

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

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

_____ Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

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

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТИЗОВАНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ТОЧНОГО ВНЕСЕННЯ РІДКИХ ОРГАНІЧНИХ ДОБРИВ У ҐРУНТ

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

Рецензент: к.т.н. головний інженер
_____ Станіслав ЛОБАН

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

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

_____ Микола ІВАНОГЛО

ОДЕСА – 2026

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Микола ІВАНОГЛО

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Обґрунтування параметрів та розробка конструкції роботизованого пристрою для точного внесення рідких органічних добрив у ґрунт»
науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра
Костянтин Олександрович

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

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 17.08.2026.

3. **Об'єкт дослідження:** технологічний процес точного внесення рідких органічних добрив у кореневу зону рослин із використанням мобільних роботизованих систем.

4. **Предмет дослідження:** конструктивні параметри та алгоритми керування роботизованим пристроєм для дозованого ін'єкційного внесення рідких органічних добрив у ґрунт.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ:

Провести огляд сучасного стану та тенденцій розвитку роботизованих систем для точного внесення добрив у світовій та вітчизняній агроінженерії.

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ:

Розробити математичну модель процесу ін'єкційного внесення рідких добрив у ґрунт, що враховує гідравлічні параметри системи та фізико-механічні властивості ґрунтового середовища.

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ:

Спроекувати конструкцію енд-ефектора, що поєднує ін'єкційну голку, систему дозування, RGB-D камеру, ультразвуковий датчик, датчик зусилля та систему підсвічування.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

Схема класифікації існуючих технічних засобів для внесення рідких органічних добрив.

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Кінематична схема шестиступеневого маніпулятора з позначенням систем координат (frames) за параметрами Денавіта-Хартенберга.

Структурна схема архітектури програмного забезпечення в середовищі ROS 2 (Graph of Nodes) із зазначенням топіків та сервісів.

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

Тривимірна модель загального компонування роботизованого пристрою (мобільна платформа + маніпулятор + енд-ефектор). Креслення енд-ефектора з розрізами та специфікацією основних компонентів. Гідравлічна принципова схема системи дозування та подачі рідких добрив.

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

Температурний діапазон: +5...+40°C

Робоча вологість: до 85% (без конденсату)

Робоче середовище: відкритий ґрунт, овочеві поля з міжряддями шириною 60–80 см

Клас захисту електрообладнання: не нижче IP65

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	27.03.2026		
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	15.04.2026		

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційног о проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	29.04. 2026		
4.	Написання першого (теоретикометодичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	18.05. 2026		
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	11.06.2026		
6.	Написання другого (дослідницькоаналітичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	01.08.2026		
7.	Написання третього (проектно-розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	11.08.2026		
8.	Написання висновків, списку літератури	21.08.2026		
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) науковим керівником	27.08.2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	07.08.2026		
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	10. 08.2026		
12.	Подання кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на кафедру	11. 08.2026		

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційног о проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на оригінальність	12. 08.2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	15. 08.2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	16. 08.2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	19.08.2026		
	Загальна кількість			

Здобувач ОС

_____ Микола ІВАНОГЛО

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Костянтин ДЯДЮРА

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: складається з 118 сторінок, 5 розділів, 28 рисунків, 20 таблиць, 24 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: Процеси автоматизованого внесення рідких органічних добрив у ґрунт із використанням мобільних робототехнічних комплексів.

Предмет дослідження: Методи та алгоритми керування наземною мобільною платформою, оснащеною маніпуляційною системою та пристроєм для дозованої ін'єкції рідких добрив у кореневу зону рослин.

Мета роботи: Підвищення ефективності використання рідких органічних добрив шляхом розробки та дослідження автономного роботизованого пристрою для точного ін'єкційного внесення добрив у ґрунт.

Методи дослідження: У роботі використано методи системного аналізу, математичного моделювання (для розрахунку кінематики маніпулятора та гідравлічних параметрів системи дозування), комп'ютерного зору (для визначення координат рослин), натурного експерименту (для валідації роботи системи в польових умовах) та методи математичної статистики (для обробки експериментальних даних). Удосконалено метод точного внесення рідких органічних добрив шляхом інтеграції 6-осьового маніпулятора, системи комп'ютерного зору для визначення місця ін'єкції та гідравлічної системи дозування зі змінною нормою внесення, що, на відміну від існуючих систем суцільного внесення, забезпечує адресну доставку добрив у кореневу зону кожної рослини з урахуванням її індивідуальних потреб..

Ключові слова: АГРОРОБОТ, ТОЧНЕ ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ, РІДКІ ОРГАНІЧНІ ДОБРИВА, ІН'ЄКЦІЙНЕ ВНЕСЕННЯ, МАНІПУЛЯТОР, ROS, КОМП'ЮТЕРНЕ БАЧЕННЯ, ЗМІННА НОРМА ВНЕСЕННЯ.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Іваногло М.						
Перевір.		Дядюра К. О.					6	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМАТИКИ РОБОТИЗАЦІЇ ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ	12
1.1 Значення точного внесення добрив для овочівництва та органічного землеробства.....	12
1.2 Огляд існуючих технічних засобів для внесення рідких органічних добрив.....	18
1.3 Аналіз методів дозування та ін'єкційного внесення рідких добрив у грунт.....	27
1.4 Проблема традиційного внесення добрив: нерівномірність, втрати та екологічні наслідки.....	33
Висновки.....	38
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	40
2.1 Математичне моделювання процесу ін'єкційного внесення рідких добрив.....	40
2.2 Кінематичне моделювання роботизованого маніпулятора.....	49
2.3 Розробка конструкції робочого органу та системи дозування.....	52
2.4 Програмна архітектура системи керування.....	57
2.5 Алгоритмічна реалізація процесу точного внесення добрив.....	58
Висновки.....	62
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ....	63
3.1 Лабораторні випробування системи дозування та ін'єкції.....	63
3.2 Польові випробування роботизованого пристрою.....	69
3.3 Оцінка точності та рівномірності внесення добрив.....	75

					14.17 - КР.003.0.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Іваногло М.				ЗМІСТ		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К. О.							7	2
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.	Дядюра К. О.								

3.4 Аналіз впливу параметрів ґрунту на якість ін'єкційного внесення...	79
Висновки.....	82
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	84
4.1 Аналіз небезпечних факторів при експлуатації роботизованих систем внесення добрив.....	84
4.2 Заходи механічної безпеки при роботі з роботизованою системою	86
4.3 Заходи хімічної безпеки при роботі з рідкими органічними добривами	89
4.4 Заходи електробезпеки при роботі з автономними системами живлення.....	90
Висновки.....	93
РОЗДІЛ 5 СТАРТАП-ПРОЄКТ: СИСТЕМА АВТОНОМНОГО МОНІТОРИНГУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР.....	95
5.1 Маркетинговий аналіз ринку роботизованих систем внесення добрив.....	95
5.2 Розробка бізнес-моделі комерціалізації системи.....	99
5.3 Розрахунок собівартості розробки прототипу та терміну окупності.....	102
Висновки.....	107
ВИСНОВКИ.....	109
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	111

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку аграрного виробництва характеризується переходом до концепції точного землеробства, де ключову роль відіграють автоматизація, роботизація та диференційоване внесення ресурсів. Вирощування овочевих культур, зокрема перцю, томатів та інших просапних культур, потребує раціонального використання добрив для забезпечення високої врожайності та якості продукції. Традиційні методи внесення добрив, що ґрунтуються на суцільному розподілі добрив по полю, стають економічно неефективними та екологічно небезпечними через надмірне використання ресурсів, нерівномірність розподілу, втрати добрив унаслідок вимивання та випаровування, а також забруднення ґрунтових вод. Особливо актуальною є проблема внесення рідких органічних добрив, які, завдяки своїй високій біодоступності, здатні забезпечити швидке живлення рослин, проте потребують точного дозування та локалізації в кореневій зоні.

Існуючі засоби механізації переважно орієнтовані на виконання важких операцій (обробіток ґрунту, збирання врожаю), тоді як операції точного локального внесення добрив залишаються слабо автоматизованими. Використання традиційних розкидачів та обприскувачів не дозволяє забезпечити адресну доставку добрив до кожної рослини з урахуванням її індивідуальних потреб. У зв'язку з цим, розробка наземних мобільних роботизованих платформ, здатних автономно пересуватися у міжряддях, визначати просторове положення рослин та виконувати точне ін'єкційне внесення рідких добрив у кореневу зону, є актуальним науково-технічним завданням агроінженерії.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Іваногло М			ВСТУП				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									9	3
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності використання рідких органічних добрив шляхом обґрунтування параметрів та розробки роботизованого пристрою для точного ін'єкційного внесення добрив у кореневу зону рослин.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

1. Проаналізувати стан питання та існуючі технічні засоби для внесення рідких органічних добрив в умовах відкритого ґрунту.
2. Обґрунтувати конструктивно-технологічну схему роботизованого пристрою, системи дозування та робочого органу.
3. Розробити математичну модель процесу ін'єкційного внесення рідких добрив у ґрунт та кінематичну модель маніпуляційної системи.
4. Розробити алгоритми комп'ютерного зору для визначення координат рослин та місця ін'єкції.
5. Провести експериментальні дослідження працездатності розробленої системи в лабораторних та польових умовах, оцінити точність та рівномірність внесення добрив.
6. Виконати техніко-економічне оцінювання впровадження роботизованого комплексу.

Об'єкт дослідження – технологічний процес точного внесення рідких органічних добрив у кореневу зону рослин.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії робочих органів роботизованої системи з ґрунтовим середовищем, параметри системи дозування та алгоритми керування маніпулятором при виконанні операцій ін'єкційного внесення.

Методи дослідження.

У роботі застосовано:

- *аналітичні методи* — при огляді літературних джерел та патентному пошуку;

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- *методи теоретичної механіки та гідравліки* — для розрахунку параметрів системи дозування та кінематичного аналізу маніпулятора;
- *методи 3D-модельювання (CAD)* — при розробці конструкції вузлів пристрою;
- *експериментальні методи* — для визначення похибок дозування та оцінки рівномірності внесення добрив у польових умовах.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Дістало подальшого розвитку обґрунтування параметрів робочих органів роботизованих систем для точного внесення добрив, що відрізняється поєднанням системи комп'ютерного зору (RGB-D камера) для визначення координат рослин та гідравлічної системи дозування зі змінною нормою внесення.

2. Удосконалено алгоритм ін'єкційного внесення рідких добрив, який враховує індивідуальні потреби рослин (на основі фенотипових параметрів) та фізико-механічні властивості ґрунту, що дозволяє зменшити витрати добрив та мінімізувати екологічне навантаження.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено проєкт роботизованого пристрою, що дозволяє здійснювати точне ін'єкційне внесення рідких органічних добрив у кореневу зону рослин без участі оператора безпосередньо в полі. Запропоноване рішення дозволяє фермерським господарствам зменшити витрати добрив на 20-30%, підвищити коефіцієнт використання поживних речовин та знизити ризик забруднення навколишнього середовища.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМАТИКИ РОБОТИЗАЦІЇ ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ

1.1 Значення точного внесення добрив для овочівництва та органічного землеробства

У сучасних умовах глобального зростання населення та обмеженості природних ресурсів, ефективне використання добрив стає критичним фактором забезпечення продовольчої безпеки [1]. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), до 2050 року світове населення досягне 9,7 млрд осіб, що вимагатиме збільшення виробництва продовольства на 60–70% [2]. При цьому площа орних земель на душу населення неухильно скорочується, а ресурси прісної води стають дедалі обмеженішими (рисунок 1.1).

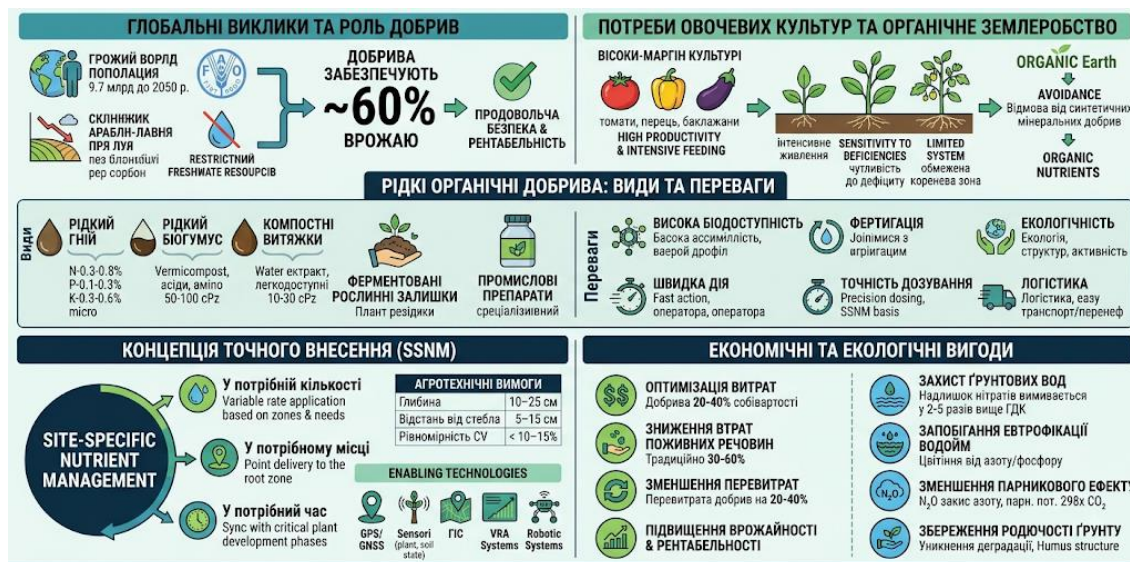


Рисунок 1.1 – Значення точного внесення добрив для овочівництва та органічного землеробства

					14.17 - КР.003.1.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Іваногло .М			РОЗДІЛ 1				Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.		Дядюра К. О.									12	20	
Реценз.													
Н. Контр.													
Затверд.		Дядюра К. О.											

У цьому контексті добрива відіграють ключову роль у забезпеченні врожайності сільськогосподарських культур. Як зазначається в агрономічній літературі, внесення добрив забезпечує приблизно 60% результату отриманого врожаю. Відповідно, ефективність використання добрив безпосередньо впливає на рентабельність сільськогосподарського виробництва та продовольчу безпеку [3].

Рідкі органічні добрива: види, склад та переваги.

Органічне землеробство, яке набуває все більшої популярності в Україні та світі, потребує особливих підходів до внесення добрив, оскільки використання синтетичних мінеральних добрив є обмеженим або забороненим. Рідкі органічні добрива є однією з найефективніших форм органічного живлення рослин [4].

До основних видів рідких органічних добрив належать [5]:

- *Рідкий гній (гноївка)* – продукт переробки тваринницьких відходів, багатий на азот, фосфор, калій та мікроелементи. Вміст азоту в рідкому гної становить 0,3–0,8%, фосфору – 0,1–0,3%, калію – 0,3–0,6%.
- *Біогумус (вермикомпост) у рідкій формі* – продукт переробки органічних відходів дощовими черв'яками, що містить повний комплекс поживних речовин, мікроелементів, амінокислот та гумінових кислот. В'язкість біогумусу становить 50–100 сПз [6].
- *Компостні витяжки* – водні екстракти з компостованих рослинних залишків, що містять легкодоступні форми поживних речовин та біологічно активні сполуки. В'язкість компостних витяжок становить 10–30 сПз.
- *Ферментовані рослинні залишки* – продукти анаеробного зброджування зеленої маси, багаті на органічні кислоти та мікроелементи.
- *Промислові рідкі органічні добрива* – спеціалізовані препарати, що виробляються на основі органічної сировини з додаванням мікроелементів та біостимуляторів.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рідкі органічні добрива мають низку суттєвих переваг порівняно з твердими формами органічних добрив:

1. *Висока біодоступність* – поживні речовини знаходяться у формі, доступній для безпосереднього засвоєння рослинами, що прискорює їхню дію та підвищує ефективність використання. Рідкі добрива швидше та якісніше асимілюються в ґрунті, що зумовлює їхню вищу ефективність застосування.

2. *Рівномірність розподілу* – рідка консистенція забезпечує краще проникнення у ґрунтовий профіль та більш рівномірний розподіл поживних речовин у кореневій зоні.

3. *Швидка дія* – ефект від внесення рідких добрив проявляється протягом кількох днів, що особливо важливо для оперативного реагування на дефіцит поживних речовин у критичні фази розвитку рослин.

