпулятора. Для опису положення та орієнтації робочого органу (енд-ефектора) відносно глобальної системи координат використано метод матриць однорідних перетворень.

Система координат включає:

1. Universal frame {U}: Глобальна (світова) система координат.
2. Rover frame {R}: Система координат, прив'язана до геометричного центру верхньої плити мобільної платформи.²
3. Arm Base frame {B}: Система координат основи маніпулятора.
4. Tool frame {T}: Система координат робочого органу (інструменту).

Кінематика мобільної платформи

Матриця перетворення від системи координат ровера {R} до глобальної системи {U} описується як:

$$T_U^R = \begin{bmatrix} R_U^R & P_{rover} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

де $P_{rover} = [x, y, z]^T$ – вектор положення центру платформи.

Матриця повороту R_U^R визначається за конвенцією фіксованих кутів XYZ (Roll-Pitch-Yaw), де φ (крен), θ (тангаж) та ψ (рискання) відповідають обертанням навколо осей X, Y та Z відповідно:

$$R_U^R = R_Z(\psi) \cdot R_Y(\theta) \cdot R_X(\varphi) \quad (2.2)$$

Елементарні матриці повороту мають вигляд:

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & s\varphi & c\varphi \end{bmatrix}, \quad R_y(\theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix}, \quad R_z(\psi) = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Об'єднуючи рівняння (2.1) та (2.2), отримуємо наступну матрицю, яка описує положення системи координат ровера відносно універсальної (глобальної) системи координат:

$$T_U^R = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi & x \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi & y \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.3$$

Матриця перетворення від ровера до основи роботизованої руки показана в рівнянні (2.4), де L – відстань між рамою ровера та рамою основи роботизованої руки. Змінені параметри ДН наведено в таблиці 2.4.

$$T_R^B = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & [L, 0, h_z]^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.4$$

Для опису кінематичного ланцюга самого маніпулятора використано модифіковані параметри Денавіта-Хартенберга (Modified DH-parameters). Параметри ланок для маніпулятора xArm6 наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Модифіковані параметри Денавіта-Хартенберга для досліджуваного маніпулятора

Ланка (i)	Кут скручування (α_{i-1})	Довжина ланки (a_{i-1})	Зміщення ланки (d_i)	Кут повороту (θ_i)
1	0	0	267 мм	θ_1
2	$\pi/2$	0	0	θ_2
3	0	a_2	0	θ_3
4	$\pi/2$	77,5 мм	342,5 мм	θ_4
5	$-\pi/2$	0	0	θ_5
6	$\pi/2$	76 мм	97 мм	θ_6

Загальна матриця перетворення маніпулятора від бази {B} до інструменту {T} є добутком матриць окремих ланок:

$$T_B^T = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6 \quad 2.5$$

Загальне рівняння прямої кінематики. Результуюча матриця, що описує положення робочого органу в глобальній системі координат, визначається як добуток матриць (2.1), (2.3) та (2.5):

$$T_U^T = T_U^R \cdot T_R^B \cdot T_B^T \quad (2.6)$$

Порівняно з попередніми дослідженнями 4-ступеневих систем, використання 6-DoF маніпулятора забезпечує значно більший робочий простір та гнучкість (dexterity), що дозволяє виконувати складні маневри для збору зображень та вимірювань "in-situ".

2.4 Алгоритмічна реалізація автоматизованого збору даних

Основною функціональною задачею розробленої роботизованої платформи є накопичення масиву мультимодальних даних для забезпечення прийняття рішень у системі точного землеробства. Комплексний моніторинг передбачає синхронізований збір інформації про надземну частину агроценозу (фенотипування рослин) та стан кореневого шару ґрунту.

Для реалізації цієї задачі розроблено керуючий алгоритм (скрипт), який виконується циклічно в кожній точці маршруту. Процес збору даних суворо регламентований і складається з двох послідовних фаз: безконтактного оптичного моніторингу та контактного зондування.

Етапи виконання алгоритму:

1. Позиціювання та ініціалізація: Після прибуття у задану GPS-координату платформа зупиняється, фіксує гальма двигунів і переводить маніпулятор з транспортного положення у робоче.

2. Багатокутова фотозйомка (Multi-view Imaging):

Маніпулятор виконує серію запрограмованих переміщень навколо об'єкта дослідження (рослини перцю).

Алгоритм передбачає захоплення 15 зображень з різних ракурсів.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Арку
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Змінюються як дистанція до рослини (для отримання загальних та макро-планів), так і кут орієнтації камери (Orientation). Це дозволяє отримати дані для потенційної 3D-реконструкції куща та мінімізувати вплив оклюзії (перекриття листям).

3. Контактне вимірювання параметрів ґрунту:

Після завершення зйомки маніпулятор позиціонує енд-ефектор над вільною ділянкою ґрунту.

Виконується процедура «Smart Insertion» (адаптивне занурення).

Здійснюється вимірювання трьох ключових параметрів за допомогою датчика TEROС 12:

Об'ємна вологість ґрунту (VWC).

Температура ґрунту (T, ° C).

Електропровідність (Salinity / Bulk EC), що характеризує засоленість ґрунту та наявність поживних речовин.

4. Завершення циклу: Дані записуються у лог-файл (roѕbag), щуп витягується, і робот рушає до наступної точки.

Розпочинаючи процедуру збору даних, роботизована система спочатку вимірювала будь-який крен або тангаж з інерційного модуля (IMU) та обчислювала необхідні перетворення. Положення кінцевого ефектора визначалося заздалегідь та відображалося в універсальній рамці, а потім перетворювалося в рамку роботизованого маніпулятора, щоб контролер міг швидко розрахувати кути шарнірів. Потім роботизований маніпулятор розташовував камеру в 15 різних положеннях для зображення рослин.

Після завершення зображення робот розташовував інструмент над ґрунтом, щоб виміряти відстань до ґрунту за допомогою глибинної камери. Відстань, виміряна глибинною камерою, по суті, була середньою відстанню, знятою від центру зображення, для точнішого вимірювання відстані. На рисунку 2.4 підсумовано, як зображення розбивається на одну квадратну матрицю, в якій береться середнє значення для отримання відстані від камери до ґрунту.

					141177-КР.01720000ПВЗ	Архив
Зам.	Арх.	На докум.	Підпис	Дата		440

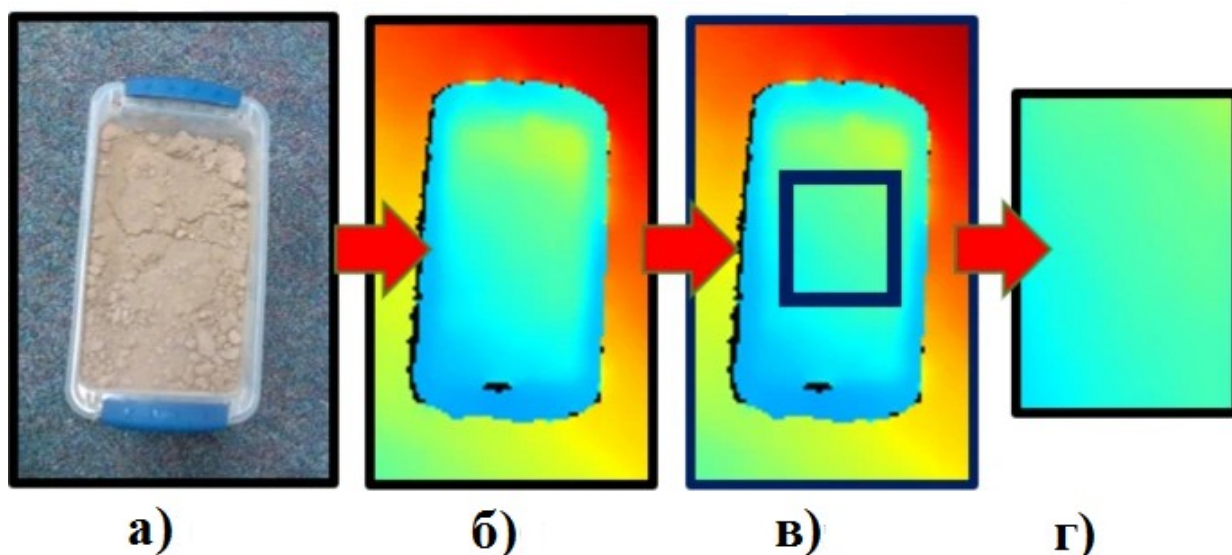


Рисунок 2.4 – Процес вимірювання глибинної відстані в лабораторії: а) RGB-зображення, б) зображення глибини, в) вибір зони інтересу та с) обчислення середньої відстані матриці від кадру глибини.

Після отримання цієї початкової оцінки зонд вологості ґрунту опускали в ґрунт. Для подальшого полегшення процесу введення в ґрунт використовували фоторезистор для забезпечення зворотного зв'язку з роботизованою системою. Було життєво важливо, щоб зонд вологості ґрунту був повністю введений у ґрунт, інакше він не зможе точно вимірювати. Щоб визначити, чи зонд повністю введений у ґрунт, використовували фоторезистор разом зі світлодіодним джерелом світла. Ідея цього зворотного зв'язку була простою: якщо фоторезистор бачив світло, значить, він не повністю введений у ґрунт. На рисунку 2.5 показано процес введення в ґрунт і те, як фоторезистор забезпечував зворотний зв'язок.

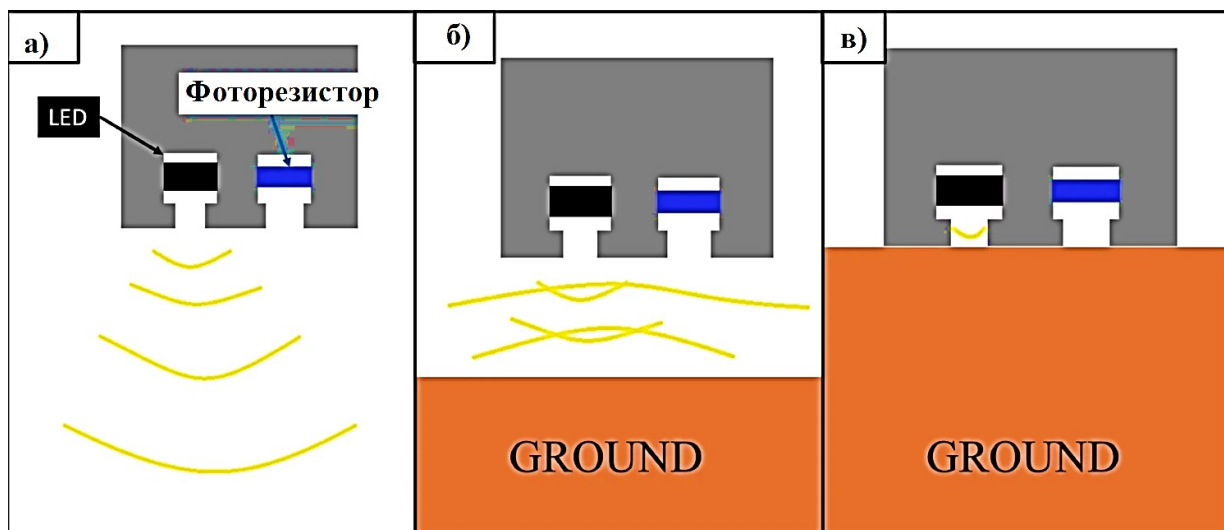


Рисунок 2.5 – Photoresistor feedback schematic

Як показано, коли інструмент знаходиться високо над ґрунтом, фоторезистор зчитує навколишнє освітлення в цій області. Як тільки інструмент переміщується ближче до ґрунту, фоторезистор зчитує як навколишнє освітлення, так і світло від світлодіода, яке частково відбивається від ґрунту. Нарешті, коли інструмент повністю знаходиться врівень з ґрунтом, світло на фоторезисторі не видно, оскільки воно блокується геометрією інструменту. Цей зворотний зв'язок був перевірений у лабораторії, і показники фоторезистора були записані на різних відстанях від ґрунту.