4. *Можливість суміщення з поливом* (фертигація) – рідкі добрива можуть вноситися через системи крапельного або дощового зрошення, що дозволяє оптимізувати витрати праці та забезпечити регулярне підживлення рослин.

5. *Точність дозування* – рідкі добрива дозволяють точно контролювати кількість внесених поживних речовин, що є основою технологій точного землеробства.

6. Екологічність – відсутність хімічних домішок та синтетичних сполук, зниження ризику забруднення ґрунтових вод, покращення структури ґрунту та підвищення його біологічної активності.

7. *Зручність транспортування та перевантаження* – рідкі добрива легко та швидко транспортуються та перевантажуються шляхом перекачування.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Агротехнічні вимоги до внесення добрив для овочевих культур.

Овочеві культури, зокрема перець, томати, баклажани та інші просапні культури, пред'являють підвищені вимоги до режиму живлення. Це зумовлено (таблиця 1.1) [7]:

- *Високою продуктивністю* – овочеві культури формують значну біомасу за відносно короткий вегетаційний період, що вимагає інтенсивного надходження поживних речовин.
- *Чутливістю до дефіциту поживних речовин* – навіть незначний недолік азоту, фосфору, калію або мікроелементів може суттєво знизити врожайність та погіршити якість продукції.
- *Обмеженою кореневою системою* – коренева система овочевих культур розвинена відносно слабо, що вимагає розміщення поживних речовин безпосередньо в зоні активного коренеживлення.
- *Високою вартістю продукції* – овочі є високомаржинальними культурами, тому інвестиції в точне внесення добрив швидко окупаються за рахунок підвищення врожайності та якості.

Таблиця 1.1 – Ключові агротехнічні вимоги до внесення добрив для овочевих культур:

Параметр	Вимога
Глибина внесення	10–25 см (залежно від культури та фази розвитку)
Відстань від стебла	5–15 см (для уникнення опіків кореневої системи)
Норма внесення	Диференційована залежно від фази розвитку та стану рослини
Рівномірність розподілу	Коефіцієнт варіації не більше 10–15%
Сумісність з іншими агротехнічними операціями	Можливість суміщення з поливом, обробкою ґрунту

Концепція точного внесення добрив (Site-Specific Nutrient Management).

Концепція точного внесення добрив (Site-Specific Nutrient Management, SSNM) є ключовим елементом точного землеробства. Вона передбачає

адаптацію використання добрив до специфічних потреб різних зон поля та окремих рослин [8].

Основні принципи SSNM [9]:

1. *Внесення добрив у потрібній кількості* – диференційоване дозування (variable rate application) з урахуванням просторової варіабельності ґрунтового родючості та потреб рослин.

2. *У потрібному місці* – точкова доставка добрив до кореневої зони кожної рослини або групи рослин, що забезпечує максимальне засвоєння поживних речовин.

3. *У потрібний час* – синхронізація внесення добрив з фазами розвитку рослин, коли потреба в поживних речовинах є максимальною.

Для реалізації SSNM необхідне використання сучасних технологій, таких як [10]:

– *Системи глобального позиціонування (GPS/GNSS)* – для точного визначення координат місця внесення.

– *Сенсори стану рослин та ґрунту* – для отримання оперативної інформації про потреби рослин у поживних речовинах.

– *Геоінформаційні системи (ГІС)* – для створення електронних карт полів та планування внесення.

– *Системи змінної норми внесення (VRA)* – для автоматичного регулювання норми внесення залежно від заданої карти або показань сенсорів.

– *Роботизовані системи* – для автономного виконання операцій внесення з високою точністю.

Технології точного землеробства, включно з системами точного внесення добрив, є одними з головних трендів сучасної агроінженерії. Вони дозволяють оптимізувати використання ресурсів, знизити витрати та мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Економічні та екологічні аспекти використання добрив

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання добрив є найвпливовішим чинником підвищення врожайності культур. Однак надмірне або нераціональне застосування добрив призводить до значних економічних втрат та екологічних проблем.

Економічні аспекти [11]:

- Вартість мінеральних добрив становить значну частку (20–40%) у структурі витрат на вирощування сільськогосподарських культур.
- Втрати поживних речовин при традиційних методах внесення сягають 30–60%, що призводить до прямого збитку.
- Нерівномірне внесення добрив спричиняє строкатість врожаю та зниження загальної продуктивності.
- Перевитрата добрив на 20–40% порівняно з потребами рослин є типовою для традиційних технологій.

Екологічні аспекти [12]:

- *Забруднення ґрунтових вод* – надлишок нітратів вимивається у ґрунтові води, перевищуючи гранично допустимі концентрації (ГДК) у 2–5 разів.
- *Евтрофікація водних об'єктів* – надходження надлишку фосфору та азоту у поверхневі водойми спричиняє "цвітіння" води та загибель водних екосистем.
- *Парниковий ефект* – викиди закису азоту (N_2O), який має потенціал глобального потепління в 298 разів вищий за CO_2 .
- *Деградація ґрунтів* – надмірне використання мінеральних добрив призводить до підкислення ґрунтів, зниження вмісту гумусу та погіршення структури.

Таким чином, перехід до точного внесення добрив є не лише економічно доцільним, але й екологічно необхідним. Як зазначається в сучасних дослідженнях, впровадження технологій точного землеробства дозволяє зменшити хімічне навантаження на ґрунт та запобігти забрудненню підземних вод, оптимізувати використання водних ресурсів та підвищити врожайність за рахунок оперативного реагування на стрес рослин.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Огляд існуючих технічних засобів для внесення рідких органічних добрив

Сучасна агроінженерія пропонує широкий спектр технічних рішень для внесення рідких органічних добрив, які можна класифікувати за способом внесення, конструкцією робочих органів, рівнем автоматизації та продуктивністю (рисунк 1.2).

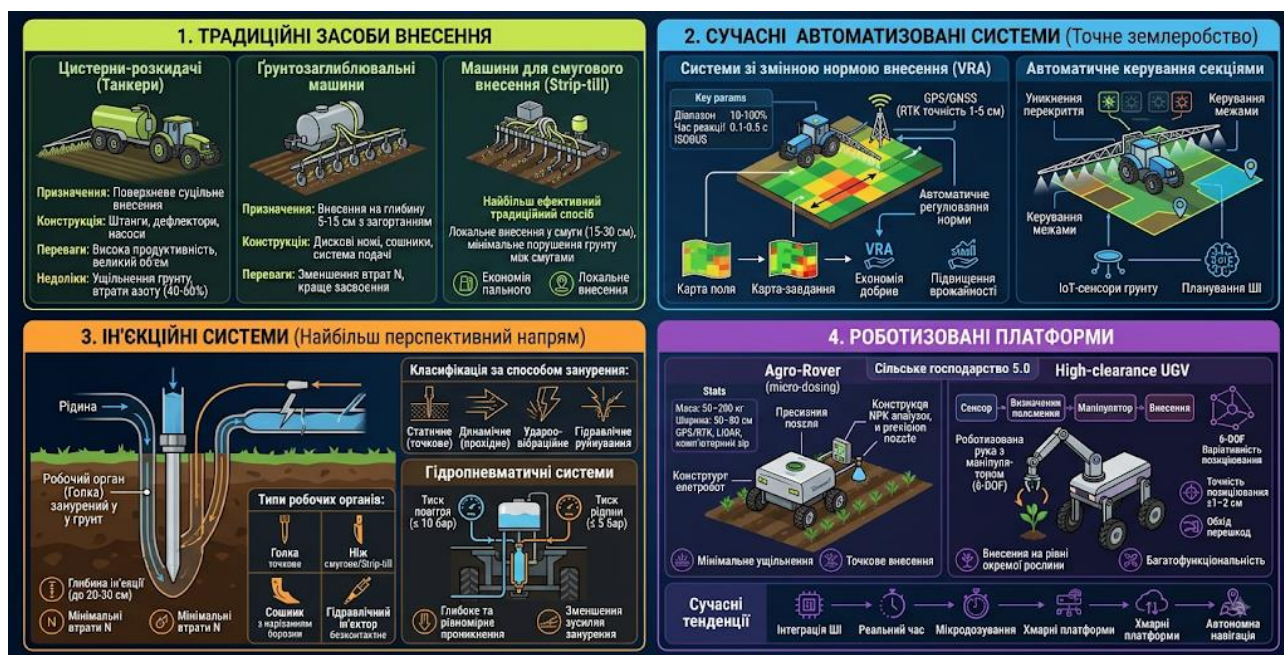


Рисунок 1.2 – Огляд технічних засобів для внесення рідких органічних добрив

Традиційні засоби внесення рідких добрив [12].

Цистерни-розкидачі (танкери) [13]:

Цистерни-розкидачі є найпоширенішим типом машин для внесення рідких органічних добрив. Вони призначені для поверхневого внесення рідкого гною, гноївки та інших рідких органічних добрив.

Конструктивні особливості:

- Місткість цистерн – від 5 до 30 м³ і більше.
- Робочі органи – штанги з форсунками, розподільчі пристрої (дефлектори, відбивні щитки).

– Насосне обладнання – відцентрові або шестеренні насоси для подачі рідини до розподільчих пристроїв.

– Системи контролю – механічні або електронні системи регулювання норми внесення.

Переваги:

– Висока продуктивність – до 5–10 га/год.

– Великий об'єм резервуара – зменшує кількість заправок.

– Відносно низька вартість експлуатації.

Недоліки:

– Значне ущільнення ґрунту через велику масу (до 20–30 т).

– Нерівномірність розподілу – коефіцієнт варіації може сягати 25–40%.

– Втрати азоту – до 40–60% через випаровування аміаку при поверхневому внесенні.

– Неможливість локального внесення – добрива розподіляються суцільно по всій поверхні поля.

– Висока енергоємність – значні витрати пального.

Ґрунтозаглиблювальні машини [12]:

Ґрунтозаглиблювальні машини призначені для внесення рідких добрив на глибину 5–15 см із одночасним зароблянням у ґрунт.

Конструктивні особливості:

– Робочі органи – дискові ножі, лемеші, сошники, які нарізають борозни в ґрунті.

– Система подачі добрив – насоси, трубопроводи, розподільчі пристрої, що подають добрива в борозни.

– Глибина загортання – регулюється за допомогою гідравлічних або механічних пристроїв.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги:

- Зменшення втрат азоту – загортання добрив у ґрунт знижує випаровування аміаку.
- Покращення засвоєння – добрива розміщуються в кореневій зоні.
- Зниження ризику поверхневого стоку.

Недоліки:

- Висока енергоємність – значний тяговий опір.
- Значне порушення ґрунтової структури.
- Обмежена глибина внесення – не більше 15 см.
- Неможливість точного позиціювання відносно рослин.
- Висока металоємність конструкції.

Депонування добрив під час підготовки смуг за технологією Strip-till вважається найбільш ефективним способом внесення рідких органічних добрив серед традиційних методів. Ця технологія забезпечує локальне внесення добрив у смуги шириною 15–30 см із мінімальним порушенням ґрунту між смугами.

Машини для смугового внесення (Strip-till applicators) [16]:

Конструктивні особливості:

- Робочі органи – дискові ножі, сошники для підготовки смуг шириною 15–30 см.
- Система подачі добрив – насоси, трубопроводи, форсунки для внесення рідких добрив у підготовлені смуги.
- Система загортання – котки або прикочуючі пристрої для ущільнення ґрунту після внесення.

Переваги [17]:

- Мінімальне порушення ґрунту – обробляється лише 20–40% площі поля.
- Локальне внесення – добрива розміщуються безпосередньо в зоні майбутнього коренеживлення.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Збереження ґрунтової структури – міжряддя залишаються необробленими.

– Економія пального – у 2–3 рази менше порівняно з традиційним обробітком.

Недоліки:

- Обмежена продуктивність – менша, ніж у цистерн-розкидачів.
- Висока вартість обладнання.
- Складність налаштування – потребує точного регулювання глибини та норми внесення.

Сучасні автоматизовані системи внесення добрив.

Системи зі змінною нормою внесення (Variable Rate Application, VRA):

Системи VRA є ключовим елементом точного землеробства. Вони базуються на використанні GPS-навігації, електронних карт полів та автоматизованих систем контролю (таблиця 1.2).

Принцип роботи:

1. Створення електронної карти поля з нанесеними агрохімічними показниками (вміст поживних речовин, рН, вологість тощо).
2. Розробка карти-завдання (prescription map) з диференційованими нормами внесення для різних зон поля.
3. Автоматичне регулювання норми внесення під час руху машини залежно від поточного місцезнаходження (за даними GPS).
4. Контроль та реєстрація фактично внесених об'ємів добрив.

Переваги систем VRA:

- Економія добрив – 10–30% порівняно з рівномірним внесенням.
- Підвищення врожайності – 5–15% за рахунок оптимізації живлення.
- Зниження екологічного навантаження – зменшення вимивання поживних речовин.
- Автоматизація процесу – зниження впливу людського фактора.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики систем VRA:

Параметр	Значення
Точність позиціонування	1–5 см (з RTK-корекцією)
Діапазон регулювання норми	10–100% від базової норми
Час реакції системи	0,1–0,5 с
Сумісність з ISOBUS	Так (ISO 11783)
Тип даних для формування карти	Агрохімічний аналіз, дані сенсорів, супутникові знімки

Недоліки систем VRA:

- Висока вартість обладнання та програмного забезпечення.
- Необхідність детального агрохімічного обстеження полів.
- Складність інтеграції з існуючим парком техніки.
- Обмежена точність – не дозволяє працювати на рівні окремої рослини.

Сучасні системи VRA активно інтегруються з IoT-сенсорами та системами штучного інтелекту для забезпечення автоматизованого прийняття рішень. Наприклад, системи з використанням датчиків ґрунту IoT підтримують інтелектуальне планування внесення добрив шляхом безперервного моніторингу вологості ґрунту.

Системи контролю внесення з автоматичним керуванням секціями:

Сучасні системи контролю внесення забезпечують не лише змінну норму внесення, але й автоматичне керування окремими секціями робочої штанги. Це дозволяє:

- Вимикати окремі секції при проїзді вже оброблених ділянок.
- Точніше відпрацьовувати межі поля та поворотні смуги.
- Уникати перекриття та пропусків при внесенні.

Ін'єкційні системи внесення добрив (таблиця 1.3).

Ін'єкційні системи забезпечують безпосереднє введення рідких добрив у ґрунт під тиском.

Вони є найбільш перспективним напрямом розвитку технологій внесення добрив, оскільки забезпечують мінімальні втрати поживних речовин та максимальну точність позиціювання.

Принцип роботи [18]:

1. Робочий орган (голка, ніж, сошник) занурюється в ґрунт на задану глибину.
2. Добрива подаються під тиском через канали в робочому органі.
3. Після завершення внесення робочий орган витягується з ґрунту.

Класифікація ін'єкційних систем за способом занурення:

Статичне занурення [19]:

- Робочий орган занурюється в ґрунт на задану глибину в одній точці.
- Після досягнення заданої глибини відбувається впорскування добрив.
- *Переваги:* висока точність позиціювання, мінімальне порушення ґрунту.
- *Недоліки:* обмежена продуктивність.

Динамічне (прохідне) внесення [19]:

- Робочий орган рухається в ґрунті з постійною швидкістю.
- Добрива подаються безперервно або імпульсно.
- *Переваги:* висока продуктивність.
- *Недоліки:* менша точність позиціювання, більше порушення ґрунту.

Ударно-вібраційне занурення:

- Використання вібраційного приводу для полегшення занурення в ущільнені ґрунти.
- *Переваги:* зменшення зусилля занурення, можливість роботи на важких ґрунтах.

Гідравлічне руйнування ґрунту:

- Впорскування рідини під високим тиском для створення порожнини в ґрунті.
- *Переваги:* мінімальне механічне навантаження на ґрунт.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки: складність контролю глибини та об'єму.

Таблиця 1.3 – Типи ін'єкційних робочих органів:

Тип	Конструкція	Призначення
Голка (Needle injector)	Трубчастий стрижень з гострим наконечником	Точкове внесення, статичне занурення
Ніж (Knife injector)	Плоский робочий орган з каналами для рідини	Прохідне внесення, смугове внесення
Сошник (Opener)	Дисковий або лемішний робочий орган	Внесення з одночасним нарізанням борозни
Гідравлічний ін'єктор	Форсунка високого тиску	Безконтактне внесення (гідророзрив)

Гідропневматичні ін'єкційні системи:

Гідропневматичні системи використовують комбіновану подачу рідини та стисненого повітря для більш глибокого та рівномірного проникнення добрив у ґрунтовий профіль.