На рисунку 2.6 показано фоторезистор, що використовується в лабораторії, а на рис. 9 показано значення, виміряні на різних відстанях.

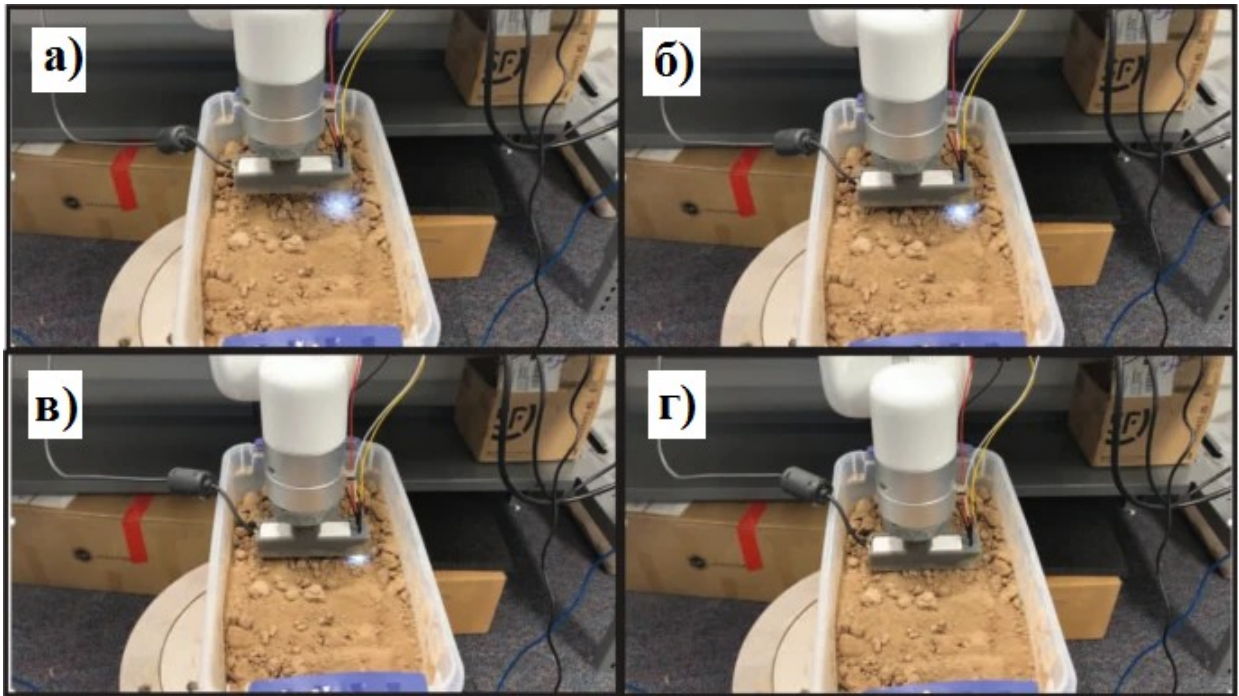


Рисунок 2.6 – Тестування зворотного зв'язку з фоторезисторами

З графіка на рисунку 2.7 видно, що на відстані приблизно 50 мм від ґрунту фоторезистор вимірює лише навколишнє освітлення, а наближаючись до ґрунту, він вимірює найбільше світла приблизно на 25 мм, коли світло відбивається від ґрунту назад у фоторезистор, перш ніж зчитати своє найменше значення на 0 мм.

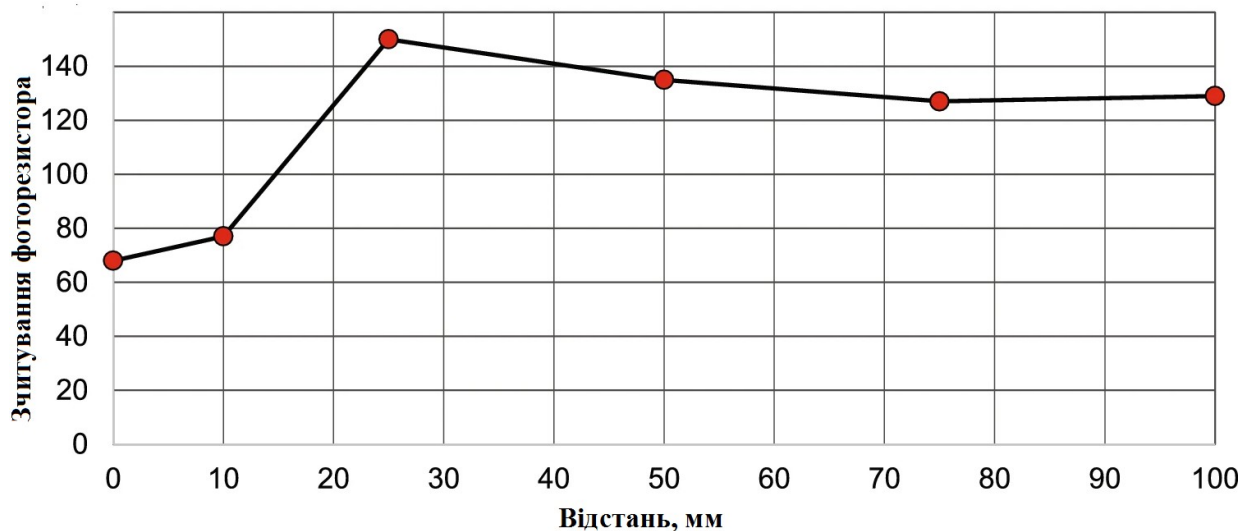


Рисунок 2.7 – Значення від фоторезистора

Висновки

У другому розділі магістерської роботи здійснено теоретичне обґрунтування та математичне моделювання підсистем наземного роботизованого комплексу для моніторингу посівів перцю. Отримані результати дозволяють сформулювати наступні висновки:

1. Обґрунтування кінематичної схеми. Доведено, що для ефективного виконання операцій контактного зондування ґрунту в умовах неструктурованого агросередовища (нерівний мікрорельєф міжрядь) найбільш доцільним є використання архітектури «мобільний маніпулятор». На відміну від жорстких порталних систем, комбінація 4-колісної платформи з високою прохідністю та 6-ступеневого маніпулятора (6-DoF) забезпечує необхідну кінематичну надлишковість та гнучкість (dexterity) для орієнтації вимірювального інструменту під довільним кутом.

2. Моделювання руху мобільної бази. Розроблено математичну модель кінематики колісної платформи з диференціальним приводом. Отримано матрицю однорідних перетворень T_{U}^{R} , яка описує положення центру робота у глобальній системі координат з урахуванням кутів орієнтації (крену ϕ , тангажу θ , рискання ψ), отриманих від інерціального модуля (IMU). Це дозволяє компенсувати похибки позиціювання робочого органу, спричинені нахилом поверхні поля.

3. Пряма кінематика маніпулятора. На основі модифікованих параметрів Денавіта-Хартенберга (ДН-параметрів) побудовано кінематичну модель маніпулятора xArm6. Сформовано загальне рівняння прямої кінематики T_{U}^{T} , що зв'язує глобальну систему координат із системою координат енд-ефектора через послідовний ланцюг перетворень. Це рівняння є базовим для розрахунку траєкторії руху інструменту до точок вимірювання.

4. Особливості оберненої кінематики. Встановлено, що через конструктивні особливості обраного маніпулятора (відсутність сферичного

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Арку ш 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зап'ястя, де осі трьох останніх ланок перетинаються в одній точці), аналітичний розв'язок оберненої задачі кінематики є ускладненим і обчислювально неефективним. Обґрунтовано необхідність використання чисельних ітераційних методів оптимізації (реалізованих у планувальниках руху ROS) для знаходження векторів кутів суглобів, що мінімізують похибку досягнення цільової позиції.

5. Математичне підґрунтя алгоритму «Smart Insertion». Теоретично обґрунтовано алгоритм адаптивного занурення датчиків. Розроблено математичну модель визначення вектора нормалі до поверхні ґрунту на основі даних карти глибини (Depth Map) та показників IMU. Доведено, що корекція орієнтації енд-ефектора вздовж розрахованого вектора нормалі дозволяє уникнути механічних пошкоджень щупа та забезпечити достовірність вимірювань вологості ґрунту.

Таким чином, розроблені математичні моделі кінематики та алгоритми просторової орієнтації створюють необхідну теоретичну базу для програмної реалізації системи керування роботом у середовищі ROS, що є завданням наступного розділу роботи.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Польові випробування

Роботизовану систему було вивезено в поле для серії тестів з метою перевірки процесу збору даних. Для цього тесту система змогла зібрати зразки даних у 15 різних місцях ряду експериментальної ферми з перцю чилі в Науково-дослідному центрі рослин Лейендекер.

Поле показано на рисунку 3.1. Вказано місця вимірювання ґрунту роботом на місці та зйомки зображень на опоросі між рядами номер 15 та 16.

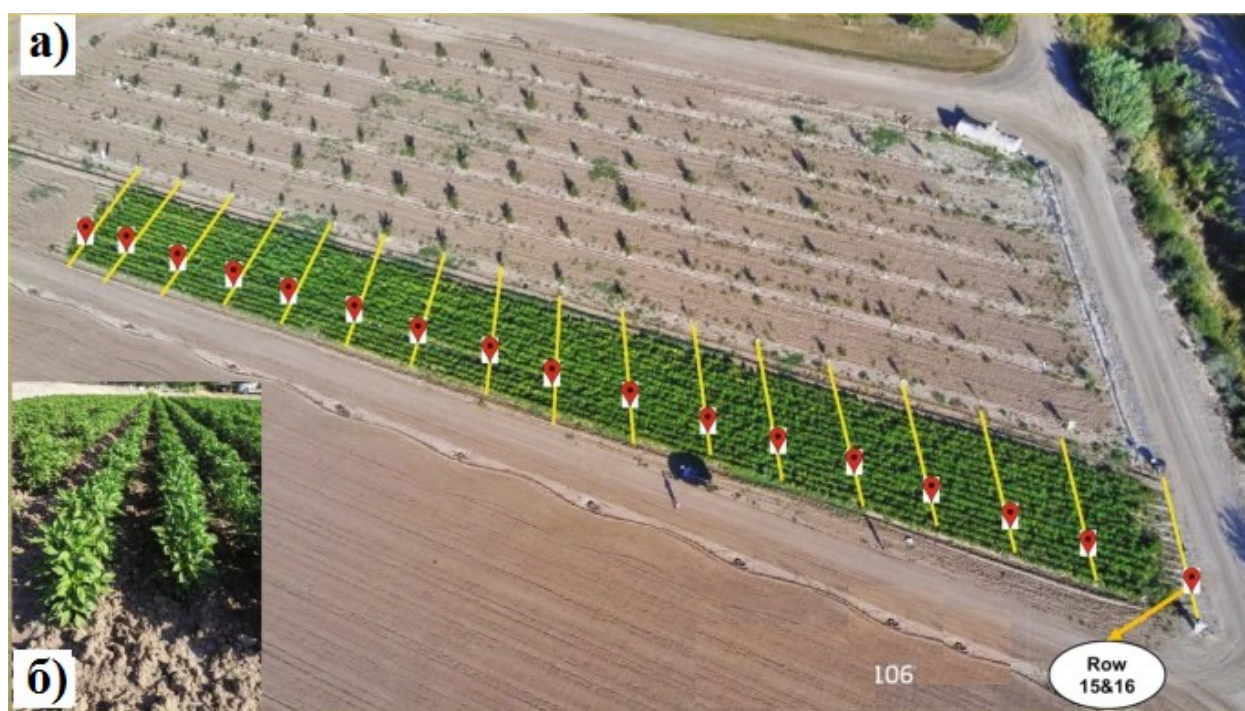


Рисунок 3.1 – Огляд поля перцю чилі; маркери вказують на місця вимірювання ґрунту роботом на місці та зйомки зображень на опоросі між рядами 15 та 16.

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Ремнев Ю.В.					46	КУШ
Перевір.		Дядюра К.О.						В
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

На рисунку 3.2 ровер збирає зображення рослин, а потім переходить до виконання вимірювань вологості та температури ґрунту, показаних на рисунку 3.3. Що стосується відбору проб вологості та температури ґрунту, після повного введення зондів датчика процес включає п'ять вимірювальних зразків по 10 секунд кожен, тому загальний час відбору проб становить 50 секунд.



Рисунок 3.2 – Знімки, що збираються марсоходом



Рисунок 3.3 – Роботизована система, що виконує вимірювання ґрунту

Зйомка зображень з обох боків ряду посівів займає близько 15 секунд. Необхідний час для процесу внесення ґрунту коливається від 8 до 22 секунд залежно від текстури ґрунту (ступінь твердості/м'якості), умов освітлення на полі, що впливає як на точність вимірювання глибини камерою, так і на точне налаштування внесення фоторезистором. Середній час, виміряний для частини внесення ґрунту на нашому повному полі, становив близько 13 секунд для 15 зразків. Загальний середній час відбору проб становив 78 секунд серед 15 точок відбору проб з діапазоном від 73 до 97 секунд.

Графіки температури та вологості поля показано на рисунку 3.4 та 3.5. Цікаво відзначити, що температура з часом дуже поступово зростає. Це пояснюється тим, що ми почали вранці, коли температура зовнішнього повітря була прохолоднішою, а з плином дня ставало тепліше.

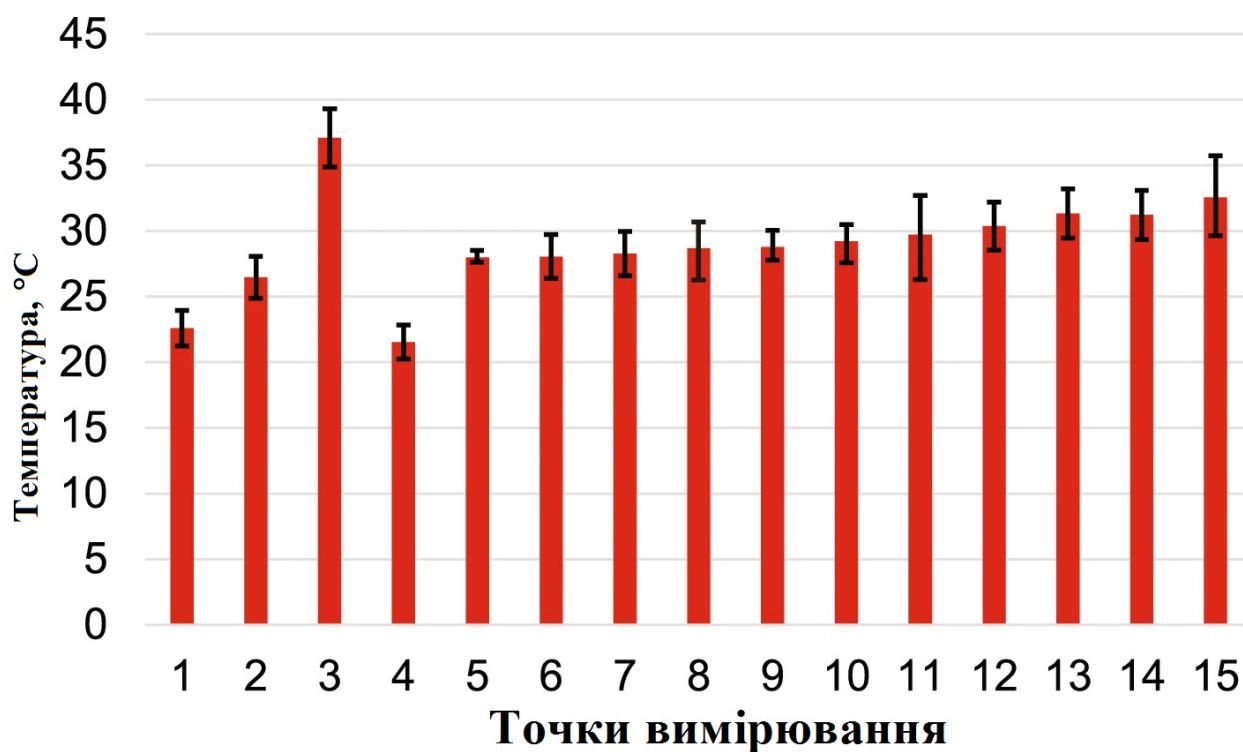


Рисунок 3.4 – Показники температури

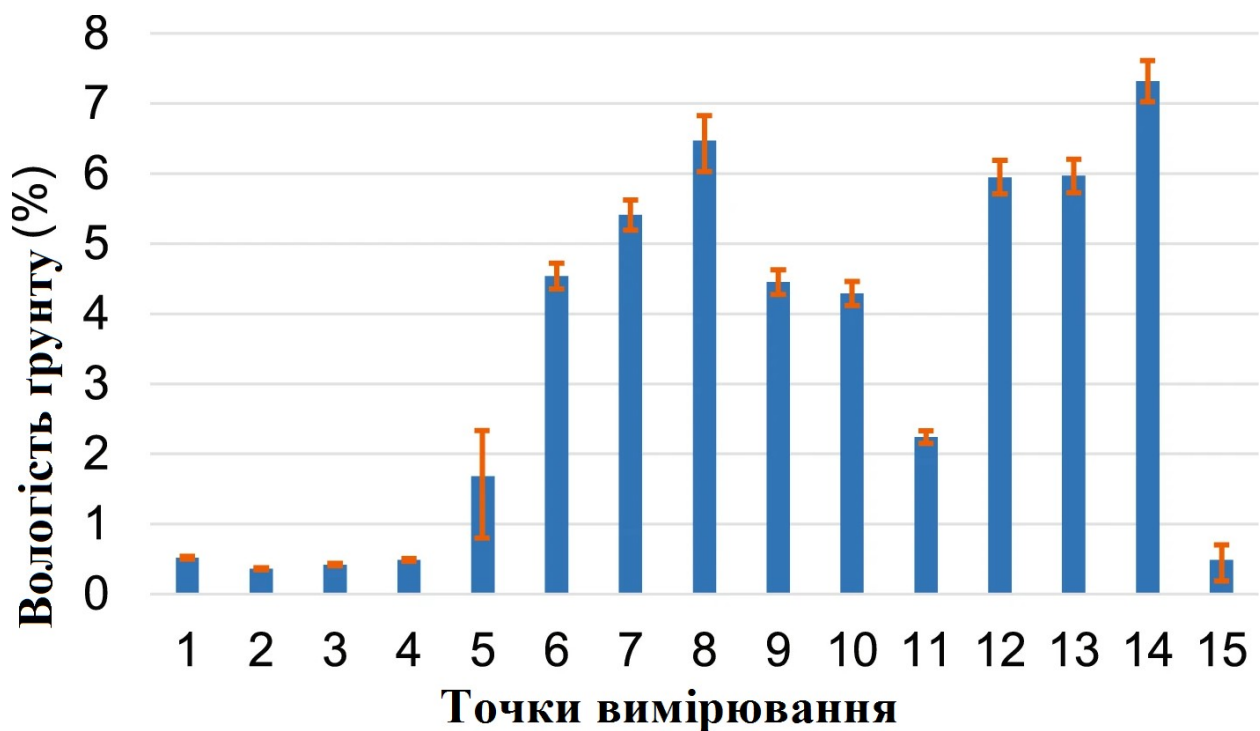


Рисунок 3.5 – Показники вологості

Щодо вологості поля, ми бачимо кілька цікавих моментів, які варто дослідити. Ми бачимо, що для ранніх точок вологість ґрунту була надзвичайно низькою, тоді як для точки 14 вологість була значно вищою. Дивлячись на точку 3, яку показано на рисунок 3.6 а, ми бачимо, що ґрунт там дуже сухий і має великі тріщини, що проходять крізь нього через навантаження, спричинене низьким вмістом води.

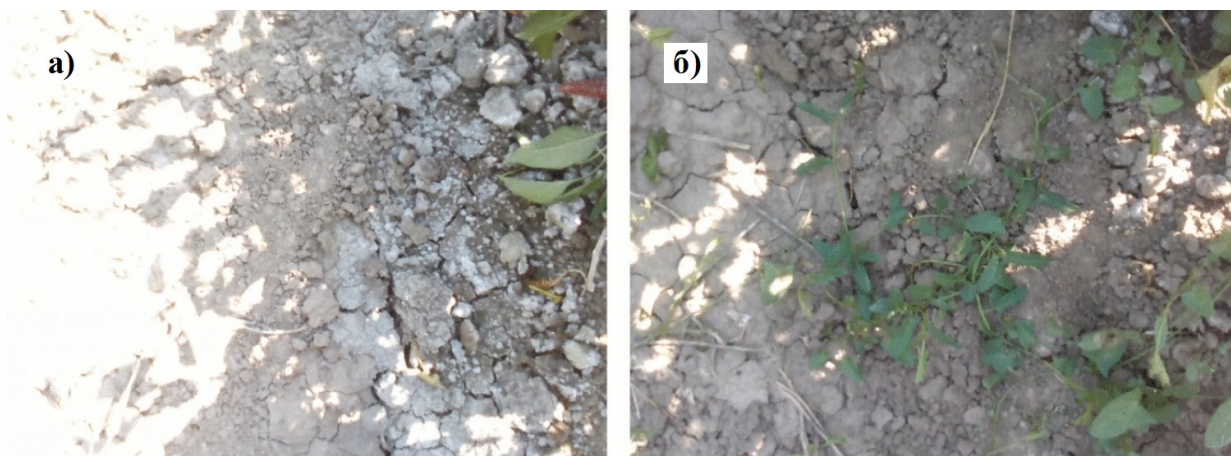


Рисунок 3.6 – а) точка 3, низький вміст води та б) точка 14, високий вміст води

Як показано на рисунок 3.6 б), переходячи до точки 14, ми бачимо, що візуально існує велика різниця у вмісті вологи в ґрунті. Точка 14 мала набагато більший рослинний полог, ніж точка 3, тому було більше тіні, щоб запобігти випаровуванню вологи з ґрунту. Там також було більше бур'янів на землі, що знову ж таки допоможе захистити вологу ґрунту від сонця. З польових випробувань роботизованої системи стало зрозуміло, що наявність попередньо встановлених сценаріїв не є ідеальною, і що система повинна мати можливість адаптуватися до безлічі різних середовищ (тобто автономно враховувати особливості середовища). З цієї причини було виконано додаткову роботу для додавання подальшої логіки до процесу захоплення зображень та вставки ґрунту.

3.2 Захоплення зображень з урахуванням екологічних факторів

Для створення роботизованої системи захоплення зображень, яка може адаптуватися до умов сільськогосподарського середовища, таких як зміна розміру сільськогосподарських рослин протягом сезону, як показано на рисунку 3.7, ідеально було б виконати два різні завдання:

- виявити верхівку рослини та зобразити/виміряти, де знаходиться верхівка крони,
- виявити корінь рослини, щоб можна було змінити введення ґрунту, щоб цільово вплинути на корінь рослини.

Ці два завдання надають інформацію планувальнику роботизованої руки для коригування положення кінцевого ефектора та діапазону руху зап'ястя для захоплення зображень, налаштованих відповідно до розміру сільськогосподарської рослини. Крім того, було б можливим визначення інших фізіологічних особливостей сільськогосподарської рослини, таких як висота та ширина.

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Арку
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.7 – Просторово-часові зміни фізичних характеристик рослин перцю чилі протягом вегетаційного періоду

Щоб виявити верхівку рослини, спочатку кінцевий ефектор переміщують у початкове положення (це положення було визначено на основі типової форми та геометрії середовища вирощування перцю чилі). У цьому початковому положенні робиться перше зображення. Приклад цього зображення показано на рисунок 3.8 а.