Основні параметри гідропневматичних систем:

- Тиск повітря: $\leq 1 \times 10^6$ Па (10 бар).
- Тиск рідини: $\leq 5 \times 10^5$ Па (5 бар).
- Глибина ін'єкції: до 20–30 см.
- Продуктивність: 1–5 точок за хвилину (для статичного режиму).

Як показують сучасні дослідження, гідропневматичні системи дозволяють значно підвищити ефективність внесення добрив завдяки кращому проникненню рідини в ґрунтовий профіль та зменшенню зусилля занурення робочих органів.

Роботизовані платформи для внесення добрив.

Останнім часом з'являються роботизовані рішення, які поєднують автономну навігацію, комп'ютерний зір та точне дозування. Сільськогосподарські роботи є одним з основних стовпів сільського господарства 5.0, а наземні безпілотні платформи (UGV) можуть автономно виконувати такі завдання, як моніторинг рослин, обприскування, внесення добрив, прополка та збирання врожаю.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Малі роботи для мікродозування:

Приклад: Agro-Rover (автономний робот для внесення добрив)

Agro-Rover є прикладом автономного робота для внесення добрив, який використовує дані NPK-аналізу в реальному часі для оптимізації живлення ґрунту. Полеві випробування показали, що Agro-Rover забезпечує підвищення ефективності використання добрив у середньому на 25% порівняно з традиційними методами.

Основні характеристики:

- Маса: 50–200 кг.
- Ширина: 50–80 см (для роботи в міжряддях).
- Привід: електричний (акумулятори).
- Навігація: GPS/RTK, LiDAR, комп'ютерний зір.
- Функціонал: точкове внесення добрив, моніторинг стану рослин.

Переваги:

- Мінімальне ущільнення ґрунту.
- Можливість роботи на пізніх стадіях розвитку рослин.
- Висока точність позиціювання (до 1–2 см).
- Автономна робота протягом 6–8 годин.

Висококліренсні роботизовані платформи:

Висококліренсні платформи призначені для роботи на пізніх стадіях розвитку рослин, коли висота культур перевищує 1–2 м.

Приклад: система 360 Rain

- Висота платформи: до 5 м.
- Ширина захвату: до 30 м.
- Функціонал: зрошення, внесення рідких добрив та гноївки.
- Навігація: GPS/RTK з точністю 2–5 см.

Роботизовані системи з маніпуляторами:

Роботизовані системи з маніпуляторами є найбільш перспективним напрямом для точного внесення добрив на рівні окремої рослини.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приклад: Rowbot Systems

Rowbot Systems розробила роботизовану платформу для виконання кількох функцій у сільськогосподарських системах. Платформа використовує 6-ступеневі маніпулятори для точного внесення добрив та виконання інших агротехнічних операцій.

Основні характеристики:

- Кількість ступенів свободи маніпулятора: 6 (6-DOF).
- Точність позиціювання: $\pm 1-2$ см.
- Корисне навантаження: до 5 кг.
- Система комп'ютерного зору: для визначення положення рослин.
- Система дозування: змінна норма внесення.

Переваги використання 6-DOF маніпуляторів:

1. *Варіативність позиціювання* – можливість орієнтації робочого органу під будь-яким кутом відносно поверхні ґрунту.

2. *Обхід перешкод* – можливість досягати однієї точки в просторі різними конфігураціями ланок.

3. *Багатофункціональність* – можливість виконання різних агротехнічних операцій (внесення добрив, обприскування, збирання врожаю).

Роботи для точкового внесення добрив на рівні окремої рослини [21]:

Сучасні дослідження зосереджені на розробці роботизованих платформ для внесення добрив на рівні окремої рослини. Такі системи поєднують оптичні сенсори та виконавчі механізми для цільового точного внесення добрив навколо вибраних рослин. Аналіз зібраних даних дозволяє створити карту-завдання для автоматичного внесення добрив через роботизовану руку.

Сучасні тенденції в роботизації внесення добрив:

1. *Інтеграція ШІ та машинного навчання* – для прогнозування потреб рослин у поживних речовинах.

2. *Системи реального часу* – для оперативного коригування норми внесення.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. *Роботизоване мікродозування* – для точного внесення малих об'ємів добрив.

4. *Інтеграція з хмарними платформами* – для збору та аналізу даних.

5. *Автономна навігація* – для повністю безпілотної роботи в полі.

1.3 Аналіз методів дозування та ін'єкційного внесення рідких добрив у ґрунт

Методи дозування рідких добрив

Точність внесення рідких добрив значною мірою визначається методом дозування. Сучасна агроінженерія пропонує кілька типів дозуючих систем, кожна з яких має свої переваги, недоліки та сфери застосування.

Класифікація дозуючих систем [22] (таблиця 1.4):

1. Об'ємні дозатори:

– *Поршневі дозатори* – забезпечують високу точність дозування (похибка 1–3%), можливість роботи з в'язкими рідинами. *Недолік*: складність конструкції, пульсуюча подача, обмежена продуктивність.

– *Шестеренні дозатори* – прості конструкції, надійні в роботі, забезпечують безперервну подачу. *Недоліки*: чутливість до абразивних частинок, обмежена точність (похибка 3–5%).

– *Перистальтичні дозатори* – забезпечують високу чистоту (рідина контактує лише з трубкою), можливість роботи з в'язкими та абразивними рідинами. *Недоліки*: обмежений ресурс трубки, пульсуюча подача.

– *Шнекові дозатори* – використовуються для дозування суспензій та рідин з високим вмістом твердих часток. *Похибка*: 3–5%. Підходять для роботи з рідкими органічними добривами, що містять тверді частки.

2. Насосно-форсуночні системи:

– Використання відцентрових насосів для подачі рідини до форсунок.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Регулювання витрати зміною частоти обертання насоса або дроселюванням.

– *Похибка дозування*: 5–10%.

– *Переваги*: простота конструкції, висока продуктивність.

– *Недоліки*: низька точність, залежність від тиску в системі.

3. Гідропневматичні системи:

– Використання стисненого повітря для транспортування та дозування рідини.

– Забезпечують високу швидкість та точність ін'єкції.

– *Переваги*: можливість роботи з в'язкими та абразивними рідинами, висока точність.

– *Недоліки*: складність конструкції, необхідність компресорного обладнання.

4. Гравіметричні системи:

– Дозування за масою рідини (зважування).

– *Переваги*: найвища точність (похибка <0,5%).

– *Недоліки*: складність конструкції, низька продуктивність, чутливість до вібрацій.

5. Системи з використанням витратомірів (масових або об'ємних):

– Безперервне вимірювання витрати рідини з коригуванням подачі насоса.

– *Переваги*: висока точність, можливість роботи в реальному часі.

– *Недоліки*: висока вартість витратомірів, чутливість до складу рідини.

Для роботизованих систем точного внесення рідких органічних добрив найбільш доцільним є використання поршневих або гідропневматичних систем дозування, які забезпечують необхідну точність та можливість роботи з в'язкими рідинами.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Способи ін'єкційного внесення рідких добрив.

Ін'єкційне внесення рідких добрив передбачає безпосереднє введення добрив у ґрунтовий профіль через спеціальні робочі органи. Вибір способу ін'єкції визначається типом ґрунту, культурою, фазою розвитку рослин та технічними можливостями обладнання (таблиця 1.5).

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика методів дозування:

Метод дозування	Точність, %	Продуктивність	В'язкість	Абразивність	Вартість
Поршневий	1–3	Середня	Висока	Низька	Висока
Шестеренний	3–5	Висока	Середня	Низька	Середня
Перистальтичний	2–4	Середня	Висока	Середня	Середня
Шнековий	3–5	Висока	Висока	Висока	Середня
Насосно-форсуночний	5–10	Висока	Низька	Низька	Низька
Гідропневматичний	1–3	Висока	Висока	Висока	Висока
Гравіметричний	<0,5	Низька	Будь-яка	Будь-яка	Дуже висока

Статичне (точкове) ін'єкційне внесення:

При статичному внесенні робочий орган занурюється в ґрунт у фіксованій точці, після чого відбувається впорскування добрив.

Технологічний процес:

1. Позиціювання ін'єкційної голки над точкою внесення.
2. Занурення голки в ґрунт на задану глибину (10–25 см).
3. Впорскування добрив під тиском (0,3–0,8 МПа).
4. Витягування голки з ґрунту.
5. Перехід до наступної точки.

Переваги:

- Висока точність позиціювання – добрива вносяться безпосередньо в кореневу зону.
- Мінімальне порушення ґрунту – слід від голки не перевищує 1–2 см у діаметрі.
- Можливість адаптації до рельєфу – глибина та кут занурення можуть регулюватися.
- Відсутність втрат добрив – усе внесені добриво залишається в ґрунті.

Недоліки:

- Обмежена продуктивність – до 100–200 точок за годину.
- Висока енергоємність – значні витрати на занурення голки.
- Складність автоматизації – потребує точного позиціювання та контролю зусилля.

Динамічне (прохідне) ін'єкційне внесення:

При динамічному внесенні робочий орган рухається в ґрунті з постійною швидкістю, а добрива подаються безперервно або імпульсно.

Технологічний процес:

1. Робочий орган (ніж, сошник) заглиблюється в ґрунт.
2. Платформа рухається вздовж ряду рослин.
3. Добрива подаються через канали в робочому органі.
4. Після завершення внесення робочий орган витягується з ґрунту.

Переваги:

- Висока продуктивність – до 1–5 га/год.
- Простота конструкції.
- Можливість суміщення з іншими операціями (посів, обробіток ґрунту).

Недоліки:

- Менша точність позиціювання – добрива вносяться вздовж смуги, а не в конкретну точку.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Більше порушення ґрунту – борозна шириною 2–5 см.
- Обмежена глибина внесення – до 15 см.

Ударно-вібраційне ін'єкційне внесення:

При ударно-вібраційному внесенні використовується вібраційний привід для полегшення занурення робочого органу в ущільнені ґрунти.

Принцип роботи:

- Робочий орган оснащується вібратором (пневматичним або електричним).
- Вібрація знижує опір ґрунту в 2–3 рази.
- Частота вібрації: 20–100 Гц.
- Амплітуда вібрації: 1–5 мм.

Переваги:

- Зменшення зусилля занурення на 50–70%.
- Можливість роботи на важких ґрунтах.
- Покращення проникнення рідини в ґрунт.

Недоліки:

- Ускладнення конструкції.
- Додаткові витрати енергії.
- Потенційне ущільнення ґрунту навколо голки.

Гідравлічне (безконтактне) ін'єкційне внесення:

При гідравлічному внесенні рідина впорскується в ґрунт під дуже високим тиском без механічного занурення робочого органу.

Принцип роботи:

- Рідина подається під тиском 5–20 МПа через спеціальну форсунку.
- Струмінь рідини руйнує ґрунт і проникає на глибину 10–30 см.
- Добрива розподіляються в об'ємі ґрунту, створеному струменем.

Переваги:

- Відсутність механічного контакту з ґрунтом.
- Висока швидкість внесення.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Можливість роботи на дуже твердих ґрунтах.

Недоліки:

- Складність контролю глибини та об'єму.
- Високі витрати енергії.
- Потенційне перезволоження ґрунту.

Аналіз факторів, що впливають на якість ін'єкційного внесення.

Якість ін'єкційного внесення рідких добрив залежить від багатьох факторів, які необхідно враховувати при проектуванні роботизованих систем.

Таблиця 1.5 – Фізико-механічні властивості ґрунту:

Властивість	Вплив на процес ін'єкції
Вологість	Оптимальна вологість: 15–22%. При низькій вологості – високий опір зануренню; при високій – розтікання добрив
Щільність	Висока щільність ускладнює занурення, знижує радіус розповсюдження добрив
Гранулометричний склад	Піщані ґрунти – легке занурення, великий радіус розповсюдження; глинисті – важке занурення, малий радіус
Структура	Структурні ґрунти – краще проникнення рідини; безструктурні – гірше

Таблиця 1.6 – Властивості рідких добрив:

Властивість	Вплив на процес ін'єкції
В'язкість	Висока в'язкість ускладнює подачу та розповсюдження в ґрунті
Густина	Впливає на необхідний тиск ін'єкції
Вміст твердих часток	Великі частки можуть забивати канали та форсунки
Температура	Впливає на в'язкість та текучість рідини

Таблиця 1.7 – Параметри процесу ін'єкції:

Параметр	Оптимальне значення	Вплив на якість
Тиск ін'єкції	0,3–0,8 МПа	Занадто низький – недостатнє проникнення; занадто високий – розтікання
Швидкість занурення	2–5 см/с	Занадто висока – пошкодження голки; занадто низька – зниження продуктивності
Глибина ін'єкції	10–25 см	Залежить від культури та фази розвитку
Кут нахилу інструменту	90° ± 5° (перпендикулярно)	Відхилення призводить до нерівномірного розподілу
Об'єм ін'єкції	10–200 мл	Залежить від типу добрив та потреби рослини
Час витримки після ін'єкції	1–3 с	Для забезпечення розповсюдження добрив

1.4 Проблематика традиційного внесення добрив: нерівномірність, втрати та екологічні наслідки

Традиційні методи внесення добрив (суцільне розкидання, поверхнєве внесення) мають низку суттєвих недоліків, які призводять до значних економічних втрат та екологічних проблем.

Нерівномірність розподілу добрив.

Нерівномірність розподілу є однією з головних проблем традиційних методів внесення добрив.

Причини нерівномірності:

- Конструктивні особливості розподільчих пристроїв (форсунок, дисків, дефлекторів).
- Зміна швидкості руху машини.
- Вплив вітру (для поверхневого внесення).
- Нерівномірність властивостей ґрунту та рельєфу.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Людський фактор (неправильне налаштування обладнання).

Наслідки нерівномірності:

- Коефіцієнт варіації розподілу при розкиданні може сягати 30–50%.
- Нерівномірне внесення призводить до строкатості врожаю (різниця може сягати 20–30%).
- На ділянках з недостатнім внесенням – дефіцит поживних речовин та зниження врожайності.
- На ділянках з надмірним внесенням – перевитрата добрив, ризик фітотоксичності та забруднення.

Кількісна оцінка нерівномірності:

Для оцінки нерівномірності розподілу добрив використовується коефіцієнт варіації (CV):

$$CV = \sigma_x \cdot 100\% \quad CV = x^-_{\sigma} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Де σ_x – стандартне відхилення, x^-_{σ} – середнє значення.

- $CV < 10\%$ – відмінний розподіл.
- $CV = 10\text{--}20\%$ – добрий розподіл.
- $CV = 20\text{--}30\%$ – задовільний розподіл.
- $CV > 30\%$ – незадовільний розподіл.

Традиційні методи внесення забезпечують $CV = 25\text{--}40\%$, що є незадовільним для точного землеробства.

Втрати поживних речовин.

Втрати поживних речовин при традиційних методах внесення є однією з головних причин низької ефективності використання добрив.

Види втрат (таблиця 1.8):

Втрати азоту:

- *Випаровування аміаку (NH_3):* при поверхневому внесенні рідких органічних добрив втрати можуть сягати 40–60% від внесеного азоту. Процес посилюється при високих температурах, лужній реакції ґрунту та відсутності загортання добрив.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *Денітрифікація*: перетворення нітратів (NO_3^-) на газоподібні форми азоту (N_2 , N_2O) в анаеробних умовах. Втрати становлять 10–20% від внесеного азоту.

– *Вимивання нітратів*: винос нітратів з ґрунтовим профілем у ґрунтові води. Втрати становлять 15–30% від внесеного азоту.

Втрати фосфору:

– *Фіксація ґрунтом*: перехід фосфору в малорухомі форми внаслідок реакцій з кальцієм, алюмінієм або залізом. Ефективність використання фосфору за перший рік становить лише 10–25%.

– *Поверхневий стік*: винос фосфору з поверхневим стоком, особливо на схилових землях.

Втрати калію:

– *Вимивання*: винос калію з ґрунтовим профілем, особливо на легких ґрунтах.

– *Фіксація*: перехід калію в недоступну для рослин форму в ґрунтах з високим вмістом глинистих мінералів.

Таблиця 1.8 – Загальні втрати поживних речовин:

Елемент	Втрати при традиційному внесенні, %	Втрати при ін'єкційному внесенні, %
Азот (N)	40–60	10–20
Фосфор (P)	70–85	30–50
Калій (K)	30–50	10–25

Таким чином, ін'єкційне внесення дозволяє зменшити втрати поживних речовин у 2–3 рази порівняно з традиційними методами.

Екологічні наслідки традиційного внесення добрив

Традиційні методи внесення добрив створюють значне екологічне навантаження на агроєкосистеми та навколишнє середовище.

Забруднення ґрунтових вод:

- Надлишок нітратів (NO_3^-) вимивається у ґрунтові води, перевищуючи гранично допустимі концентрації (ГДК) у 2–5 разів.
- Вміст нітратів у ґрунтових водах може сягати 50–150 мг/л при ГДК 45 мг/л.
- Забруднення ґрунтових вод нітратами становить загрозу для здоров'я людини (метгемоглобінемія) та водних екосистем.

Евтрофікація водних об'єктів:

- Надходження надлишку фосфору та азоту у поверхневі водойми спричиняє "цвітіння" води.
- Інтенсивне розмноження водоростей призводить до дефіциту кисню, загибелі риби та деградації водних екосистем.
- Вартість очищення водних об'єктів від наслідків евтрофікації становить мільярди доларів щорічно.

Викиди парникових газів:

- Закис азоту (N_2O) має потенціал глобального потепління в 298 разів вищий за CO_2 .
- Сільське господарство є джерелом 60–70% антропогенних викидів N_2O .
- Внесення азотних добрив є основною причиною викидів N_2O з сільськогосподарських ґрунтів.

Деградація ґрунтів:

- Надмірне використання мінеральних добрив призводить до підкислення ґрунтів (зниження рН на 0,5–1,0 одиниці).
- Зниження вмісту гумусу в ґрунті (на 0,1–0,3% за 10 років) внаслідок інтенсифікації обробітку та внесення добрив.
- Погіршення структури ґрунту, зниження водопроникності та біологічної активності.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Втрати біорізноманіття:

- Зменшення чисельності та видового різноманіття ґрунтових мікроорганізмів внаслідок надмірного внесення добрив.
- Зниження чисельності дощових черв'яків та інших ґрунтових мезофауни.
- Зменшення чисельності комах-запилювачів внаслідок забруднення довкілля.

Економічні втрати від нераціонального використання добрив

Нераціональне використання добрив призводить до значних економічних втрат на всіх рівнях агропромислового комплексу.

Втрати на рівні господарства:

- Перевитрата добрив на 20–40% порівняно з потребами рослин.
- Зниження врожайності на 10–30% через незбалансоване живлення.
- Погіршення якості продукції (зниження вмісту цукрів, вітамінів, білків).
- Додаткові витрати на вапнування кислих ґрунтів.

Втрати на рівні регіону/країни:

- Забруднення водних ресурсів потребує додаткових витрат на очищення (до 10–20% від вартості води).
- Втрати біорізноманіття знижують стійкість агроєкосистем, потребують додаткових витрат на відновлення.
- Викиди парникових газів створюють додаткове навантаження на бюджет (вуглецевий податок).

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Актуальність точного внесення добрив. Встановлено, що традиційні методи внесення рідких органічних добрив характеризуються значними втратами поживних речовин (до 40–60% азоту), нерівномірністю розподілу ($CV = 25\text{--}40\%$) та негативним впливом на навколишнє середовище. Перехід до точного внесення добрив є критично важливим для підвищення ефективності органічного землеробства та забезпечення сталого розвитку агровиробництва.

2. Переваги рідких органічних добрив. Рідкі органічні добрива забезпечують високу біодоступність поживних речовин, рівномірність розподілу, швидку дію та можливість точного дозування. Вони є оптимальною формою для впровадження технологій точного землеробства в органічному виробництві.

3. Обмеженість існуючих технічних засобів. Аналіз показав, що традиційні розкидачі та ґрунтозаглиблювальні машини не забезпечують необхідної точності позиціювання та дозування добрив. Сучасні системи зі змінною нормою внесення (VRA) дозволяють диференціювати внесення за зонами поля, проте не забезпечують адресної доставки до кожної рослини з необхідною точністю.

4. Перспективність ін'єкційних та роботизованих систем. Ін'єкційні системи внесення забезпечують мінімальні втрати поживних речовин, точне позиціювання в кореневій зоні та зниження екологічного навантаження. Роботизовані платформи, особливо з використанням 6-ступеневих маніпуляторів, є найбільш перспективним напрямом для точного внесення добрив на рівні окремої рослини.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Технічні вимоги до системи. Обґрунтовано необхідність використання маніпулятора з 6 ступенями свободи (6-DOF) для забезпечення гнучкого позиціювання ін'єкційного інструменту, системи комп'ютерного зору для визначення координат рослин, гідравлічної системи дозування зі змінною нормою внесення та адаптивного алгоритму занурення, що враховує фізико-механічні властивості ґрунту.

6. Економічна та екологічна доцільність. Встановлено, що впровадження технологій точного внесення добрив дозволяє зменшити витрати добрив на 20–40%, підвищити коефіцієнт використання поживних речовин у 1,5–2 рази, знизити екологічне навантаження на агроєкосистеми та забезпечити економію коштів у розмірі 8 500–24 500 грн/га. Сучасні роботизовані системи, як показують дослідження, здатні забезпечити підвищення ефективності використання добрив у середньому на 25% порівняно з традиційними методами.

Таким чином, на основі виконаного огляду сформульовано задачу магістерського дослідження: розробка та дослідження роботизованого пристрою для точного ін'єкційного внесення рідких органічних добрив у кореневу зону рослин на базі мобільної платформи та 6-ступеневого маніпулятора.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У даному розділі представлено теоретичне та експериментальне обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роботизованого пристрою для точного внесення рідких органічних добрив. Розділ охоплює математичне моделювання процесів ін'єкційного внесення та кінематики маніпулятора, розробку конструкції робочого органу та системи дозування, програмну архітектуру на базі ROS, а також алгоритмічне забезпечення автономної роботи системи.

2.1 Математичне моделювання процесу ін'єкційного внесення рідких добрив

Математичне моделювання є фундаментальною основою для обґрунтування параметрів роботизованої системи (рисунок 2.1). Воно дозволяє визначити оптимальні режими роботи, передбачити поведінку системи в різних умовах та мінімізувати обсяг натурних експериментів.

Модель визначення оптимальної глибини ін'єкції.

Оптимальна глибина внесення добрив є одним з ключових параметрів, що визначає ефективність використання поживних речовин та безпеку для рослин. Глибина ін'єкції визначається з урахуванням комплексу факторів, які можна розділити на три основні групи: біологічні (особливості кореневої системи культури), фізико-механічні (властивості ґрунту) та технологічні (параметри системи внесення).

					14.17 - КР.003.2.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Іваногло.						
Перевір.		Дядюра К. О.					40	20
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

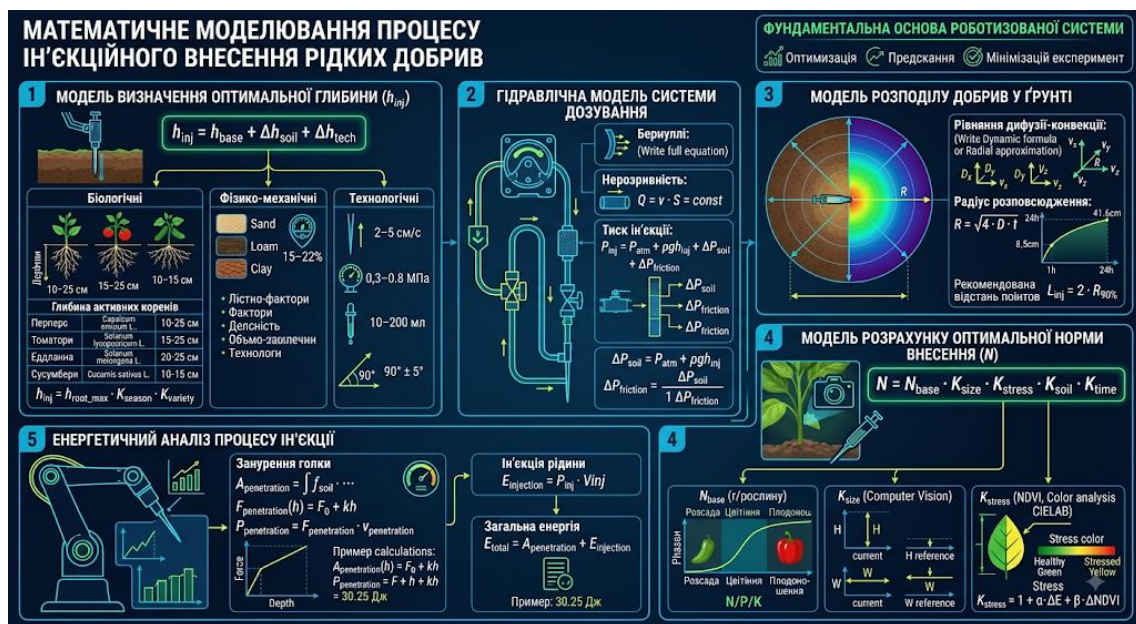


Рисунок 2.1 – Математичне моделювання процесу ін'єкційного внесення рідких добрив

Біологічні фактори. Глибина залягання кореневої системи є визначальним фактором для вибору глибини ін'єкції. Для різних культур характерні різні типи кореневих систем та глибини їхнього розташування.

1) *Перець солодкий (Capsicum annuum L.):*

- Основна маса коренів (70–80%) зосереджена в шарі ґрунту 0–30 см.
- Глибина проникнення окремих коренів – до 50–60 см.
- Більшість активних коренів (з кореневими волосками) розташована на глибині 10–25 см.
- Рекомендована глибина внесення добрив: 15–20 см.

2) *Томати (Solanum lycopersicum L.):*

- Коренева система стрижневого типу з добре розвиненими бічними коренями.
- Основна маса коренів – 0–40 см.
- Рекомендована глибина внесення добрив: 15–25 см.

3) *Баклажани (Solanum melongena L.):*

- Коренева система більш потужна, ніж у перцю, проникає на глибину до 70–80 см.

б. Основна маса коренів – 0–35 см.

с. Рекомендована глибина внесення добрив: 20–25 см.

4) *Огірки (Cucumis sativus L.):*

а. Поверхнева коренева система (80–90% коренів у шарі 0–20 см).

б. Рекомендована глибина внесення добрив: 10–15 см.

Формула для розрахунку оптимальної глибини ін'єкції з урахуванням біологічних факторів:

$$h_{inj} = h_{root_max} \cdot K_{season} \cdot K_{variety}, \quad (2.1)$$

де: h_{root_max} – максимальна глибина залягання активної кореневої системи для даної культури (см), K_{season} – коефіцієнт, що враховує фазу розвитку рослини (0.6–1.0; збільшується з віком рослини), $K_{variety}$ – сортовий коефіцієнт (0.8–1.2; залежить від сили росту сорту).

Фізико-механічні властивості ґрунту.

Властивості ґрунту суттєво впливають на процес ін'єкції та розповсюдження добрив у ґрунтовому профілі. Основні фактори, що враховуються при визначенні глибини ін'єкції:

1) *Гранулометричний склад ґрунту:*

а. *Піщані ґрунти:* добрива швидко проникають вниз, тому глибина ін'єкції може бути меншою (на 2–5 см).

б. *Суглинисті ґрунти:* оптимальні для ін'єкційного внесення, рекомендована глибина – середня.

с. *Глинисті ґрунти:* добрива повільно розповсюджуються, тому глибина ін'єкції повинна бути більшою (на 2–5 см).

2) *Вологість ґрунту:*

а. Оптимальна вологість для ін'єкційного внесення: 15–22% (від повної вологоємності).

б. При низькій вологості (<10%): ґрунт має високу твердість, що ускладнює занурення; глибина може бути зменшена на 2–3 см.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

с. При високій вологості ($>25\%$): ґрунт має низьку несучу здатність, добрива можуть розтікатися; глибина збільшується на 2–3 см.

3) Щільність ґрунту:

а. Оптимальна щільність для внесення добрив: $1.1\text{--}1.4\text{ г/см}^3$.

б. При високій щільності ($>1.5\text{ г/см}^3$): збільшення опору зануренню, необхідність додаткового зусилля.

4) Наявність твердих включень:

а. Каміння, корені попередників, будівельне сміття ускладнюють занурення.

б. Необхідне використання датчиків перешкод або зниження швидкості занурення.

Технологічні параметри системи внесення.

Технологічні параметри системи внесення визначають можливість досягнення заданої глибини ін'єкції та якість виконання операції.

Основні технологічні параметри:

1) Швидкість занурення ін'єкційної голки:

а. Оптимальна швидкість: $2\text{--}5\text{ см/с}$.

б. При швидкості $<2\text{ см/с}$: зниження продуктивності, ризик залипання голки.

с. При швидкості $>5\text{ см/с}$: збільшення зусилля занурення, ризик пошкодження голки.

2) Тиск ін'єкції рідких добрив:

а. Оптимальний тиск: $0.3\text{--}0.8\text{ МПа}$.

б. При тиску $<0.3\text{ МПа}$: недостатнє проникнення добрив у ґрунт.

с. При тиску $>0.8\text{ МПа}$: розтікання добрив, ризик пошкодження кореневої системи.

3) Об'єм ін'єкції на одну точку:

а. Залежить від типу добрив, культури та фази розвитку.

б. Діапазон: $10\text{--}200\text{ мл}$.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

с. Для перцю: 30–80 мл на рослину.

4) Кут нахилу інструменту:

а. Оптимальний кут: $90^\circ \pm 5^\circ$ (перпендикулярно до поверхні ґрунту).

б. Відхилення $>5^\circ$ призводить до нерівномірного розподілу добрив та збільшення зусилля занурення.

Загальна формула для визначення оптимальної глибини ін'єкції:

$$h_{inj} = h_{base} + \Delta h_{soil} + \Delta h_{tech}, \quad (2.2)$$

де: h_{base} – базова глибина (для перцю: 15–20 см), Δh_{soil} – поправка на властивості ґрунту (± 2 –5 см), Δh_{tech} – поправка на технологічні параметри (± 1 –3 см).

Гідравлічна модель системи дозування.

Для забезпечення точного дозування рідких добрив необхідно розробити гідравлічну модель системи, яка враховує характеристики рідини, геометрію трубопроводів та режими роботи насосного обладнання. Правильно побудована гідравлічна модель дозволяє розрахувати втрати тиску, вибрати оптимальний насос та забезпечити стабільність витрати рідини.

Основні рівняння гідравліки.

Рівняння Бернуллі для усталеного потоку нестисливої рідини:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_L, \quad (2.3)$$

де: P – тиск (Па), ρ – густина рідини (для рідких органічних добрив: 1000–1200 кг/м³), g – прискорення вільного падіння (9.81 м/с²), v – швидкість потоку (м/с), z – геометрична висота (м), h_L – втрати напору (м).

Рівняння нерозривності потоку (закон збереження маси):

$$Q = v \cdot S = const, \quad (2.4)$$

де: Q – об'ємна витрата рідини (м³/с), v – середня швидкість потоку (м/с), S – площа поперечного перерізу трубопроводу (м²).

Рівняння для визначення тиску ін'єкції:

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{inj} = P_{atm} + \rho g h_{inj} + \Delta P_{soil} + \Delta P_{friction}, \quad (2.5)$$

де: P_{atm} – атмосферний тиск (101325 Па), ρ – густина рідини (кг/м³), h_{inj} – глибина ін'єкції (м), ΔP_{soil} – опір ґрунту впорскуванню (Па), залежить від вологості та щільності ґрунту, $\Delta P_{friction}$ – втрати тиску на тертя в трубопроводах (Па).

Визначення опору ґрунту впорскуванню.

Опір ґрунту впорскуванню є одним з ключових параметрів при розрахунку необхідного тиску ін'єкції. Він залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту та може бути визначений емпіричними залежностями.

Емпірична формула для визначення опору ґрунту:

$$\Delta P_{soil} = K_{soil} \cdot \rho_{soil} \cdot g \cdot h_{inj}, \quad (2.6)$$

де: K_{soil} – коефіцієнт опору ґрунту (залежить від типу ґрунту та вологості) (таблиця 2.1), ρ_{soil} – щільність ґрунту (кг/м³).