Після зйомки зображення застосовується кольоровий фільтр [тобто модель відтінку, насиченості, значення (HSV)], щоб спробувати захопити все листя на зображенні, як показано на рисунок 3.8 б. Цей метод дозволяє виявляти об'єкт певного кольору (тобто в цьому випадку листя певного спектру зеленого кольору) та одночасно зменшувати вплив інтенсивності світла ззовні [4, 7]. Білий колір позначає, де значення HSV нагадують листок. На рисунок 3.8 в) показано накладання відфільтрованого зображення на оригінальне зображення, щоб краще показати, які області виявляються.

З цієї точки значення пікселів збираються в матрицю, і обчислюється середнє значення та стандартне відхилення пікселів. Потім обчислюється лінія, під якою лежать 2 стандартні відхилення пікселів, яка потім стає нашим виявленим горизонтом, показаним на рисунку 3.8 г блакитною лінією у верхній частині зображення.

Оскільки виявлена верхівка рослини не знаходиться в центрі зображення, положення кінцевого ефектора має збільшитися по висоті. Щоб розрахувати необхідну зміну висоти, ми використовуємо відоме поле зору камери та розмір зображення для отримання необхідного коригування. Кількість градусів на піксель показано нижче.

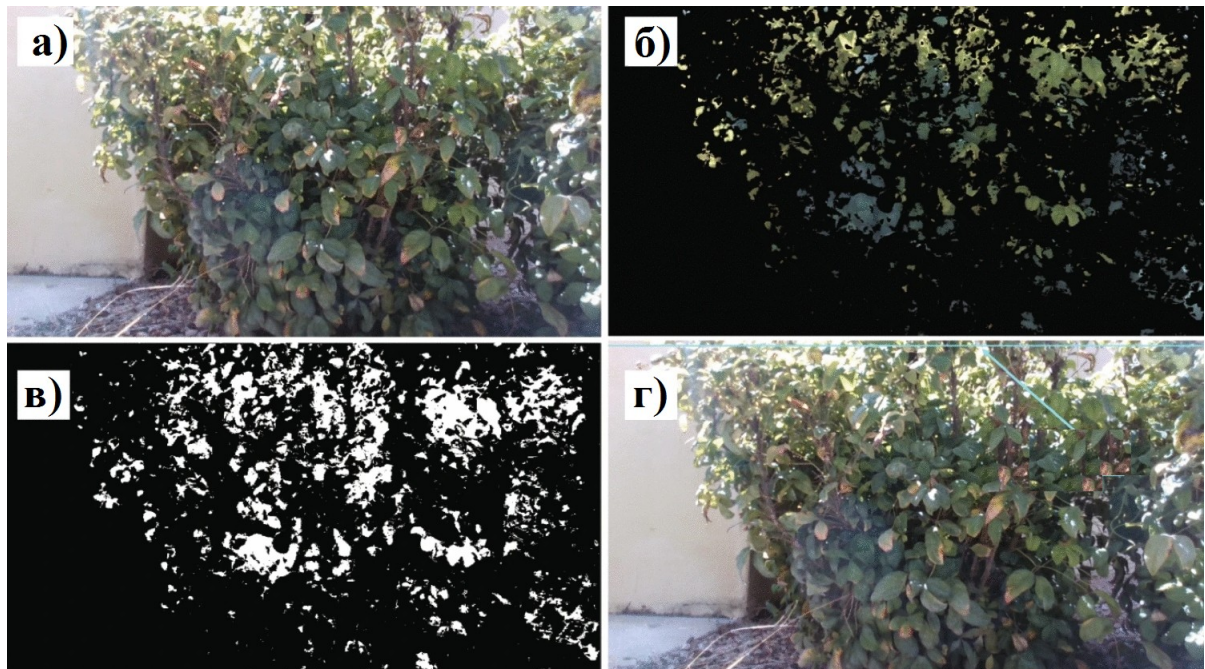


Рисунок 3.8 – а) Приклад зображення з інтелектуальним виявленням, б) зображення з виявленим листям, в) накладання кольорового фільтра на оригінальне зображення та г) виявлення верхівки рослини.

Схема виявлення рослини та конфігурація робота показані на рисунку 3.9. Процес виявлення кореня рослини в основному такий самий, проте замість виявлення лінії, де 2 стандартні відхилення знаходяться нижче неї, знаходить лінію, де 2 стандартні відхилення знаходяться вище неї.

На рисунку 3.10 а-г показано виявлення кореня рослини.

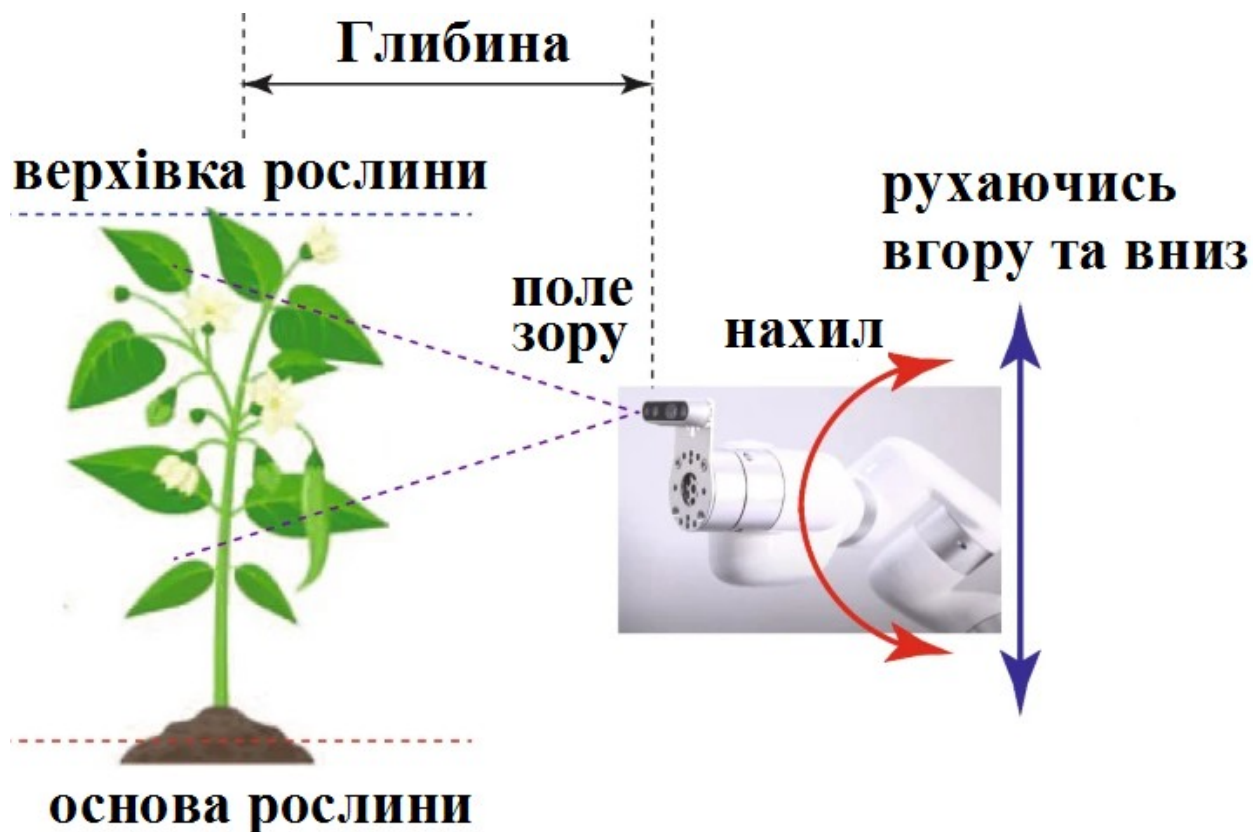


Рисунок 3.9 – Виявлення верхівки рослини та кут, виміряний від верхівки рослини

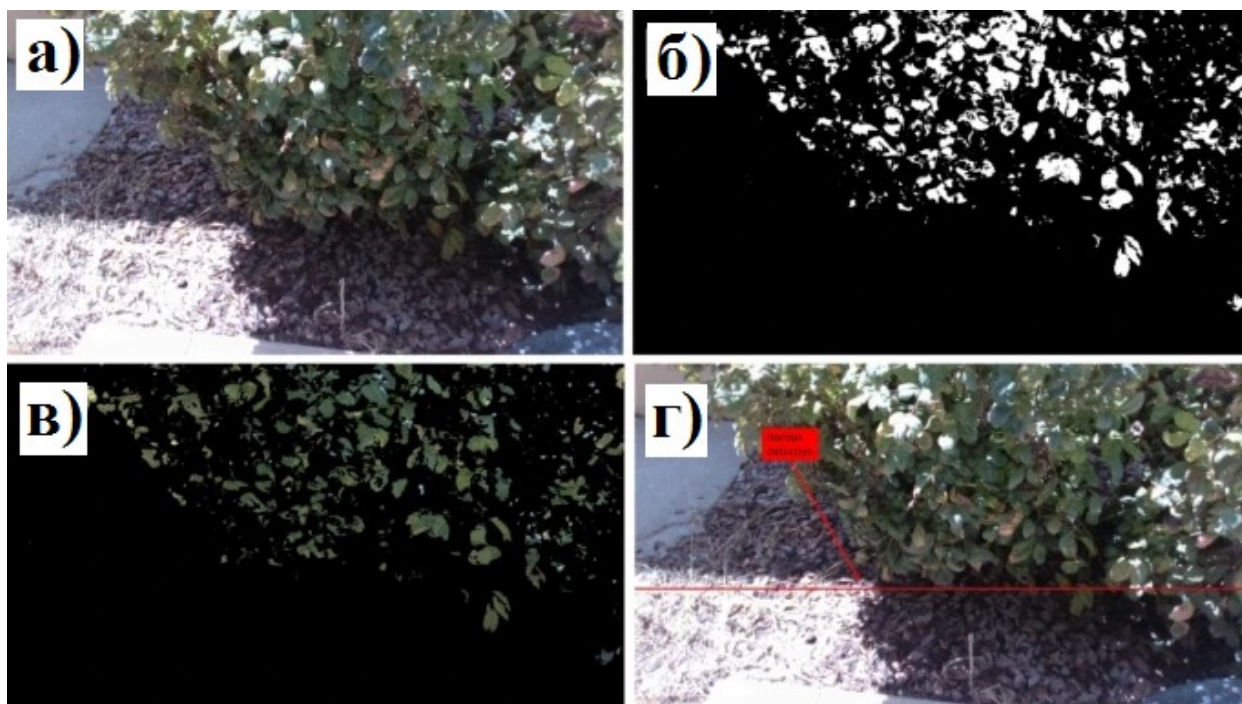


Рисунок 3.10 – Приклад обробки зображень для виявлення коренів: а) оригінальне зображення рослини, б) маска, створена на основі кольору листя,

в) накладання маски та фільтрація листя від решти зображення, та г) виявлення розташування кореня.

Алгоритм було запущено з роботом тричі (рисунок 3.11 а, б, в, г), і розрахункова висота на основі алгоритму обробки зображення (рисунок 3.11 д, е) становила 916,5 мм у середньому значенні зі стандартним відхиленням. Менша точність у цьому випадку порівняно з випадком малої рослини може бути пов'язана з кількома факторами, включаючи суцільний (структурний) фон зображення, який, перебуваючи в тіні, змінюватиме світлові ефекти на зображенні, та менш щільне листя на верхівці рослини. Точне налаштування коду на основі великої колекції даних у різних умовах освітлення може покращити точність та повторюваність процесу.