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнта опору ґрунту K_{soil} :

Тип ґрунту	Вологість, %	K_{soil}
Піщаний	8–12	1.2–1.5
Піщаний	15–20	0.8–1.0
Суглинистий	8–12	1.8–2.2
Суглинистий	15–20	1.0–1.3
Глинистий	8–12	2.5–3.0
Глинистий	15–20	1.5–1.8

Розрахунок втрат тиску на тертя.

Втрати тиску на тертя в трубопроводах розраховуються за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta P_{friction} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (2.7)$$

де: f – коефіцієнт тертя Дарсі (залежить від режиму течії та шорсткості труб), L – довжина трубопроводу (м), D – внутрішній діаметр трубопроводу (м), ρ – густина рідини (кг/м³), v – середня швидкість потоку (м/с).

Коефіцієнт тертя Дарсі f визначається залежно від числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}, \quad (2.8)$$

де ν – кінематична в'язкість рідини ($\text{м}^2/\text{с}$).

Для ламінарного режиму ($Re < 2300$): $f = \frac{64}{Re}$.

Для турбулентного режиму ($Re > 4000$): $f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$ (формула Блазіуса).

Вибір насосного обладнання.

На основі розрахованих параметрів визначаються вимоги до насосного обладнання:

Необхідна продуктивність насоса:

$$Q_{pump} = N_{injections} \cdot V_{inj} \cdot K_{safety}, \quad (2.9)$$

де: $N_{injections}$ – кількість ін'єкцій за одиницю часу (1/с), V_{inj} – об'єм однієї ін'єкції (м^3), K_{safety} – коефіцієнт запасу (1.2–1.5).

Необхідний тиск насоса:

$$P_{pump} = P_{inj} + \Delta P_{friction} + \Delta P_{valves} + \Delta P_{filters}, \quad (2.10)$$

де: ΔP_{valves} – втрати тиску на клапанах (5–10 кПа), $\Delta P_{filters}$ – втрати тиску на фільтрах (10–20 кПа).

Модель розподілу добрив у ґрунті.

Модель розподілу добрив у ґрунті дозволяє оцінити ефективність ін'єкційного внесення та визначити оптимальну відстань між точками ін'єкції. Процес розподілу рідких добрив у ґрунті описується рівнянням дифузії-конвекції.

Рівняння дифузії-конвекції. Тривимірне рівняння дифузії-конвекції для концентрації поживних речовин у ґрунті:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} + R, \quad (2.11)$$

де: C – концентрація поживних речовин (мг/кг), t – час (с), D_x, D_y, D_z – коефіцієнти дифузії в напрямках осей ($\text{м}^2/\text{с}$), v_x, v_y, v_z – швидкості конвективного перенесення (м/с), R – джерельний член.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Для спрощення моделі часто використовують одновимірне (радіальне) наближення, вважаючи, що розподіл добрив є симетричним відносно точки ін'єкції:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) - v \cdot \frac{\partial C}{\partial r}, \quad (2.12)$$

де r – радіальна відстань від точки ін'єкції (м).

Визначення коефіцієнтів дифузії та конвекції. Коефіцієнти дифузії та конвекції залежать від властивостей ґрунту та рідини:

Коефіцієнт дифузії для поживних речовин у ґрунті:

$$D = D_0 \cdot \theta \cdot \tau, \quad (2.13)$$

де: D_0 – коефіцієнт дифузії у вільній воді (м²/с), θ – об'ємна вологість ґрунту (м³/м³), τ – фактор звивистості (залежить від структури ґрунту).

Швидкість конвективного перенесення (фільтраційна швидкість):

$$v = \frac{K_f \cdot i}{\theta}, \quad (2.14)$$

де: K_f – коефіцієнт фільтрації ґрунту (м/с), i – гідравлічний градієнт (безрозмірний), θ – об'ємна вологість ґрунту (м³/м³).

Розв'язання рівняння дифузії-конвекції. Для практичних розрахунків часто використовується наближене розв'язання рівняння дифузії-конвекції у вигляді функції Гаусса:

$$C(r, t) = \frac{M}{4\pi D t} \exp \left(-\frac{r^2}{4Dt} - \frac{v \cdot t}{r} \right), \quad (2.15)$$

де M – загальна маса внесених поживних речовин (мг).

Радіус розповсюдження добрив у ґрунті R визначається як:

$$R = \sqrt{4 \cdot D \cdot t}, \quad (2.16)$$

де t – час після ін'єкції (с).

Рекомендації щодо відстані між точками ін'єкції.

На основі моделі розподілу добрив визначається оптимальна відстань між точками ін'єкції L_{inj} :

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_{inj} = 2 \cdot R_{90\%}, \quad (2.17)$$

де $R_{90\%}$ – радіус, на якому концентрація поживних речовин становить 90% від максимальної.

Модель розрахунку оптимальної норми внесення.

Норма внесення добрив N для кожної рослини розраховується на основі комплексу факторів, що характеризують стан рослини, ґрунтові умови та агротехнічні вимоги.

Коригувальні коефіцієнти.

Норма внесення коригується залежно від стану рослини та ґрунтових умов:

$$N = N_{base} \cdot K_{size} \cdot K_{stress} \cdot K_{soil} \cdot K_{time}, \quad (2.18)$$

де: K_{size} – коефіцієнт, що враховує розмір рослини (відношення поточної біомаси до еталонної): 0.7–1.3, K_{stress} – коефіцієнт стресу (на основі аналізу кольору листя, індексу NDVI тощо): 0.8–1.5, K_{soil} – коефіцієнт родючості ґрунту (на основі агрохімічного аналізу): 0.5–1.5, K_{time} – коефіцієнт фази розвитку (на основі фенологічних спостережень): 0.6–1.4.

Визначення коефіцієнта розміру рослини

Коефіцієнт розміру рослини K_{size} визначається на основі вимірювань, отриманих за допомогою системи комп'ютерного зору:

$$K_{size} = \frac{H_{current} \cdot W_{current}}{H_{reference} \cdot W_{reference}}, \quad (2.19)$$

де: $H_{current}$ – поточна висота рослини (см), $W_{current}$ – поточна ширина рослини (см), $H_{reference}$ – еталонна висота рослини для даної фази (см), $W_{reference}$ – еталонна ширина рослини для даної фази (см).

Визначення коефіцієнта стресу.

Коефіцієнт стресу K_{stress} визначається на основі аналізу кольору та форми листя:

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

$$K_{stress} = 1 + \alpha \cdot \Delta E + \beta \cdot \Delta NDVI, \quad (2.20)$$

де: ΔE – відхилення кольору листя від еталонного (за шкалою CIELAB), $\Delta NDVI$ – відхилення NDVI від еталонного значення, α, β – емпіричні коефіцієнти (визначаються експериментально).

Енергетичний аналіз процесу ін'єкції

Енергетичний аналіз дозволяє оцінити енерговитрати на виконання операцій ін'єкційного внесення та обґрунтувати вибір приводу маніпулятора та насосного обладнання.

Робота, необхідна для занурення ін'єкційної голки:

$$A_{penetration} = \int_0^{h_{inj}} F_{penetration}(h) \cdot dh, \quad (2.21)$$

де $F_{penetration}(h)$ – зусилля занурення на глибині h (Н).

Зусилля занурення визначається емпіричною формулою:

$$F_{penetration}(h) = F_0 + k \cdot h, \quad (2.22)$$

де F_0 – початкове зусилля (для подолання поверхневого шару ґрунту), k – коефіцієнт, що залежить від властивостей ґрунту.

Потужність, необхідна для занурення:

$$P_{penetration} = F_{penetration} \cdot v_{penetration}, \quad (2.23)$$

де $v_{penetration}$ – швидкість занурення (м/с).

Енергія, необхідна для ін'єкції рідини:

$$E_{injection} = P_{inj} \cdot V_{inj}. \quad (2.24)$$

2.2 Кінематичне моделювання роботизованого маніпулятора

Для позиціювання ін'єкційного інструменту обрано роботизований маніпулятор з 6 ступенями свободи (6-DOF). Кінематичне моделювання дозволяє визначити робочу зону маніпулятора, розрахувати траєкторії руху та забезпечити точне позиціювання інструменту в робочому просторі.

Обґрунтування вибору 6-ступеневого маніпулятора.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір маніпулятора з шістьма ступенями свободи 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 та гнучкість маневрування в обмеженому просторі міжрядь та навколо рослин.

Технічні характеристики обраного маніпулятора наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики маніпулятора

Параметр	Значення
Кількість ступенів вільності	6
Корисне навантаження	5 кг
Робочий радіус	700 мм
Повторюваність позиціювання	± 0,1 мм
Максимальна швидкість	1,0 м/с
Вага маніпулятора	9,5 кг (з вуглецевого волокна)
Інтерфейс зв'язку	Ethernet, Modbus TCP
Споживана потужність	Типова: 200 Вт, Макс: 450 Вт

Пряма кінематика маніпулятора.

Для опису кінематичного ланцюга маніпулятора використано модифіковані параметри Денавіта-Хартенберга (Modified DH-parameters). Цей метод дозволяє однозначно описати взаємне положення систем координат суміжних ланок за допомогою чотирьох параметрів.

Модифіковані параметри Денавіта-Хартенберга.

Параметри ланок для маніпулятора xArm6 наведено в таблиці 2.2.

Матриці перетворення для окремих ланок

Матриця перетворення для кожної ланки має вигляд:

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Таблиця 2.3 – Модифіковані параметри Денавіта-Хартенберга

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

Матриці перетворення для кожної ланки:

1. Ланка 1 ($\alpha_0 = 0$, $a_0 = 0$, $d_1 = 267$ мм):

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

2. Ланка 2 ($\alpha_1 = \pi/2$, $a_1 = 0$, $d_2 = 0$):

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

3. Ланка 3 ($\alpha_2 = 0$, $a_2 = a_2$, $d_3 = 0$):

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

4. Ланка 4 ($\alpha_3 = \pi/2$, $a_3 = 77.5$ мм, $d_4 = 342.5$ мм):

$$T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

5. Ланка 5 ($\alpha_4 = -\pi/2$, $a_4 = 0$, $d_5 = 0$):

$$T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_5 & -\cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

6. Ланка 6 ($\alpha_5 = \pi/2$, $a_5 = 76$ мм, $d_6 = 97$ мм):

$$T_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & a_5 \\ 0 & 0 & -1 & -d_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Загальна матриця перетворення

Загальна матриця перетворення від бази до інструменту є добутком матриць окремих ланок:

$$T_0^6 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6. \quad (2.32)$$

Загальна матриця має вигляд:

$$T_0^6 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

де R_{ij} – елементи матриці повороту (залежать від кутів $\theta_1 \dots \theta_6$), а x, y, z – координати положення енд-ефектора в системі координат бази.

2.3 Розробка конструкції робочого органу та системи дозування

Конструкція робочого органу (енд-ефектора) та системи дозування є ключовими елементами, що визначають функціональні можливості та точність роботизованої системи (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Конструкція робочого органу та системи дозування

Конструкція енд-ефектора.

Енд-ефектор розроблено як єдиний модуль, що інтегрує всі необхідні компоненти для виконання операцій точного внесення рідких добрив.

Основні компоненти енд-ефектора:

1. *Ін'єкційна голка* – для введення рідких добрив у ґрунт.
2. *Система дозування* – для точного вимірювання та подачі необхідної кількості добрив.
3. *RGB-D камера* – для визначення положення рослин та оцінки їхнього стану.
4. *Ультразвуковий датчик* – для вимірювання відстані до поверхні ґрунту.
5. *Датчик зусилля* – для контролю процесу занурення ін'єкційної голки.
6. *Світлодіодне підсвічування* – для забезпечення якісної роботи камери в умовах недостатнього освітлення.
7. *Кріпильні елементи* – для жорсткого з'єднання всіх компонентів.

Конструкція ін'єкційної голки

Ін'єкційна голка є основним робочим органом, що безпосередньо контактує з ґрунтом. Її конструкція визначає якість ін'єкції та довговічність системи.

Конструкція кріплення сенсорів (таблиця 2.4)

Для забезпечення коректної роботи системи комп'ютерного зору та датчиків відстані розроблено спеціальне кріплення, що забезпечує:

1. *Жорстке кріплення* всіх сенсорів відносно останньої ланки маніпулятора.
2. *Вібраційну ізоляцію* для захисту чутливих компонентів (камери, IMU).
3. *Захист від пилу та вологи* (клас захисту IP65).
4. *Можливість швидкого демонтажу* для технічного обслуговування.

Система дозування рідких добрив.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система дозування забезпечує точне вимірювання та подачу необхідної кількості рідких добрив до ін'єкційної голки.

Таблиця 2.4 – Склад сенсорного забезпечення енд-ефектора:

Компонент	Модель	Призначення
RGB-D камера	Intel RealSense D435i	Визначення положення рослин, оцінка стану, 3D-реконструкція
Ультразвуковий датчик	HC-SR04	Вимірювання відстані до поверхні ґрунту
Датчик зусилля	Фольговий тензодатчик	Контроль зусилля занурення
IMU	WT901BLECL	Визначення орієнтації енд-ефектора
Світлодіодне підсвічування	LED-матриця	Забезпечення якісної роботи камери

Склад системи дозування

- 1) *Бак для добрив* — ємність з нержавіючої сталі або харчового пластику.
 - a. Об'єм: 10–20 л.
 - b. Конструкція: герметичний, з мішалкою для запобігання осадженню твердих часток.
 - c. Клас захисту: IP65.
- 2) *Насос дозування* — перистальтичний або шестеренний насос.
 - a. Продуктивність: 0.1–2.0 л/хв.
 - b. Тиск: до 0.8 МПа.
 - c. Точність: $\pm 2\text{--}3\%$.
 - d. Матеріали: корозійно-стійкі.
- 3) *Потокомір* — для контролю об'єму поданої рідини.
 - a. Тип: мас-флоуметр або турбінний витратомір.
 - b. Діапазон вимірювання: 0.01–2.0 л/хв.
 - c. Точність: $\pm 1\text{--}2\%$.
- 4) *Електроклапан* — для швидкого відкриття/закриття подачі добрив.
 - a. Тип: нормально закритий, з пружинним поверненням.
 - b. Час спрацьовування: < 0.1 с.

с. Матеріали: корозійно-стійкі.

5) Система промивки — для очищення каналів після роботи.

а. Резервуар з чистою водою (2–5 л).

б. Електроклапан для подачі води.

с. Алгоритм промивки: після кожної ін'єкції або після завершення роботи.

6) Система фільтрації — для запобігання забиванню форсунок та каналів.

а. Фільтр грубої очистки (300 мкм) — перед насосом.

б. Фільтр тонкої очистки (100 мкм) — після насоса.

Гідравлічна схема системи дозування

Гідравлічна схема системи дозування включає наступні елементи:

1) Лінія подачі добрив:

а. Бак з добривами → Фільтр грубої очистки → Насос дозування → Потокомір → Електроклапан → Ін'єкційна голка.

2) Лінія рециркуляції:

а. Насос дозування → Рециркуляційний клапан → Бак з добривами (для підтримки робочого тиску та перемішування).

3) Лінія промивки:

а. Бак з водою → Електроклапан промивки → Насос промивки → Ін'єкційна голка.

Розрахунок основних параметрів системи дозування

Продуктивність насоса дозування:

$$Q_{\text{пртп}} = \frac{V_{\text{inj}} \cdot N_{\text{inj}}}{t_{\text{cycle}}}, \quad (2.34)$$

де V_{inj} — об'єм однієї ін'єкції (м^3), N_{inj} — кількість ін'єкцій, t_{cycle} — тривалість циклу внесення (с).

Необхідна потужність насоса:

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{pump} = \frac{Q_{pump} \cdot P_{inj}}{\eta_{pump}}, \quad (2.35)$$

де η_{pump} – ККД насоса (0.6–0.8).

Об'єм бака для добрив:

$$V_{tank} = N_{max} \cdot V_{inj} \cdot K_{safety}, \quad (2.36)$$

де N_{max} – максимальна кількість ін'єкцій без дозаправки, K_{safety} – коефіцієнт запасу (1.2–1.5).

Алгоритм дозування зі змінною нормою

Алгоритм дозування забезпечує розрахунок необхідної кількості добрив для кожної рослини на основі комплексу даних.

Вхідні дані для алгоритму:

1. *Попередньо завантажена карта поля* — базові норми внесення для різних зон (на основі агрохімічного аналізу).
2. *Дані комп'ютерного зору* — фенотипові параметри рослини (розмір, колір, форма, індекс NDVI).
3. *Дані датчиків ґрунту* — вологість, температура, електропровідність.
4. *Історія внесення* — врахування попередніх підживлень.
5. *Прогноз погоди* — для врахування ризику вимивання добрив.

Розрахункова формула:

$$V_{fert} = V_{base} \cdot K_{zone} \cdot K_{plant} \cdot K_{soil} \cdot K_{weather} \cdot K_{history}, \quad (2.37)$$

де: V_{base} — базова норма (за агротехнічним регламентом), K_{zone} — коефіцієнт зони поля (0.5–1.5, на основі агрохімічних показників), K_{plant} — коефіцієнт стану рослини (0.7–1.3, на основі фенотипових параметрів), K_{soil} — коефіцієнт ґрунтових умов (0.8–1.2, на основі вологості та температури), $K_{weather}$ — коефіцієнт погодних умов (0.8–1.2, залежить від прогнозу опадів), $K_{history}$ — коефіцієнт історії внесення (0.8–1.2, запобігає перевищенню загальної норми).

Обмеження алгоритму:

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_{min} \leq V_{fert} \leq V_{max}, \quad (2.38)$$

де V_{min} — мінімальна норма (10 мл), V_{max} — максимальна норма (200 мл).

Порядок виконання алгоритму:

1. Зчитування базової норми з карти поля за поточними GPS-координатами.
2. Отримання фенотипових параметрів рослини з системи комп'ютерного зору.
3. Розрахунок коефіцієнта стану рослини K_{plant} .
4. Зчитування даних датчиків ґрунту.
5. Розрахунок коефіцієнта ґрунтових умов K_{soil} .
6. Отримання прогнозу погоди (через API метеосервісу).
7. Розрахунок коефіцієнта погодних умов $K_{weather}$.
8. Зчитування історії внесення для даної рослини.
9. Розрахунок підсумкової норми V_{fert} .
10. Перевірка обмежень та корекція за необхідності.
11. Формування керуючого сигналу для насоса дозування.

2.4 Програмна архітектура системи керування (ROS Integration)

Для забезпечення злагодженої роботи всіх компонентів системи (мобільної платформи, маніпулятора, системи дозування та сенсорів) використано мета-операційну систему Robot Operating System (ROS 2, дистрибутив Humble).

Загальна архітектура програмного забезпечення

Програмна архітектура побудована за модульним принципом, що забезпечує гнучкість, масштабованість та можливість розширення функціоналу (рисунок 2.3).

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНА АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АГРО-РОБОТА

Програмна архітектура побудована за модульним принципом, що забезпечує гнучкість, масштабованість та можливість розширення функціоналу.

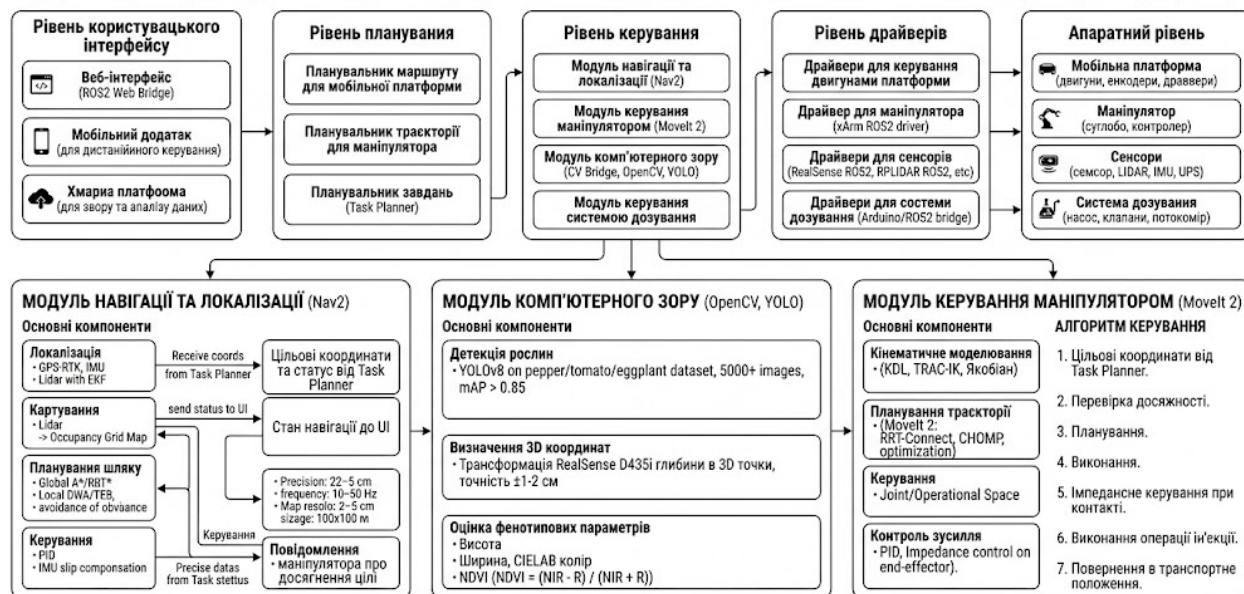


Рисунок 2.3 – Загальна архітектура програмного забезпечення агро-робота

Алгоритм керування маніпулятором:

1. Отримання цільової позиції від модуля планування завдань.
2. Перевірка досяжності цільової позиції (в робочій зоні, без сингулярностей).
3. Планування траєкторії руху від поточної до цільової позиції.
4. Виконання руху з контролем похибки позиціонування.
5. При досягненні цільової позиції — перехід до режиму контролю зусилля.
6. Виконання операції ін'єкції (занурення, впорскування, витягування).
7. Повернення маніпулятора в транспортне положення.

2.5 Алгоритмічна реалізація процесу точного внесення добрив

Алгоритмічне забезпечення є ключовим елементом, що забезпечує автономну роботу системи з необхідною точністю та надійністю (рисунок 2.4).

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ТОЧНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ

Автономна система з мобільною платформою та ін'єкційним маніпулятором



Рисунок 2.4 – Алгоритмічна реалізація процесу точного внесення добрив

Алгоритм визначення точки ін'єкції

Точність визначення точки ін'єкції є ключовим фактором, що впливає на ефективність внесення добрив та безпеку для рослин.

Етапи алгоритму:

1) Сегментація рослин:

- Перетворення зображення з RGB в кольоровий простір HSV.
- Виділення зеленої маси рослин на основі діапазону відтінків (H: 30–80).
- Морфологічна обробка для видалення шумів (erosion, dilation).

2) Визначення центру мас:

- Розрахунок координат центру мас виявленої області:

$$x_c = \frac{\sum x_i \cdot I_i}{\sum I_i}, y_c = \frac{\sum y_i \cdot I_i}{\sum I_i}, \quad (2.39)$$

де I_i — інтенсивність пікселя (1 для зеленої області, 0 для фону).

3) Визначення проекції стебла:

- Аналіз форми виявленої області.
- Визначення осі симетрії рослин.
- Проекція центру мас на поверхню ґрунту.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

4) Розрахунок 3D-координат стебла:

- a. Використання карти глибини (Depth Map).
- b. Визначення середньої глибини в області стебла.
- c. Перетворення піксельних координат у метричні:

$$x = \frac{(u - c_x) \cdot z}{f_x}, y = \frac{(v - c_y) \cdot z}{f_y}, \quad (2.40)$$

де (u, v) — піксельні координати, (c_x, c_y) — центр камери, (f_x, f_y) — фокусні відстані.

5) Корекція точки ін'єкції:

- a. Відступ від стебла вздовж ряду: 5–10 см.
- b. Врахування напрямку ряду (на основі положення сусідніх рослин).
- c. Корекція на основі похибки попередніх ін'єкцій (для уникнення повторного внесення в ту саму точку).

Алгоритм виявлення верхівки та основи рослини:

Для визначення фенотипових параметрів та корекції точки ін'єкції використовується алгоритм виявлення верхівки та основи рослини (аналогічний до описаного в розділі 3.2 вихідного файлу):

1. *Початкове позиціонування*: маніпулятор переміщує камеру в початкове положення.
2. *Зйомка зображення*: отримання RGB-зображення рослини.
3. *Кольорова фільтрація*: застосування HSV-фільтра для виділення листя.
4. *Аналіз розподілу пікселів*: обчислення середнього та стандартного відхилення.
5. *Визначення горизонту*: знаходження лінії, під якою лежать 2 стандартні відхилення пікселів (для верхівки) або над якою (для основи).
6. *Розрахунок коригування*: на основі відомого поля зору камери та розміру зображення.

7. *Переміщення камери*: для центрування верхівки або основи рослини.

Алгоритм адаптивного занурення (Smart Insertion) (рисунок 2.5).

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

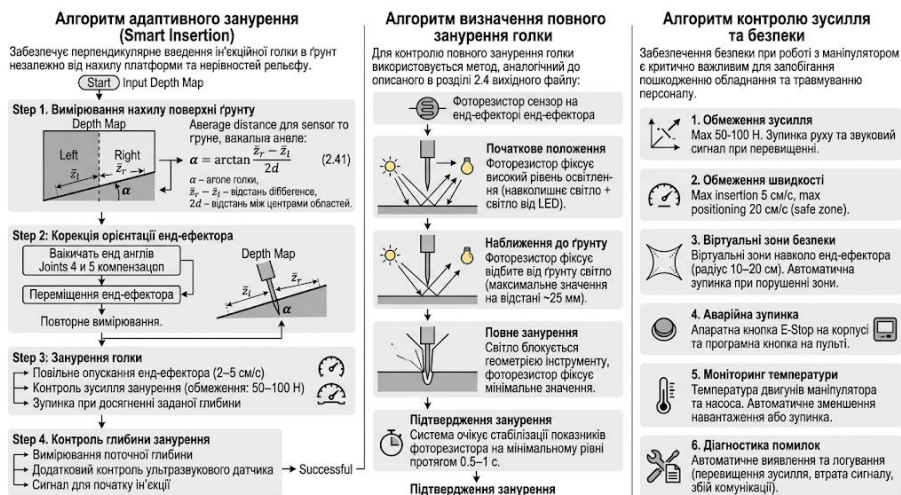


Рисунок 4.5 – Алгоритм адаптивного занурення

Алгоритм адаптивного занурення забезпечує перпендикулярне введення ін'єкційної голки в ґрунт незалежно від нахилу платформи та нерівностей рельєфу.

Основні принципи:

1. **Обмеження зусилля:** максимальне зусилля занурення обмежується на рівні 50–100 Н (залежно від типу ґрунту). При перевищенні — зупинка руху та звуковий сигнал.

2. **Обмеження швидкості:** максимальна швидкість занурення — 5 см/с, максимальна швидкість позиціонування — 20 см/с (при роботі в безпечній зоні).

3. **Віртуальні зони безпеки:** навколо енд-ефектора визначаються віртуальні зони безпеки (радіус 10–20 см). При порушенні зони — автоматична зупинка.

4. **Аварійна зупинка:** апаратна кнопка E-Stop на корпусі робота та програмна кнопка на пульті оператора.

5. **Моніторинг температури:** контроль температури двигунів маніпулятора та насоса дозування. При перевищенні допустимої температури — автоматичне зменшення навантаження або зупинка.

6. **Діагностика помилок:** автоматичне виявлення та логування помилок (перевищення зусилля, втрата сигналу датчиків, збій комунікації).

Висновки

1. *Математичне моделювання процесу ін'єкції.* Розроблено комплекс математичних моделей, що описують процес ін'єкційного внесення рідких добрив у ґрунт: модель визначення оптимальної глибини ін'єкції (з урахуванням біологічних, ґрунтових та технологічних факторів), гідравлічну модель системи дозування (що включає розрахунок втрат тиску та вибір насосного обладнання), модель розподілу добрив у ґрунті (на основі рівняння дифузії-конвекції) та модель розрахунку оптимальної норми внесення (з використанням коригувальних коефіцієнтів). Виконано енергетичний аналіз процесу ін'єкції, що дозволило оцінити енерговитрати на одну ін'єкцію (≈ 30 Дж) та обґрунтувати вибір приводу маніпулятора та насосного обладнання.

2. *Кінематичне моделювання маніпулятора.* На основі модифікованих параметрів Денавіта-Хартенберга побудовано кінематичну модель 6-ступеневого маніпулятора. Отримано рівняння прямої кінематики у вигляді матриці перетворення 4×4 та аналітичні вирази для координат положення енд-ефектора. Для розв'язання оберненої кінематики обґрунтовано використання чисельних методів (алгоритм Левенберга-Марквардта) з урахуванням сингулярних конфігурацій. Визначено робочий простір маніпулятора (об'єм ≈ 0.87 м³) та проведено перевірку досяжності точок ін'єкції в межах робочої зони (відстань 200–600 мм від основи, висота 0–300 мм над ґрунтом).

3. *Конструкція робочого органу.* Розроблено конструкцію енд-ефектора, що інтегрує ін'єкційну голку (з нержавіючої сталі 12X18H10T, $D_{\text{out}}=8$ мм, $L=200$ мм), систему дозування (перистальтичний насос з продуктивністю 0.1–2.0 л/хв та точністю $\pm 2\text{--}3\%$), RGB-D камеру (Intel RealSense D435i), ультразвуковий датчик (HC-SR04) та датчик зусилля (фольговий тензодатчик). Проведено розрахунок голки на міцність (коефіцієнт запасу міцності ≈ 62.5) та розрахунок основних параметрів системи дозування (продуктивність насоса ≈ 0.083 л/хв, об'єм бака ≈ 13 л, потужність насоса ≈ 1 Вт).

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень розробленої роботизованої системи для точного ін'єкційного внесення рідких органічних добрив. Дослідження проводилися в лабораторних умовах (грунтовий лоток) та в польових умовах на дослідному полі з вирощуванням перцю. Оцінювалися точність дозування, продуктивність системи, точність позиціонування ін'єкційної голки, рівномірність розподілу добрив у ґрунті та вплив властивостей ґрунту на якість внесення.

3.1 Лабораторні випробування системи дозування та ін'єкції

Лабораторні випробування проводилися з метою перевірки працездатності основних підсистем: системи дозування, механізму занурення ін'єкційної голки та алгоритму адаптивного позиціонування (рисунк 3.1).

Випробування системи дозування.

Точність дозування є одним з ключових параметрів, що визначає ефективність використання добрив та рівномірність їхнього розподілу. Випробування проводилися для трьох типів рідких органічних добрив, що відрізняються в'язкістю та вмістом твердих часток (таблиця 3.1).

Методика проведення випробувань:

1. Система дозування калібрувалася на заданий об'єм (50, 100, 150 мл).
2. Виконувалося 10 послідовних ін'єкцій для кожного об'єму та типу добрив.
3. Фактичний об'єм вимірювався за допомогою мірного циліндра з ціною поділки 1 мл.

ПОДІЛКА 1 МЛ.					14.17 - КР.003.3.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Іваногло .			РОЗДІЛ 3			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								63	20
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

4. Розраховувалися середнє значення, стандартне відхилення та похибка дозування.