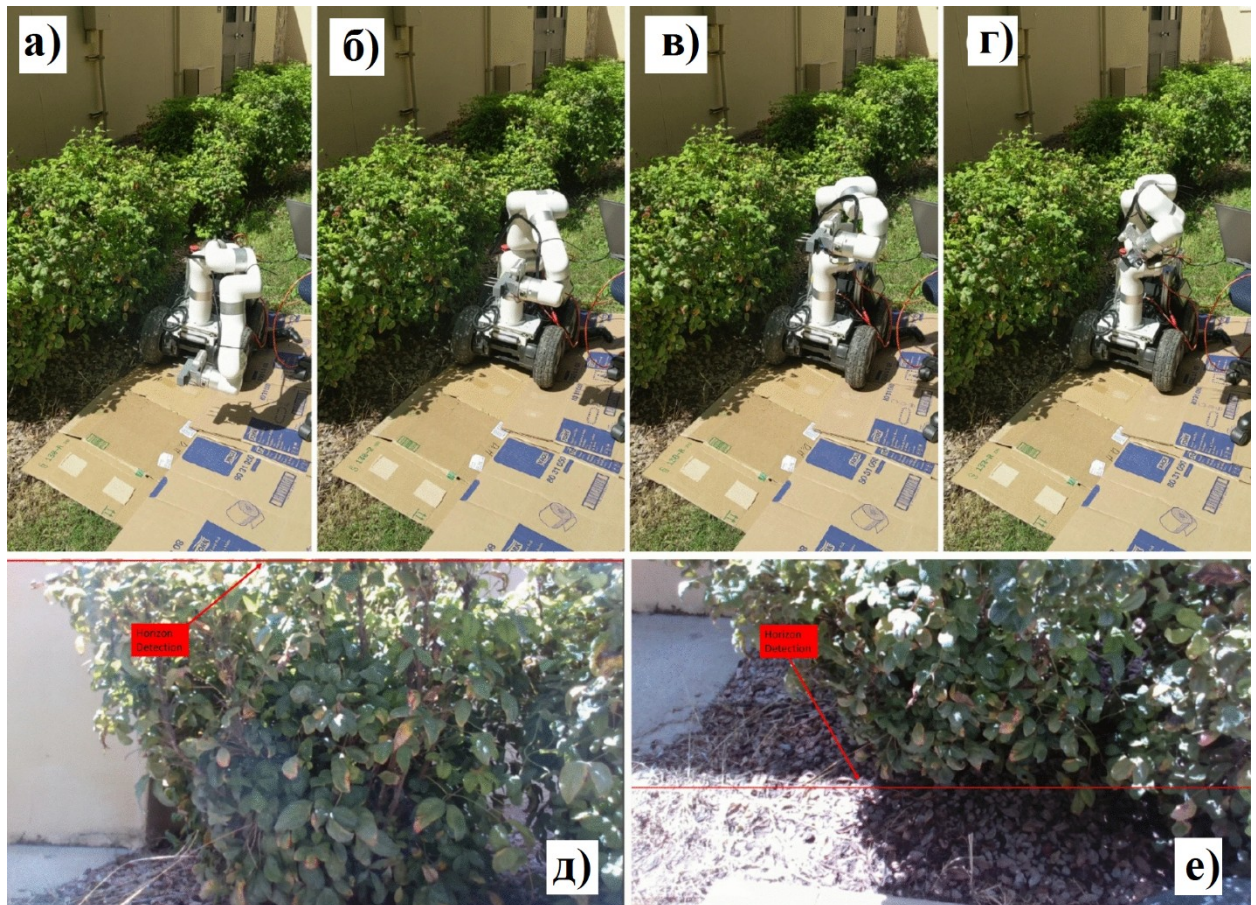


Рисунок 3.10 – Тестування великих кущів: а) початкова конфігурація маніпулятора робота для процесу виявлення рослин, б) перший крок налаштування маніпулятора робота для визначення висоти, в) другий крок налаштування маніпулятора робота для визначення висоти, г) камера нахилу

для виявлення коренів, д) результат для верхньої частини рослини та е) результат для нижньої частини рослини.

3.3 Екологічно свідоме автономне внесення ґрунту

Інтелектуальне внесення використовує камеру, прикріплену до зап'ястя робота-маніпулятора, для визначення нахилу ґрунту. Після виявлення нахилу ґрунту кінцевий ефектор налаштовується таким чином, щоб процес внесення ґрунту був повністю перпендикулярним до ґрунту. Першим кроком у процесі внесення ґрунту є переміщення камери та інструменту над ґрунтом та орієнтація їх так, щоб вони вказували на область, де відбуватиметься внесення ґрунту. Потім відстань до потрібної точки вимірюється за допомогою камери глибини та перетворюється в універсальну рамку.

Для розрахунку нахилу ґрунту зображення глибини ґрунту розбивається на дві окремі області: верхнє значення та нижнє значення. На рисунку 3.11 показано, як камера здатна визначати верхнє та нижнє значення. За цими значеннями можна визначити нахил, оскільки координати цих точок відомі. Потім кінцевий ефектор нахиляється відповідно до нахилу ґрунту.

Експериментальні випробування були проведені для демонстрації внесення ґрунту в лабораторії (в приміщенні). Роботизована система спочатку рухалася над ґрунтом і захопила зображення глибини ґрунту, як показано на рисунку 3.12 а – г. На рисунку 3.12 б показано, як градієнт схилу змінюється від жовтого до зеленого, що показує, що відстань не є постійною, і тому ґрунт знаходиться на схилі. Звідси кінцевий ефектор робота змінюється відповідно до схилу ґрунту.

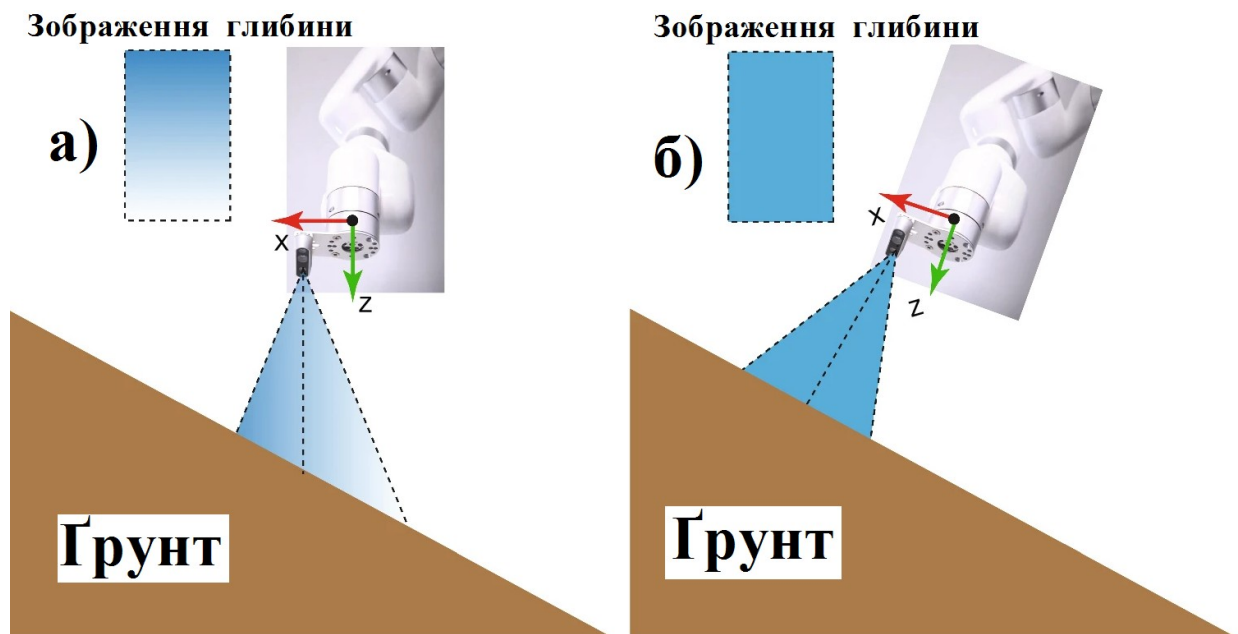


Рисунок 3.11 – Процес виявлення нахилу, а до коригування орієнтації робота та б після коригування орієнтації робота

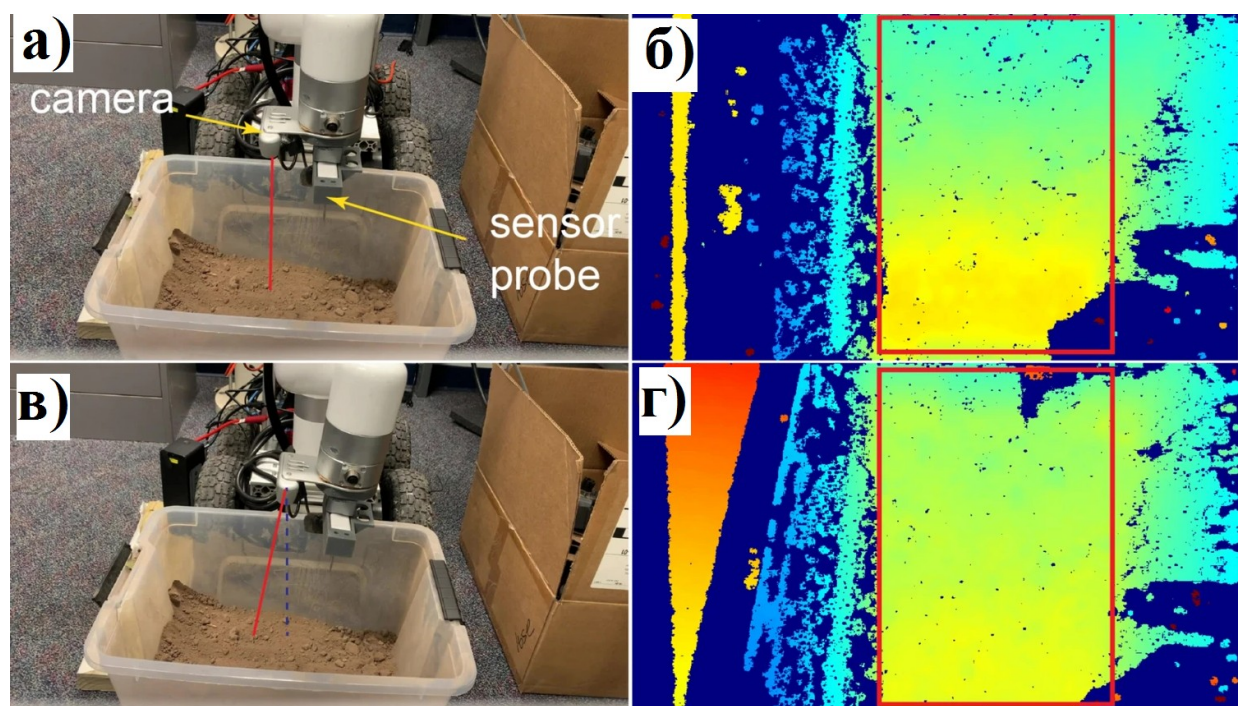


Рисунок 3.12 – а) Робот вимірює нахил ґрунту у випадку великого схилу, б) зображення глибини схилу до коригування, в) робот вимірює нахил ґрунту після коригування у випадку великого схилу та г) зображення глибини схилу після коригування

Після зміни кінцевого ефектора (рисунок 3.12 в) робот робить ще одне зображення глибини, яке показано на рисунок 3.12 г. Як показано, цього разу колір більш рівномірний, що показує, що відстань до ґрунту така ж, оскільки тепер вона перпендикулярна до камери. У цей момент відстань до ґрунту буде повторно виміряна за допомогою камери глибини, а зонд вологості ґрунту буде введений у ґрунт. Це допомагає забезпечити повністю рівне введення ґрунту в ґрунт, що підвищує точність вимірювання вологості ґрунту.

На цьому етапі система виконує фінальне вимірювання відстані та здійснює занурення щупа вологості. Забезпечення повного прилягання корпусу датчика до ґрунту («flush insertion») є критичним фактором для підвищення точності вимірювання об'ємної вологості та електропровідності.