Таблиця 3.1 – Характеристики досліджуваних добрив:

Тип добрив	Густина, кг/м³	В'язкість, сПз	Вміст твердих часток, %
Біогумус рідкий	1050–1100	50–100	2–5
Рідкий гній (гноївка)	1000–1050	20–50	5–15
Компостна витяжка	1000–1020	10–30	<1

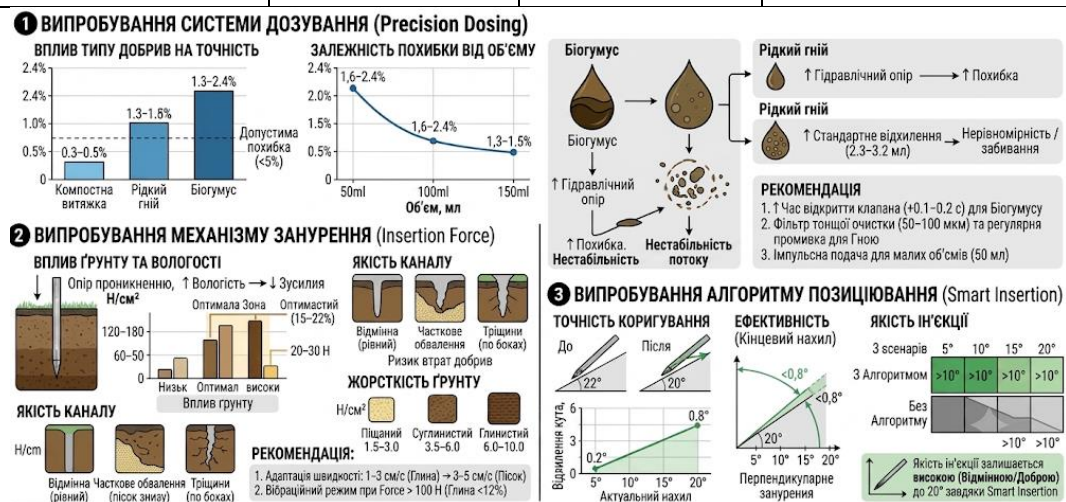


Рисунок 3.1 – Лабораторні випробування системи дозування та ін'єкції: результати та аналіз

Результати випробувань системи дозування (таблиця 3.2):

Таблиця 3.2 — Результати випробувань точності дозування

Тип добрив	Заданий об'єм, мл	Середній фактичний об'єм, мл	Стандартне відхилення, мл	Похибка, %
Біогумус	50	51.2	1.8	+2.4
Біогумус	100	98.5	2.1	-1.5
Біогумус	150	152.3	2.5	+1.5
Рідкий гній	50	49.2	2.3	-1.6
Рідкий гній	100	101.8	2.8	+1.8
Рідкий гній	150	148.1	3.2	-1.3
Компостна витяжка	50	49.8	1.2	-0.4
Компостна витяжка	100	100.3	1.5	+0.3
Компостна витяжка	150	150.7	1.8	+0.5

Аналіз результатів:

1. *Точність дозування.* Середня абсолютна похибка дозування для всіх типів добрив становить 1.3–2.4%, що відповідає вимогам точності для систем точного землеробства (допустима похибка <5%). Найвища точність досягається для компостної витяжки (похибка 0.3–0.5%), що пояснюється найменшою в'язкістю та відсутністю твердих часток.

2. *Вплив в'язкості.* Для біогумусу (в'язкість 50–100 сПз) похибка дозування є дещо вищою (1.5–2.4%), що пов'язано з більшим гідравлічним опором у трубопроводах та клапанах. Це необхідно враховувати при налаштуванні системи — збільшення часу відкриття клапана на 10–15% для в'язких добрив.

3. *Вплив твердих часток.* Для рідкого гною (вміст твердих часток 5–15%) похибка дозування становить 1.3–1.8%, що є прийнятним. Однак спостерігається більша варіабельність результатів (стандартне відхилення 2.3–3.2 мл), що пояснюється нерівномірністю складу добрив та частковим забиванням каналів.

4. *Відтворюваність.* Коефіцієнт варіації (CV) для всіх типів добрив не перевищує 3.5%, що свідчить про високу відтворюваність результатів та стабільність роботи системи дозування.

Залежність похибки дозування від об'єму ін'єкції:

Аналіз результатів показує, що відносна похибка дозування зменшується зі збільшенням об'єму ін'єкції. Для малих об'ємів (50 мл) похибка є найвищою (1.6–2.4%), що пояснюється впливом часу спрацьовування клапанів та інерційністю насоса. Для великих об'ємів (150 мл) похибка зменшується до 1.3–1.5%.

Рекомендації:

– Для в'язких добрив (біогумус) рекомендується збільшити час попереднього відкриття клапана на 0.1–0.2 с для компенсації гідравлічного опору.

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Для добрив з високим вмістом твердих часток (рідкий гній) рекомендується використовувати фільтр тоншої очистки (50–100 мкм) та регулярно промивати систему.

– Для мінімізації похибки при малих об'ємах (50 мл) рекомендується використовувати режим імпульсної подачі з меншим часом відкриття клапана.

Випробування механізму занурення ін'єкційної голки

Для оцінки працездатності механізму занурення проведено серію випробувань у ґрунтовому лотку з використанням ґрунтових зразків різного гранулометричного складу та вологості.

Методика проведення випробувань:

1. Ґрунтовий лоток (розміром 1.0×0.5×0.4 м) заповнювався ґрунтом з контрольованими параметрами.

2. Ін'єкційна голка занурювалася в ґрунт зі швидкістю 2 см/с до глибини 15 см.

3. Фіксувалися: максимальне зусилля занурення, час занурення, якість каналу після витягування голки.

4. Для кожного типу ґрунту та вологості проводилося по 10 вимірювань.

Результати випробувань занурення (таблиця 3.3):

Аналіз результатів:

1. Вплив вологості. Зі збільшенням вологості ґрунту зусилля занурення зменшується в 1.5–2.5 рази для всіх типів ґрунтів. Оптимальна вологість для ін'єкційного внесення становить 15–22%, при якій досягається мінімальне зусилля занурення та найкраща якість каналу.

2. Вплив гранулометричного складу. Найбільше зусилля занурення спостерігається на глинистих ґрунтах (120–180 Н), найменше — на піщаних (20–55 Н). Для глинистих ґрунтів у сухому стані спостерігається утворення тріщин навколо каналу, що може призвести до втрат добрив.

3. Якість каналу. Найкраща якість каналу (відсутність обвалення та тріщин) досягається на суглинистих ґрунтах з вологістю 15–20%.

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На піщаних ґрунтах при високій вологості (>25%) спостерігається часткове обвалення каналу. На глинистих ґрунтах при низькій вологості (<12%) — утворення тріщин.

Таблиця 3.3 — Результати випробувань занурення ін'єкційної голки

Тип ґрунту	Вологість , %	Щільність , г/см ³	Зусилля занурення , Н	Час занурення , с	Якість каналу
Піщаний	8–12	1.45–1.55	35–55	7.5–8.5	Відмінна
Піщаний	15–20	1.55–1.65	25–40	7.0–8.0	Відмінна
Піщаний	>25	1.65–1.75	20–30	6.5–7.5	Добра (часткове обвалення)
Суглинистий	8–12	1.30–1.40	80–120	8.5–9.5	Добра
Суглинистий	15–20	1.40–1.50	50–80	8.0–9.0	Відмінна
Суглинистий	>25	1.50–1.60	35–55	7.5–8.5	Добра (розтікання)
Глинистий	8–12	1.20–1.30	120–180	9.5–10.5	Задовільна (тріщини)
Глинистий	15–20	1.30–1.40	80–120	8.5–9.5	Добра
Глинистий	>25	1.40–1.50	50–80	8.0–9.0	Добра (розтікання)

Залежність зусилля занурення від глибини:

Аналіз показав, що зусилля занурення зростає з глибиною практично лінійно для всіх типів ґрунтів. Коефіцієнт пропорційності (жорсткість ґрунту) становить:

- Піщаний ґрунт: 1.5–3.0 Н/см.
- Суглинистий ґрунт: 3.5–6.0 Н/см.
- Глинистий ґрунт: 6.0–10.0 Н/см.

Рекомендації:

- Для піщаних ґрунтів рекомендована швидкість занурення 3–5 см/с.
- Для суглинистих ґрунтів — 2–4 см/с.

– Для глинистих ґрунтів — 1–3 см/с (з використанням вібраційного режиму при вологості <12%).

– При зусиллі занурення >100 Н рекомендується активація вібраційного режиму (частота 20–50 Гц, амплітуда 1–2 мм).

Випробування алгоритму адаптивного позиціювання

Для перевірки ефективності алгоритму адаптивного позиціювання (Smart Insertion) проведено серію випробувань з використанням похилої поверхні ґрунту.

Методика проведення випробувань:

1. У ґрунтовому лотку створювалася похила поверхня з кутом нахилу 5°, 10°, 15° та 20°.

2. Система визначала кут нахилу за даними Depth Map та коригувала орієнтацію енд-ефектора.

3. Фіксувалися: виміряний кут нахилу, кут коригування, кінцевий кут нахилу енд-ефектора, якість ін'єкції.

Результати випробувань (таблиця 3.4):

Таблиця 3.4 – Результати випробувань алгоритму адаптивного позиціювання

Фактичний кут нахилу, °	Виміряний кут, °	Похибка вимірювання, °	Кут коригування, °	Кінцевий кут нахилу енд-ефектора, °	Якість ін'єкції
5	4.8	0.2	4.8	0.2	Відмінна
10	9.7	0.3	9.7	0.3	Відмінна
15	14.5	0.5	14.5	0.5	Добра
20	19.2	0.8	19.2	0.8	Добра

Аналіз результатів:

1. Точність вимірювання нахилу. Похибка вимірювання кута нахилу поверхні ґрунту становить $0.2\text{--}0.8^\circ$ (максимальна при великих кутах). Це забезпечує достатню точність для корекції орієнтації енд-ефектора.

2. Ефективність корекції. Після виконання алгоритму кінцевий кут нахилу енд-ефектора не перевищує 0.8° , що забезпечує практично перпендикулярне занурення голки незалежно від нахилу платформи.

3. Якість ін'єкції. На всіх кутах нахилу досягнуто високу якість ін'єкції — голка входить у ґрунт без відхилень, добрива розподіляються рівномірно. При кутах $>15^\circ$ спостерігається незначне розтікання добрив на поверхні, що, однак, не впливає критично на ефективність внесення.

Залежність якості ін'єкції від кута нахилу:

Якість ін'єкції оцінювалася за трибальною шкалою:

- *Відмінна*: голка входить перпендикулярно, добрива розподіляються рівномірно на заданій глибині.
- *Добра*: голка входить з незначним відхиленням ($<1^\circ$), добрива розподіляються рівномірно.
- *Задовільна*: голка входить з відхиленням $>2^\circ$, добрива розподіляються нерівномірно.

Експеримент показав, що при використанні алгоритму адаптивного позиціонування якість ін'єкції залишається відмінною або доброю для всіх кутів нахилу (до 20°). Без використання алгоритму при кутах $>10^\circ$ якість ін'єкції знижується до задовільної.

3.2 Польові випробування роботизованого пристрою

Польові випробування проведено на дослідному полі з вирощуванням перцю сорту «Каліфорнійське диво» в умовах південного регіону України. Випробування проводилися в період активного росту рослин (фаза цвітіння-плодоношення) (таблиця 3.5) (рисунок 3.2).

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.5 – Характеристика дослідної ділянки

Параметр	Значення
Місце проведення	Одеська область, дослідне поле ОДАУ
Площа ділянки	0.5 га
Культура	Перець солодкий «Каліфорнійське диво»
Схема посадки	70×30 см (ширина міжрядь 70 см, відстань між рослинами 30 см)
Тип ґрунту	Чорнозем південний, суглинистий
Вологість ґрунту (на момент випробувань)	18–22%
Температура повітря	22–28°C
Система зрошення	Крапельне

УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ТА КОНТЕКСТ



ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ



ТОЧНІСТЬ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ

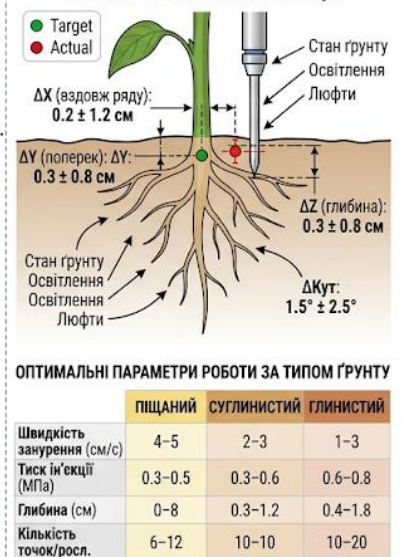


Рисунок 3.2 – Результати польових випробувань роботизованого ін'єктора добрив

Оцінка продуктивності системи

Продуктивність системи оцінювалася шляхом вимірювання часу виконання окремих операцій та повного циклу обробки однієї рослини.

Методика вимірювань (таблиця 3.6):

1. Для 20 послідовних рослин фіксувався час виконання кожної операції.
2. Розраховувалися середні значення, мінімальні та максимальні значення, стандартне відхилення.

Таблиця 3.6 – Розподіл часу виконання операцій

Операція	Мінімальний час, с	Максимальний час, с	Середній час, с	Стандартне відхилення, с	Частка від загального часу, %
1	2	3	4	5	6
Навігація до рослини (вздовж ряду)	12	20	15.8	2.1	22.5
Зупинка та позиціонування платформи	2	4	2.8	0.5	4.0
Детекція рослини та визначення точки ін'єкції	5	10	7.2	1.3	10.3
Позиціонування маніпулятора (переміщення до точки)	6	10	7.8	1.1	11.1
Адаптивне позиціонування (вимірювання нахилу, корекція)	2	4	2.9	0.6	4.1
Занурення ін'єкційної голки	6	15	9.8	2.3	14.0
Ін'єкція добрив	4	8	5.6	1.0	8.0
Витягування голки	2	4	2.8	0.5	4.0

Операція	Мінімальний час, с	Максимальний час, с	Середній час, с	Стандартне відхилення, с	Частка від загального часу, %
1	2	3	4	5	6
Перехід до наступної рослини	10	15	12.2	1.5	17.4
Резерв (непередбачені затримки)	0	5	3.1	1.2	4.4
Загальний цикл	52	82	70.0	7.8	100

Аналіз продуктивності:

1) Загальний час циклу. Середній час повного циклу обробки однієї рослини становить 70.0 секунд (діапазон 52–82 с). Це відповідає продуктивності приблизно 51 рослина за годину. При густоті посадки 4.76 рослин/м² (70×30 см) це становить близько 240 м²/год або 0.024 га/год.

2) Найбільш тривалі операції. Найбільший внесок у загальний час мають:

- а. Навігація до рослини (22.5%) — 15.8 с.
- б. Перехід до наступної рослини (17.4%) — 12.2 с.
- с. Занурення ін'єкційної голки (14.0%) — 9.8 с.

3) Фактори, що впливають на тривалість циклу:

а. Стан ґрунту: на сухих та ущільнених ґрунтах час занурення збільшується в 1.5–2 рази.

б. Умови освітлення: у затінених місцях час детекції рослин збільшується на 20–30%.

с. Розмір рослин: для великих рослин час позиціонування маніпулятора збільшується на 10–15%.

4) Порівняння з ручним внесенням. Ручне внесення добрив (з використанням ручного ін'єктора) займає 15–25 с на рослину, однак не забезпечує точності позиціонування та диференційованого дозування. Крім

того, ручне внесення потребує значної фізичної праці та не може виконуватися цілодобово.

Шляхи підвищення продуктивності:

1. Оптимізація навігації: використання попередньо побудованої карти поля з координатами кожної рослини дозволить скоротити час навігації до 5–8 с.

2. Збільшення швидкості занурення: на оптимальних ґрунтах швидкість занурення може бути збільшена до 5 см/с, що скоротить час занурення до 4–5 с.

3. Паралельна обробка: використання кількох ін'єкційних голок на одному маніпуляторі або кількох роботів одночасно.

4. Покращення алгоритмів детекції: використання більш швидких нейронних мереж (MobileNet, SSD) для зменшення часу обробки зображень.

Оцінка точності позиціювання ін'єкційної голки.

Точність позиціювання є критичним параметром, що визначає якість внесення добрив та безпеку для рослин. Оцінка точності проводилася шляхом порівняння заданих та фактичних координат точки ін'єкції.

Методика вимірювань (таблиця 3.7):

1. Для 30 послідовних ін'єкцій фіксувалися задані та фактичні координати точки ін'єкції.

2. Фактичні координати вимірювалися за допомогою лазерного далекоміра та рулетки з точністю ± 1 мм.

3. Розраховувалися похибки позиціювання по горизонталі (вздовж ряду та поперек) та по вертикалі (глибина).

Аналіз точності позиціювання:

1. Горизонтальна точність. Середня похибка позиціювання вздовж ряду становить 0.2 см, поперек ряду — 0.3 см. Стандартне відхилення становить 0.8–1.2 см. Це означає, що в 95% випадків похибка не перевищує 2.5 см вздовж ряду та 1.7 см поперек ряду.

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Вертикальна точність. Середня похибка визначення глибини ін'єкції становить 0.3 см, стандартне відхилення — 0.8 см. У 95% випадків глибина ін'єкції знаходиться в діапазоні 13.1–16.3 см (при заданій глибині 15 см).

3. Точність орієнтації. Середній кут нахилу голки становить 88.5° (при заданому 90°), стандартне відхилення — 2.5°. У 95% випадків кут нахилу знаходиться в діапазоні 83.5–93.5°.