Реалізація алгоритму адаптивного занурення («Smart Insertion») базується на використанні даних RGB-D камери, закріпленої на «зап'ясті» (останній ланці) маніпулятора. Ключовою вимогою процесу є забезпечення орієнтації енд-ефектора строго по нормалі до поверхні ґрунту, що дозволяє уникнути пошкодження датчиків та отримати коректні дані.

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Арку
						щ 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У цій роботі досліджується здатність роботизованих систем вставляти зонд вологості ґрунту для збору даних про температуру та вологість на сільськогосподарському полі. У системі до колісної основи було прикріплено набагато спритніший роботизований маніпулятор із 6 ступенями вільності.

Ця система була набагато потужнішою, ніж наша попередня система, і могла виконувати різні завдання. Ці додаткові завдання включають зйомку зображень посівів у полі за допомогою алгоритмів інтелектуального виявлення для виявлення рослини та її кореня, а також здатність більш адекватно виконувати процес внесення в ґрунт на похилій місцевості за допомогою камери, прикріпленої до зап'ястя.

Вимірювання вмісту вологості та температури ґрунту проводилися для 15 точок вздовж ряду поля, зібрані дані загалом демонструють узгодженість з дуже низьким відхиленням (менше 3%) для вологості та температури ґрунту, причому в кількох точках вимірювання стандартне відхилення, за розрахунками, було відносно більшим, ніж в інших точках.

Щодо процесу виявлення верхівки та основи рослини, то для двох тестів, проведених для рослин різних розмірів, результати отримані з рівнем похибки 1,9% та стандартним відхиленням 1,1% для меншої рослини та рівнем похибки 2,5% та стандартним відхиленням 1,6% для більшої рослини. Крім того, ми покладалися на якісну оцінку на основі фактичних ліній виявлення, побудованих алгоритмом на зібраних зображеннях. З іншого боку, загальний середній час відбору проб становив 78 секунд серед 15 точок відбору проб з діапазоном від 73 до 97 секунд.

Основними факторами, що впливають на необхідний час у цьому процесі, є умови освітлення в місці відбору проб (рівень тіні) та властивості ґрунту (твердість/м'якість, вологий або сухий). У лабораторних умовах ми досліджували введення ґрунту в похилій ґрунт, яке повторювали для різних

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Арку
						ш 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

схилів (відносно малого, середнього та великого). Результати демонструють надійність та надійність розробленого алгоритму при введенні наших кінцевих ефекторних зондів у ґрунт з різним нахилом. У нашій майбутній роботі ми додамо до кінцевого ефектора датчик крутного моменту/сили (6-осьовий тензодатчик), який вимірює опір ґрунту та допоможе використовувати алгоритм керування імпедансом на додаток до існуючих методів на основі зору для забезпечення ефективного внесення ґрунту.

Можливо, буде проведено додаткову роботу над тим, щоб зробити цю систему більш автономною. Наразі система здатна повністю самостійно виконувати внесення ґрунту та захоплення зображень, проте ідеальна система зможе картографувати, локалізувати та орієнтуватися в полі без необхідності участі людини-пілота для керування нею. Ця автономна навігація вимагатиме додаткових можливостей, адаптованих до роботизованої системи, що дозволить роботу локалізуватися в полі та навколишньому середовищі, а також слідувати запланованим шляхом вздовж рядів культур на нерівній місцевості. Можливо, також знадобиться розробити додаткові алгоритми, щоб допомогти роботі локалізуватися локально в постійно зростаючому полі.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Впровадження роботизованих комплексів у сільське господарство змінює структуру професійних ризиків: зменшується частка важкої фізичної праці, проте виникають нові загрози, пов'язані з автономністю машин, використанням потужних акумуляторних батарей та складної електроніки. Цей розділ присвячено аналізу небезпек та розробці заходів безпеки при експлуатації досліджуваного мобільного робота-скаута.

4.1. Аналіз небезпечних факторів при експлуатації мобільних агророботів

Згідно з ДСТУ EN ISO 12100:2016, при експлуатації наземної роботизованої платформи (UGV) на працівників (операторів, агрономів, технічний персонал) можуть впливати наступні групи небезпечних та шкідливих виробничих факторів:

1. Механічні небезпеки:

- рухомі частини маніпулятора: 6-ступеневий маніпулятор (xArm6) має робочу зону радіусом 700 мм і здатен розвивати швидкість до 1 м/с. Несподіваний рух «руки» може призвести до удару або затиснення кінцівок персоналу;
- наїзд платформи: При автономному русі існує ризик зіткнення робота з людьми, які перебувають у міжрядді, особливо якщо вони знаходяться у «сліпій зоні» лідара або датчиків;

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4			
Розроб.		Ремнев Ю.В.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.			Літ. Аркуш Аркушів 60 куш В			

– гострі елементи: Енд-ефектор оснащений металевим щупом (TEROS 12), який при необережному поводженні може спричинити колючі травми.

2. Електричні небезпеки:

Ураження електричним струмом: робот живиться від високовольтних літій-полімерних (LiPo) батарей (22.2 В) з високою силою струму розряду. Пошкодження ізоляції в польових умовах (волога, тертя) може призвести до короткого замикання та термічних опіків.

3. Небезпеки середовища (Мікроклімат):

Робота виконується на відкритому ґрунті (в полі) у літній період. На оператора можуть впливати: підвищена температура повітря (сонячний удар), пил, підвищена вологість або опади.

4. Психофізіологічні фактори:

Нервово-психічне перевантаження оператора через необхідність постійної концентрації уваги при дистанційному керуванні та моніторингу телеметрії.

Для мінімізації механічних ризиків, згідно з ISO 18497, навколо робота програмно встановлено віртуальні зони безпеки (Safety Zones). При порушенні людиною межі зони (ближче 1,5 м) робот автоматично зупиняється.

4.2 Заходи електробезпеки при роботі з автономними системами живлення

Розроблювана система відноситься до електроустановок напругою до 1000 В (фактично – 24 В постійного струму), що згідно з ПУЕ класифікується як система з наднизькою напругою (SELV), яка є умовно безпечною для життя. Проте, висока енергоємність LiPo-акумуляторів (12000 mAh) створює специфічні ризики.

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		ш 61

Основні технічні заходи електробезпеки:

1. Ступінь захисту оболонки (IP Protection): Всі електричні вузли (контролери, драйвери моторів, акумуляторний відсік) розміщені у герметичних корпусах із класом захисту не нижче IP65 (за ДСТУ EN 60529:2018), що унеможливорює потрапляння пилу та вологи (дощу, роси) на струмопровідні частини.

2. Захист від короткого замикання: Силова лінія акумулятора оснащена плавкими запобіжниками або автоматичними вимикачами постійного струму, розрахованими на номінальне навантаження системи.

3. Аварійне відключення (E-Stop) (рисунок 4.1): Робот обладнано грибоподібною кнопкою аварійної зупинки (Emergency Stop), яка реалізована на апаратному рівні. Натискання кнопки фізично розриває ланцюг живлення силових приводів (платформи та маніпулятора), незалежно від стану програмного забезпечення.

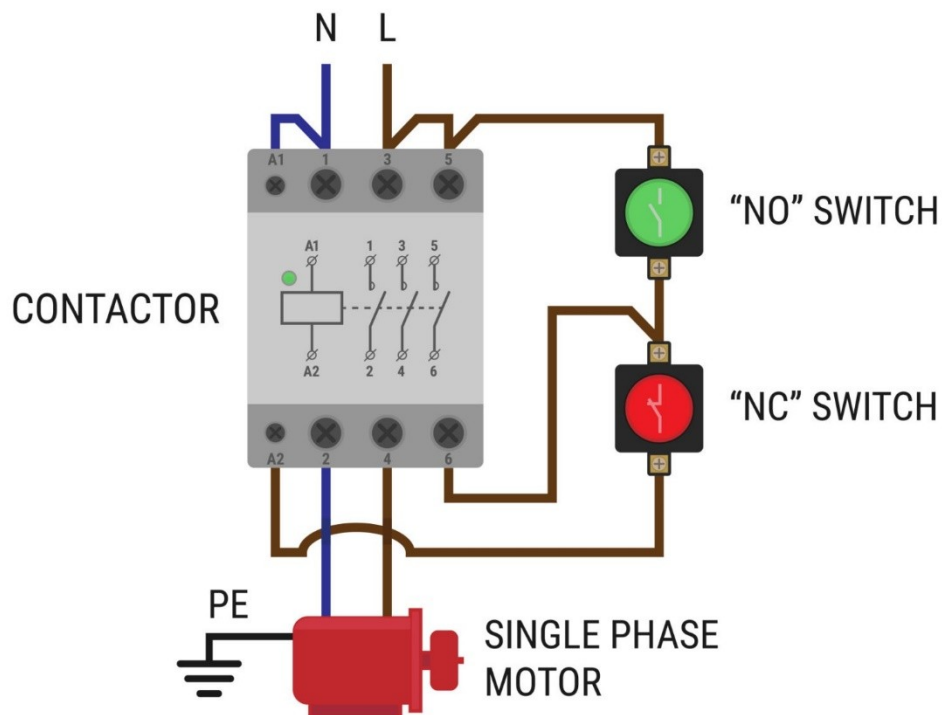


Рисунок 4.1 – Схема конфігурації віртуальних зон безпеки (Safety Zones) автономного робота згідно з вимогами ISO 18497

4. **Безпека акумуляторів (BMS):** Використовується «розумна» батарея (Smart Battery) з вбудованою системою керування (BMS), яка моніторить напругу на кожній комірці (cell), запобігаючи перезаряду,

					14.17 - KP.017.4.000 ПЗ	Арху
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Ш 62

глибокому розряду та перегріву. Зарядка акумуляторів повинна проводитися лише спеціалізованими зарядними пристроями у присутності персоналу.

4.3 Ергономічні вимоги до організації дистанційного робочого місця оператора

Оскільки керування роботом здійснюється дистанційно (або в напіваавтономному режимі), робочим місцем оператора є мобільний пост керування (наприклад, ноутбук або планшет у польових умовах, або стаціонарний ПК в офісі).

Згідно з ДСТУ 8855:2019 (Ергономіка) та ISO 9241, до організації робочого місця висуваються такі вимоги:

1. Інтерфейс користувача (GUI):
 - візуалізація даних повинна бути структурованою. Екран не повинен бути перевантаженим зайвою технічною інформацією. Пріоритет надається відеопотоку з камер та індикаторам статусу системи («Норма», «Помилка», «Заряд АКБ»);
 - затримка відеосигналу (latency) має бути мінімальною (< 200 мс), щоб уникнути ефекту «морської хвороби» (кібер-захитування) у оператора та забезпечити точність керування.
2. Умови роботи на полі:
 - при роботі на відкритому сонці оператор повинен використовувати захисний козирок для екрану (Sun Hood) для запобігання блікам, які підвищують навантаження на зір.
 - робоче місце (якщо це стаціонарний пункт у полі) має бути обладнане затіненням (тент) та зручним сидінням для запобігання втоми опорно-рухового апарату.

4.4 Пожежна безпека при польових роботах

Експлуатація робота на полях з перцем (особливо в суху погоду, коли на ґрунті можуть бути залишки сухої рослинності/мульчі) створює ризик виникнення пожежі. Основним джерелом запалювання є LiPo-акумулятори та перегріті електродвигуни.

Заходи пожежної безпеки (згідно з НАПБ А.01.001-2014):

1. Конструктивні заходи:

- акумуляторний відсік має бути відокремлений від легкозаймистих елементів конструкції негорючими перегородками.
- необхідно регулярно очищувати осі коліс та радіатори охолодження електроніки від намотаної сухої трави та пилу, які можуть спалахнути від нагріву.

2. Дії при займанні LiPo-батареї:

- літєві акумулятори горять інтенсивно, з виділенням токсичних газів, і їх важко загасити водою (реакція літію);
- оператор повинен мати при собі вогнегасник класу D (для металів) або вуглекислотний вогнегасник (ОУ-2/ОУ-3) для гасіння електрообладнання;
- у разі виявлення диму або різкого підвищення температури батареї (сигнал від BMS), робот необхідно негайно знеструмити та, за можливості, ізолювати акумулятор (відкинути на безпечну відстань від сухої трави).

3. Зберігання та транспортування:

Запасні акумулятори повинні транспортуватися у спеціальних вогнетривких мішках (LiPo Safe Bag) або металевих контейнерах.

Розроблені заходи технічної безпеки, що включають використання захищених корпусів, системи аварійної зупинки, BMS-контролерів та ергономічного інтерфейсу, дозволяють мінімізувати ризики для персоналу та забезпечити безпечну експлуатацію роботизованої системи в польових

умовах.

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Арку
						ш 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У четвертому розділі магістерської роботи здійснено комплексний аналіз питань охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при проєктуванні та експлуатації наземної роботизованої системи для моніторингу посівів перцю. За результатами проведеного дослідження зроблено наступні висновки:

1. Ідентифікація небезпек. Встановлено, що основними небезпечними виробничими факторами при роботі з мобільним агророботом є механічні (ризик наїзду платформи на персонал, травмування рухомими ланками маніпулятора xArm6) та електричні (ризик короткого замикання високоємних акумуляторних батарей). Специфіка польових робіт додає кліматичні фактори (висока температура повітря, інсоляція), що впливають на працездатність оператора.

2. Забезпечення механічної безпеки (ISO 18497). Розроблено багаторівневу систему захисту від зіткнень, що відповідає міжнародним вимогам безпеки автономних сільськогосподарських машин. Впроваджено концепцію віртуальних зон безпеки: при виявленні лідаром перешкоди в радіусі 1,5 м («Зона попередження») робот автоматично сповільнюється та подає звуковий сигнал, а при наближенні об'єкта на відстань менше 0,5 м («Зона зупинки») відбувається екстрене гальмування.

3. Заходи електробезпеки. Обґрунтовано вибір компонентів із класом захисту оболонки IP65, що забезпечує надійну ізоляцію струмопровідних частин від потрапляння пилу та вологи в умовах відкритого ґрунту. Для запобігання ураженню електричним струмом та пошкодженню обладнання передбачено використання плавких запобіжників та BMS-контролерів для літій-полімерних батарей. Критично важливим заходом є встановлення апаратної кнопки аварійної зупинки (Emergency Stop), яка забезпечує фізичне розривання силового ланцюга живлення приводів у нештатних ситуаціях.

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

4. Ергономіка праці оператора. Визначено вимоги до організації дистанційного робочого місця. Встановлено, що для зниження психофізіологічного навантаження та зорової втоми графічний інтерфейс користувача повинен мати мінімальну затримку передачі відеопотоку та чітку індикацію статусу системи. При роботі в полі оператор повинен бути забезпечений засобами захисту від сонця (навіс, захисні козирки для екранів) для запобігання тепловим ударам та блікам на моніторах.

5. Пожежна безпека. Проаналізовано ризики виникнення пожежі через займання LiPo-акумуляторів або контакт розігрітих вузлів робота із сухою рослинністю. Розроблено інструкцію дій у надзвичайних ситуаціях, яка передбачає наявність вуглекислотних вогнегасників та регулярне технічне обслуговування системи охолодження робота.

Таким чином, запропонований комплекс організаційних та інженерно-технічних заходів дозволяє мінімізувати виробничі ризики та забезпечити безпечні умови праці як для оператора, так і для польового персоналу при впровадженні розробленої роботизованої системи в агровиробництво.

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Арку
						ш
Зм.	Арку.	№ докум.	Підпис	Дата		66

РОЗДІЛ 5

СТАРТАП-ПРОЄКТ: СИСТЕМА АВТОНОМНОГО МОНІТОРИНГУ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

5.1 Маркетинговий аналіз ринку агроробототехніки

Аналіз ринкового середовища: Ринок овочівництва в Україні (зокрема, вирощування перцю, томатів, баклажанів) характеризується високою інтенсивністю праці. Станом на 2024 рік, галузь відчуває гострий дефіцит кваліфікованих кадрів (агрономів-скаутів) та сезонних робітників. Традиційні методи моніторингу (ручний обхід полів) стають економічно не вигідними через низьку швидкість та суб'єктивність даних.

Цільова аудиторія (Customer Segments):

- 1. Середні та великі фермерські господарства (площа під овочами > 10 га), які використовують інтенсивні технології (крапельне зрошення).
- 2. Тепличні комбінати, де критично важливим є постійний контроль мікроклімату та стану рослин.
- 3. Агрохолдинги, що потребують цифровізації полів для інтеграції в ERP-системи.

Впровадження роботизованих систем у сільське господарство є глобальним трендом, що зумовлений необхідністю підвищення ефективності виробництва на фоні дефіциту трудових ресурсів та змін клімату. У цьому розділі представлено бізнес-обґрунтування розробленої системи моніторингу як інноваційного стартапу.

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ремнев Ю.В.			РОЗДІЛ 5		Літ.	Аркуш
Перевір.		Дядюра К.О.						Аркушів
Реценз.								67
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.					В	

Ринок агроробототехніки переживає стрімке зростання, зумовлене потребою у підвищенні продуктивності, дефіцитом робочої сили та вимогами до сталого розвитку. За прогнозами, світовий ринок досягне \$20.6 млрд до 2025 року та перевищить \$20 млрд до 2035 року.

Ключові драйвери ринку:

Економія ресурсів та підвищення ефективності: Технології дозволяють зменшити використання гербіцидів до 80-90% та підвищити врожайність на 10-30%.

Подолання дефіциту робочої сили: роботи можуть замінити до 6 працівників на монотонних операціях, працюючи цілодобово.

Доступність технологій: поширення IoT, GPS та комп'ютерного зору знижує бар'єри для впровадження.

Екологічна стійкість: точне землеробство мінімізує хімічне навантаження на ґрунт та скорочує вуглецевий слід.

Конкурентний аналіз: На ринку присутні альтернативні рішення:

- дрони (БПЛА): Забезпечують швидкий огляд, але не можуть оцінити вологість кореневого шару ґрунту та побачити хвороби під листям;
- стаціонарні IoT-станції: Дають точні дані, але лише в одній точці, не покриваючи варіабельність поля;
- ручна праця: Дорого, повільно, дефіцитно.

Конкурентне середовище та позиціонування:

Лідери ринку: великі виробники сільгосптехніки (John Deere, Kubota) інтегрують ІІІ у свою техніку.

Спеціалізовані рішення: компанії (Naïo Technologies, Ecorobotix, Agribotix) пропонують рішення для конкретних задач: прополка, моніторинг, збір ягід.

Український контекст: існують розробки, як-от роботизована платформа "Скорпіон-2", що демонструє попит на локальні рішення.

Для нового проекту система автономного моніторингу може ефективно позиціонуватися в сегменті **малих та середніх господарств**, пропонуючи їм

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Арку
						ш 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

доступні за моделлю підписки рішення, які раніше були доступні лише великим холдингам.

5.2 Розробка бізнес-моделі комерціалізації системи моніторингу

Для успішної комерціалізації системи моніторингу пропонується гібридна бізнес-модель, що поєднує продаж апаратної частини з програмною підпискою (модель "продукт як послуга" – PaaS) (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Характеристика основних елементів бізнес-моделі стартап-проєкту

Елемент бізнес-моделі	Опис та реалізація
Цінні пропозиції	1. Комплексний моніторинг: автономний робот/дрон зі ШІ для аналізу стану культур, вологості ґрунту, виявлення шкідників та хвороб. 2. Платформа аналітики: хмарна система з інтуїтивним інтерфейсом, яка надає миттєві рекомендації щодо іригації, внесення добрив тощо. 3. Інтеграція з екосистемою: можливість підключення до існуючих фермерських платформ (Agro VI, TopAgro) для єдиного аналітичного звіту.
Цільові клієнти	1. Малі та середні фермерські господарства (основна ціль): кому потрібна доступна технологія без великих капіталовкладень. 2. Великі агрохолдинги: для масштабного моніторингу окремих ділянок або як доповнення до існуючих систем. 3. Агросервісні компанії: для надання послуг моніторингу своїм клієнтам.
Канали збуту	1. Прямі продажі через власний сайт та call-центр. 2. Партнерська мережа через дилерів сільгосптехніки та

Елемент бізнес-моделі	Опис та реалізація
	дистриб'юторів насіння/ЗЗР. 3. Співпраця з ІТ-платформами для аграріїв (наприклад, AgriAnalytica), де можна розмістити послугу.
Модель монетизації	Гібридна: Разова оплата за апаратну частину (робота/дрона). Щомісячна/щорічна підписка на програмне забезпечення, аналітику, технічну підтримку та оновлення ШІ-моделей. Це створює стабільний повторюваний дохід.
Ключові ресурси	Команда розробників ШІ та робототехніків, патентовані алгоритми, серверна інфраструктура, партнерські угоди, сервісні центри.

Таблиця 5.2 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
Комплексність даних (грунт + рослина). Адаптивність до рельєфу (маніпулятор 6-DoF). Автономність (24/7). Відсутність ущільнення ґрунту (легка вага).	Обмежений час роботи від батареї (4-6 год). Висока початкова вартість прототипу. Залежність від погодних умов (сильний дощ, бруд).
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
Зростання ринку Organic Food (потреба в точному догляді). Модель RaaS (Robot as a Service) – здача в оренду. Інтеграція AI для прогнозування врожайності.	Швидке копіювання технології конкурентами (Китай). Технічні поломки в польових умовах. Складнощі з сертифікацією та сервісом.

								Арку
								70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	

Для комерціалізації проекту обрано бізнес-модель, побудовану за шаблоном Canvas.

1. Ціннісна пропозиція (Value Proposition): Ми не просто продаємо робота, ми продаємо «Гарантію врожаю через точні дані».

- економія води на 20-30% завдяки картам вологості для точного зрошення;

- раннє виявлення хвороб (економія ЗЗР до 15%)⁴

- заміна ручної праці скаутів (зниження операційних витрат).

2. Потоки доходів (Revenue Streams): Пропонується гібридна модель монетизації:

- варіант А (Прямий продаж): продаж робота + річна підписка на ПЗ (оновлення, хмарне сховище).

- варіант Б (RaaS — Robot as a Service): фермер платить не за робота, а за гектар обробленої площі або за місяць оренди. Це знижує поріг входу для клієнта. Орієнтовна вартість послуги: 500-800 грн/га за комплексний аудит.

3. Канали збуту:

- прямі продажі на агровиставках («АгроВесна», «АгроЕхро»).

- партнерство з продавцями систем крапельного зрошення (продаж робота як опції до системи поливу).

5.3 Розрахунок собівартості розробки прототипу та терміну окупності

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Арку
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок виконано для створення MVP (Minimum Viable Product) — дослідного зразка. Ціни наведено в гривнях за курсом НБУ станом на поточний період (таблиця 5.3).

Таблиця 5.3 – Калькуляція собівартості матеріальних витрат (Hardware)

№	Найменування компонента	К-сть	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	Шасі робота (4WD Rover Pro або аналог)	1	180 000	180 000
2	Маніпулятор xArm6 (Ufactory)	1	380 000	380 000
3	Камера Intel RealSense D435i (2 шт.)	2	18 000	36 000
4	Датчик ґрунту TEROS 12 + Data Logger	1	22 000	22 000
5	Бортовий комп'ютер (Intel NUC / Jetson)	1	35 000	35 000
6	Навігація (LiDAR S1 + GPS RTK + IMU)	1	45 000	45 000
7	Акумуляторна батарея (LiPo 22Ah) та BMS	1	15 000	15 000
8	Конструкційні матеріали (3D-друк, профілі)	-	10 000	10 000
Разом (Матеріальні витрати):			723 000	

Додавши витрати на розробку ПЗ, збірку та тестування (орієнтовно 30% від вартості комплектуючих при дрібносерійному виробництві), повна собівартість готового виробу становитиме близько 940 000 грн.

Розрахунок економічної ефективності для фермера (приклад):

Розглянемо господарство площею 20 га під перцем.

1. Структура витрат на розробку прототипу: витрати можна розділити на три основні категорії, враховуючи принципи калькуляції собівартості:

– прямі виробничі витрати (апаратна частина): компоненти (шасі, сенсори, камери, одноплатний комп'ютер), витрати на 3D-друк корпусу, збірку та тестування. Орієнтовно: \$8,000 – \$12,000.

– прямі виробничі витрати (програмна частина): заробітна плата команди розробників (бекенд, фронтенд, ШІ/комп'ютерний зір) протягом 6-9 місяців. Орієнтовно: \$40,000 – \$60,000.

– непрямі (накладні) витрати: аренда офісу/лабораторії, обладнання, комунальні послуги, юридичне супровід, маркетингові дослідження. Орієнтовно: \$10,000 – \$15,000.

Загальна сума інвестицій у розробку прототипу (R&D): орієнтовно \$58,000 – \$87,000.

2. Собівартість одиниці продукції та ціноутворення: після створення прототипу та переходу до серійного виробництва собівартість одиниці (COGS) знизиться. Наприклад, вартість виробництва української роботизованої платформи починається від \$50,000. Для більш легкого робота-монітора вона може становити \$15,000 – \$25,000.

Рекомендована рентабельна ціна продажу апаратної частини – \$20,000 – \$35,000. Ціна підписки на програмне забезпечення може становити \$200 – \$500/місяць залежно від площі обслуговування та глибини аналітики.

3. Розрахунок терміну окупності: для розрахунку використовується адаптована модель, що поєднує підхід для обладнання та SaaS-підписки.

– Сценарій: стартап продає 10 одиниць техніки на рік із середньою ціною \$27,500 та залучає 30 клієнтів на підписку (ARPA \$300/місяць).

– Щорічний дохід:

Від продажу: $10 \text{ од.} * \$27,500 = \$275,000$.

Від підписки: $30 \text{ клієнтів} * \$300 * 12 \text{ місяців} = \$108,000$.

Разом: \$383,000.

– Щорічні операційні витрати (виробництво, маркетинг, зарплата, амортизація R&D): Орієнтовно \$250,000.

– Щорічний чистий прибуток до оподаткування:

$\$383,000 - \$250,000 = \$133,000$.

Термін окупності інвестицій у R&D

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Арку
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(\$87,000): $\$87,000 / \$133,000 \approx 0.65$ року (близько 8 місяців).

Це оптимістичний сценарій. На практиці термін окупності може становити 1.5 – 2.5 роки залежно від швидкості виходу на ринок, ефективності маркетингу та конкуренції. Ключовим для SaaS-складової є оптимізація вартості залучення клієнта (CAC) та утримання клієнтів (LTV), оскільки саме підписка забезпечує стабільний довгостроковий потік доходів.

Проект системи автономного моніторингу є перспективним з точки зору ринкових тенденцій та потенційної окупності. Успіх залежатиме від створення надійного та корисного продукту, гнучкої моделі продажів та ефективного виходу на цільову аудиторію.

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Висновки

У шостому розділі магістерської роботи розроблено стартап-проект впровадження наземної роботизованої системи для моніторингу посівів перцю, проведено маркетинговий аналіз та техніко-економічне обґрунтування доцільності інвестицій. За результатами економічних розрахунків зроблено наступні висновки:

1. Ринкова ніша та актуальність. Маркетинговий аналіз ринку овочівництва України виявив гостру потребу в автоматизації процесів скаутингу (обстеження) полів. Встановлено, що ключовими драйверами попиту є дефіцит кваліфікованих агрономів, зростання вартості ручної праці та необхідність переходу до точного землеробства через зміни клімату. Розроблений продукт орієнтований на середні та великі фермерські господарства, які вирощують високомаржинальні культури (перець, томати) на крапельному зрошенні.

2. Конкурентоспроможність. SWOT-аналіз показав, що головною конкурентною перевагою розробленої системи перед існуючими рішеннями (БПЛА, стаціонарні датчики) є комплексність збору даних. На відміну від дронів, наземний робот забезпечує вимірювання фізико-хімічних параметрів ґрунту безпосередньо в кореневій зоні та детальне фенотипування рослин під пологом листя. Це дозволяє фермеру отримувати об'єктивну картину стану поля, недоступну для аеромоніторингу.

3. Бізнес-модель. Запропоновано гнучку модель комерціалізації, побудовану на гібридному підході. Вона передбачає як прямий продаж апаратно-програмного комплексу, так і надання послуг за моделлю RaaS (Robot as a Service — «Робот як послуга»). Впровадження підписки на програмне забезпечення та аналітику забезпечує стабільний грошовий потік (Recurring Revenue) та постійний зв'язок з клієнтом.

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Арку
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Собівартість розробки. Розрахунок витрат на створення мінімально життєздатного продукту (MVP) показав, що повна собівартість виготовлення дослідного зразка становить близько 940 000 грн. Основну частку витрат (понад 70%) складають високотехнологічні комплектуючі: маніпулятор xArm6, лідарна навігація та оптичні сенсори. При серійному виробництві очікується зниження собівартості на 15–20% за рахунок оптимізації логістики та гуртових закупівель.

5. Інвестиційна привабливість. Розрахунок економічної ефективності для кінцевого споживача (фермерського господарства площею 20 га) продемонстрував високу рентабельність впровадження системи. Економічний ефект досягається за рахунок збереження врожаю (мінімізація втрат від хвороб та водного стресу) та економії ресурсів (води, ЗЗР, фонду оплати праці). Розрахунковий термін окупності проєкту (Ток) становить 1,85 року, що є високим показником для ринку агротехніки, де прийнятним вважається термін до 3–4 років.

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

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Арку
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності моніторингу посівів перцю шляхом розробки та дослідження автономної наземної роботизованої системи. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Аналіз проблеми та обґрунтування підходу. Встановлено, що існуючі методи агромоніторингу (ручний скаутинг, стаціонарні станції, БПЛА) не забезпечують необхідної комплексності та просторової точності даних для високорентабельного овочівництва. Обґрунтовано доцільність створення мобільного маніпуляційного робота, який, на відміну від жорстких конструкцій, здатний адаптуватися до нерівностей рельєфу та виконувати контактне зондування ґрунту без пошкодження кореневої системи рослин.

2. Математичне моделювання. Розроблено математичні моделі кінематики 4-колісної мобільної платформи та 6-ступеневого маніпулятора. Вирішено пряму та обернену задачі кінематики, що дозволило скоординувати рух бази та робочого органу в єдиному просторі станів. Теоретично обґрунтовано алгоритм «Smart Insertion» (розумного занурення), який базується на розрахунку вектора нормалі до поверхні ґрунту за даними карти глибини, що забезпечує перпендикулярне введення щупа незалежно від нахилу платформи.

3. Апаратна та програмна реалізація. Спроектовано архітектуру системи керування на базі операційної системи ROS 2 (Humble).

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Ремнев Ю.В.						
Перевір.		Дядюра К.О.					77	куш
Реценз.						В		
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

Розроблено оригінальну конструкцію енд-ефектора, що інтегрує RGB-D камеру Intel RealSense, датчик вологості TEROS 12 та ультразвуковий сонар. Реалізовано алгоритми сенсорної фузії (Sensor Fusion) даних від лідара, IMU та GPS-RTK, що забезпечило точність навігації робота в міжряддях на рівні 2 см.

4. Експериментальні результати. Польові випробування підтвердили працездатність розробленої системи в реальних умовах ферми. Встановлено, що повний цикл обробки однієї точки (навігація, 15 знімків фенотипування, вимірювання ґрунту) займає в середньому 78 секунд. Хоча це повільніше за роботу оператора-людини, роботизована система забезпечує вищу повторюваність вимірювань, можливість цілодобової роботи та автоматичну геоприв'язку даних, що є критичним для систем точного землеробства.

5. Безпека експлуатації. Розроблено комплекс заходів з охорони праці згідно зі стандартом ISO 18497. Впровадження віртуальних зон безпеки та апаратної кнопки аварійної зупинки гарантує безпечну взаємодію робота з персоналом. Використання компонентів із класом захисту IP65 забезпечує надійність функціонування системи в умовах запиленості та вологості.

6. Економічна ефективність. Техніко-економічне обґрунтування стартап-проєкту довело комерційну привабливість розробки. Розрахункова собівартість прототипу становить близько 940 тис. грн. Термін окупності для середнього фермерського господарства (площею 20 га) за рахунок економії ресурсів та збереження врожаю складає 1,85 року. Запропонована бізнес-модель (прямі продажі та RaaS) відповідає сучасним вимогам ринку агротехнологій.

Рекомендації щодо використання. Розроблену систему рекомендовано до впровадження у господарствах, що спеціалізуються на вирощуванні овочевих культур у відкритому ґрунті із застосуванням крапельного зрошення, а також у селекційних центрах для автоматизованого фенотипування нових сортів рослин.

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ	Арку
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Linford B., Haghshenas-Jaryani M. A ground robotic system for crops and soil monitoring and data collection in New Mexico chile pepper farms. Discover Mechanical Engineering. 2024. Vol. 3. Article number 6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00113-3>.
2. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. Biosystems Engineering. 2016. Vol. 149. P. 94–111.
3. Shamshiri R. R. et al. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018. Vol. 11, No. 4. P. 1–14.
4. Ярощук С. В. Науково-прикладні основи використання робототехнічних систем в точному землеробстві: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Київ, 2019. 385 с.
5. Бондаренко Г. Л., Яковенко К. І. Методика дослідної справи в овочівництві і баштанництві. Харків : Основа, 2001. 369 с.
6. ISO 18497:2018. Agricultural machinery and tractors — Safety of highly automated agricultural machines. Geneva : ISO, 2018. 42 p.
7. ДСТУ EN ISO 10218-1:2016. Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги безпеки до промислових роботів. Частина 1: Роботи (EN ISO 10218-1:2011, IDT; ISO 10218-1:2011, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 54 с.
8. ДСТУ EN ISO 9283:2005. Маніпулювальні промислові роботи. Робочі характеристики та відповідні методи тестування (EN ISO 9283:1998, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 82 с.
9. ДСТУ EN 60529:2018. Ступені захисту, що забезпечуються кожухами (Код IP) (EN 60529:1991; A1:2000; A2:2013, IDT; IEC 60529:1989; A1:1999; A2:2013, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 46 с.

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Ремнев Ю.В.					79	куш
Перевір.		Дядюра К.О.						в
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

10. xArm User Manual. Shenzhen : UFACTORY Technology Co., Ltd, 2022. 128 p. URL: <https://www.ufactory.cc/xarm-download/> (дата звернення: 10.05.2025).

11. TEROs 11/12 Integrator Guide. Pullman : METER Group, Inc., 2021. 25 p. URL: <http://publications.metergroup.com/Integrator%20Guides/18224%20TEROS%2011-12%20Integrator%20Guide.pdf> (дата звернення: 12.05.2025).

12. Intel RealSense D400 Series Product Family Datasheet. Santa Clara : Intel Corporation, 2023. 115 p.

13. Macenski S. et al. Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild. Science Robotics. 2022. Vol. 7, Issue 66.

14. Oliveira L. F. P., Moreira A. P., Silva M. F. Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead. Robotics. 2021. Vol. 10, No. 2. P. 52.

15. Voyles R. M., Bae J. J. Terminology for the characteristic of manipulators. Springer Handbook of Robotics / eds. B. Siciliano, O. Khatib. Berlin, Heidelberg : Springer, 2016. P. 15–33.

16. Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 4th ed. Upper Saddle River : Pearson, 2018. 420 p.

17. RPLIDAR S1 Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner Introduction and Datasheet. Shanghai : Slamtec Co., Ltd, 2021. 18 p.

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

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

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

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

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

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

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

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ	Арку
						ш 81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		