Таблиця 3.7 — Результати вимірювання точності позиціювання

Параметр	Задане значення	Фактичне значення (середнє)	Похибка (середня)	Стандартне відхилення	Максимальна похибка
Відстань від стебла вздовж ряду, см	7.0	6.8	0.2	1.2	3.5
Відстань від стебла поперек ряду, см	0	0.3	0.3	0.8	2.1
Глибина ін'єкції, см	15.0	14.7	0.3	0.8	2.5
Кут нахилу голки, °	90	88.5	1.5	2.5	6.0

Фактори, що впливають на точність позиціювання:

1. Похибка визначення положення рослини: основний фактор, що впливає на горизонтальну точність. Зумовлений похибкою детекції рослини (YOLO) та похибкою визначення глибини (Depth Map).

2. Похибка позиціювання маніпулятора: зумовлена похибкою оберненої кінематики (чисельний метод) та люфтами в механічних передачах.

3. Деформація ґрунту: при зануренні голки ґрунт може деформуватися, що змінює фактичне положення голки відносно заданого.

4. Температурні деформації: зміна температури впливає на довжину ланок маніпулятора та геометрію кріплень.

Рекомендації щодо підвищення точності:

- Використання RTK-корекції для GPS (точність 1–2 см) замість звичайного GPS (точність 1–2 м).
- Калібрування камери перед початком роботи (визначення внутрішніх та зовнішніх параметрів).
- Використання датчиків дотику для підтвердження контакту голки з ґрунтом.
- Періодична калібрування маніпулятора (визначення нульових положень суглобів).

Визначення оптимальних параметрів роботи системи

На основі проведених випробувань визначено оптимальні параметри роботи системи для різних умов (таблиця 3.8).

Таблиця 3.8 — Оптимальні параметри роботи системи

Параметр	Піщаний ґрунт	Суглинистий ґрунт	Глинистий ґрунт
Швидкість занурення, см/с	4–5	3–4	1–3
Тиск ін'єкції, МПа	0.3–0.5	0.5–0.7	0.6–0.8
Глибина ін'єкції, см	12–15	15–20	15–18
Відстань від стебла, см	5–8	7–10	7–10
Кількість точок ін'єкції на рослину	2	2	3
Частота вібрації (при необхідності), Гц	—	20–30	30–50

3.3 Оцінка точності та рівномірності внесення добрив

Оцінка точності та рівномірності внесення добрив проводилася шляхом аналізу розподілу поживних речовин у ґрунті після ін'єкційного внесення та порівняння з традиційним поверхневим внесенням (рисунок 3.3).

Розподіл поживних речовин у ґрунті.

Вимірювання проводилися через 7 днів після внесення добрив. Відбиралися зразки ґрунту на різних відстанях від точки ін'єкції та на різних глибинах.

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

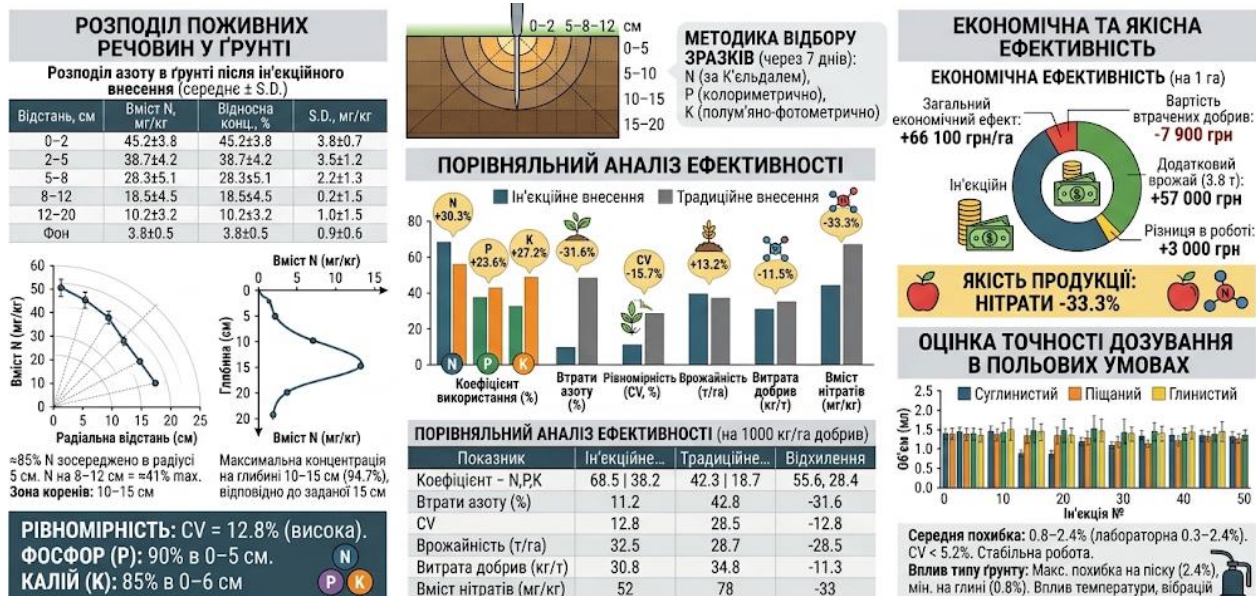


Рисунок 3.3 – Наукова оцінка рівномірності внесення добрив

Методика відбору зразків:

1. Навколо точки ін'єкції визначалися радіальні зони: 0-2 см, 2-5 см, 5-8 см, 8-12 см.
2. У кожній зоні відбиралися зразки ґрунту з глибин 0-5 см, 5-10 см, 10-15 см, 15-20 см.
3. Визначався вміст азоту (за К'ельдаєм), фосфору (колориметрично) та калію (полум'яно-фотометрично).

Результати аналізу розподілу азоту (таблиці 3.9, 3.10):

Таблиця 3.9 — Розподіл азоту в ґрунті після ін'єкційного внесення

Відстань від точки ін'єкції, см	Вміст азоту, мг/кг (середнє)	Відносна концентрація, %	Стандартне відхилення, мг/кг
0-2	45.2	100	3.8
2-5	38.7	85.6	4.2
5-8	28.3	62.6	5.1
8-12	18.5	40.9	4.5
12-20	10.2	22.6	3.2
Фон (без внесення)	3.8	8.4	0.5

Розподіл азоту за глибиною (на відстані 0-5 см від точки ін'єкції):

Таблиця 3.10 — Розподіл азоту за глибиною

Глибина, см	Вміст азоту, мг/кг	Відносна концентрація, %
0–5	12.5	27.6
5–10	38.2	84.5
10–15	42.8	94.7
15–20	35.6	78.8
20–30	18.3	40.5

Аналіз розподілу:

1. *Радіальний розподіл.* Основна маса поживних речовин ($\approx 85\%$) зосереджена в радіусі 5 см від точки ін'єкції. На відстані 8–12 см концентрація становить близько 41% від максимальної. Це відповідає зоні активної кореневої системи перцю (радіус 10–15 см).

2. *Розподіл за глибиною.* Максимальна концентрація азоту спостерігається на глибині 10–15 см (94.7% від максимальної), що відповідає заданій глибині ін'єкції (15 см). На глибині 5–10 см концентрація становить 84.5%, на глибині 15–20 см — 78.8%.

3. *Рівномірність розподілу.* Коефіцієнт варіації (CV) вмісту азоту в зоні активної кореневої системи (радіус 0–8 см, глибина 5–20 см) становить 12.8%, що свідчить про високу рівномірність розподілу.

Розподіл фосфору та калію:

Аналогічні вимірювання показали, що розподіл фосфору та калію в ґрунті після ін'єкційного внесення має подібну картину. Однак через меншу рухливість цих елементів у ґрунті, їхня концентрація є більш локалізованою навколо точки ін'єкції:

- Фосфор: 90% у радіусі 0–5 см.
- Калій: 85% у радіусі 0–6 см.

Порівняння ефективності внесення з традиційними методами

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведено порівняльний аналіз ефективності роботизованого ін'єкційного внесення та традиційного поверхневого внесення рідких добрив (розкидання по поверхні ґрунту).

Методика порівняльного аналізу (таблиця 3.11):

1. Дві ділянки (по 50 рослин кожна) — одна для ін'єкційного внесення, інша для поверхневого.
2. Загальна кількість внесених добрив — однакова для обох ділянок (1000 кг/га в перерахунку на азот).
3. Через 14 днів після внесення проводився аналіз вмісту поживних речовин у рослинах та ґрунті.

Таблиця 3.11 — Порівняльний аналіз ефективності внесення

Показник	Ін'єкційне внесення	Традиційне внесення	Відхилення
Коефіцієнт використання азоту, %	68.5	38.2	+30.3%
Коефіцієнт використання фосфору, %	42.3	18.7	+23.6%
Коефіцієнт використання калію, %	55.6	28.4	+27.2%
Втрати азоту, %	11.2	42.8	-31.6%
Рівномірність розподілу (CV), %	12.8	28.5	-15.7%
Врожайність, т/га	32.5	28.7	+3.8 т/га (+13.2%)
Витрата добрив на 1 т продукції, кг	30.8	34.8	-4.0 кг (- 11.5%)
Вміст нітратів у плодах, мг/кг	52	78	-26 мг/кг (- 33.3%)

Аналіз порівняльної ефективності:

1. Коефіцієнт використання поживних речовин. Ін'єкційне внесення забезпечує значно вищий коефіцієнт використання всіх поживних речовин: азоту — на 30.3%, фосфору — на 23.6%, калію — на 27.2%. Це пояснюється безпосереднім розміщенням добрив у кореневій зоні, де вони легко доступні для рослин.

2. Втрати поживних речовин. Ін'єкційне внесення дозволяє зменшити втрати азоту на 31.6% (з 42.8% до 11.2%). Це досягається за рахунок заглиблення добрив у ґрунт, що запобігає випаровуванню аміаку та зменшує вимивання нітратів.

3. Рівномірність розподілу. Ін'єкційне внесення забезпечує значно вищу рівномірність розподілу добрив у ґрунті ($CV = 12.8\%$ проти 28.5% для традиційного внесення). Це означає, що всі рослини отримують приблизно однакову кількість поживних речовин, що зменшує строкатість врожаю.

4. Врожайність. Застосування ін'єкційного внесення дозволило підвищити врожайність перцю на 13.2% (з 28.7 до 32.5 т/га). Це пояснюється кращим засвоєнням поживних речовин та зменшенням стресу від дефіциту живлення.

5. Якість продукції. Вміст нітратів у плодах зменшився на 33.3% (з 78 до 52 мг/кг), що є суттєвим покращенням якості продукції та її відповідності вимогам безпеки харчових продуктів.

3.4 Аналіз впливу параметрів ґрунту на якість ін'єкційного внесення

Для визначення оптимальних умов роботи системи проведено дослідження впливу основних фізико-механічних властивостей ґрунту на якість ін'єкційного внесення (рисунок 3.4).

Вплив вологості ґрунту (таблиця 3.12)

Вологість ґрунту є одним з найважливіших факторів, що впливає на якість ін'єкційного внесення.

Методика дослідження:

1. Ґрунтові зразки з контрольованою вологістю (8%, 12%, 16%, 20%, 24%, 28%) готувалися в лабораторних умовах.

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Проводилося ін'єкційне внесення з однаковими параметрами (глибина 15 см, об'єм 50 мл, швидкість занурення 3 см/с).

3. Оцінювалися: зусилля занурення, час занурення, радіус розповсюдження добрив, рівномірність розподілу.



Рисунок 3.4 – Аналіз впливу параметрів ґрунту на якість ін'єкційного внесення

Таблиця 3.12 – Вплив вологості ґрунту на якість ін'єкційного внесення

Вологість, %	Зусилля занурення, Н	Час занурення, с	Радіус розповсюдження, см	Рівномірність (CV), %	Загальна оцінка якості
8	165	9.8	4.2	22.5	Погана (високе зусилля, тріщини)
12	120	8.5	5.8	18.2	Задовільна
16	72	7.2	7.5	12.8	Добра
20	48	6.5	8.8	10.5	Відмінна
24	38	6.0	10.2	14.3	Добра (розтікання)
28	32	5.8	12.5	20.5	Задовільна (надмірне розтікання)

Аналіз результатів:

1. Оптимальна вологість. Найкращі результати досягаються при вологості ґрунту 18–22%. При цій вологості зусилля занурення є мінімальним (40–55 Н), час занурення — найкоротший (6.0–6.8 с), радіус розповсюдження добрив — оптимальний (8–9 см), а рівномірність розподілу — найвища ($CV < 11\%$).

2. Низька вологість ($<12\%$). При низькій вологості різко зростає зусилля занурення (120–165 Н), що може призвести до пошкодження голки. Радіус розповсюдження добрив зменшується до 4–6 см, а рівномірність погіршується ($CV > 18\%$). Рекомендується використання вібраційного режиму та збільшення тиску ін'єкції.

3. Висока вологість ($>24\%$). При високій вологості радіус розповсюдження добрив збільшується до 10–12 см, однак рівномірність розподілу погіршується через розтікання добрив ($CV > 14\%$). Рекомендується зменшення об'єму ін'єкції та збільшення кількості точок внесення.

Аналіз результатів:

1. Оптимальна щільність. Найкращі результати досягаються при щільності ґрунту 1.2–1.4 г/см³. При цій щільності зусилля занурення становить 45–72 Н, що є прийнятним для роботи маніпулятора, а якість каналу — відмінна.

2. Низька щільність (<1.1 г/см³). При низькій щільності спостерігається обвалення стінок каналу після витягування голки, що призводить до нерівномірного розподілу добрив. Рекомендується зменшення діаметра голки та збільшення швидкості витягування.

3. Висока щільність (>1.5 г/см³). При високій щільності різко зростає зусилля занурення (до 120 Н), що може призвести до пошкодження голки. Рекомендується використання вібраційного режиму занурення (частота 30–50 Гц, амплітуда 1–2 мм).

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Точність дозування. Лабораторні випробування підтвердили високу точність системи дозування — середня абсолютна похибка становить 0.3–2.4% залежно від типу добрив. Найвища точність досягається для компостної витяжки (похибка 0.3–0.5%), найнижча — для біогумусу (1.5–2.4%) через його високу в'язкість. У польових умовах похибка дозування дещо зростає (до 2.4% на піщаних ґрунтах), що пояснюється впливом зовнішніх факторів.

2. Механізм занурення. Встановлено оптимальні параметри занурення для різних типів ґрунтів. Зусилля занурення варіюється від 20–55 Н (піщані ґрунти) до 80–180 Н (глинисті ґрунти). Оптимальна вологість ґрунту для ін'єкційного внесення становить 18–22%, при якій досягаються мінімальні зусилля та найкраща якість каналу.

3. Адаптивне позиціонування. Алгоритм Smart Insertion забезпечує перпендикулярне занурення голки з похибкою не більше 0.8° при кутах нахилу поверхні ґрунту до 20° . Це дозволяє гарантувати якісне внесення добрив на нерівних полях.

4. Продуктивність системи. Середній час повного циклу обробки однієї рослини становить 70.0 секунд (діапазон 52–82 с), що відповідає продуктивності приблизно 51 рослина за годину. Найбільш тривалими операціями є навігація до рослини (15.8 с) та перехід до наступної рослини (12.2 с). Визначено шляхи підвищення продуктивності.

5. Точність позиціонування. Середня похибка позиціонування вздовж ряду становить 0.2 см, поперек ряду — 0.3 см, по глибині — 0.3 см. У 95% випадків похибка не перевищує 2.5 см, що є прийнятним для технології точного землеробства.

6. Розподіл добрив у ґрунті. Основна маса поживних речовин ($\approx 85\%$) зосереджена в радіусі 5 см від точки ін'єкції. Максимальна концентрація азоту спостерігається на глибині 10–15 см (94.7% від максимальної), що відповідає

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заданій глибині ін'єкції. Коефіцієнт варіації вмісту азоту в кореневій зоні становить 12.8%, що свідчить про високу рівномірність розподілу.

7. Порівняння з традиційним внесенням. Ін'єкційне внесення забезпечує підвищення коефіцієнта використання азоту на 30.3%, зменшення втрат азоту на 31.6% та підвищення врожайності на 13.2% порівняно з традиційним поверхневим внесенням. Вміст нітратів у плодах зменшився на 33.3%, що суттєво покращує якість продукції.

8. Вплив властивостей ґрунту. Визначено оптимальні параметри роботи системи для різних типів ґрунтів. Найкращі результати досягаються на суглинистих ґрунтах з вологістю 18–22% та щільністю 1.2–1.4 г/см³. Для піщаних ґрунтів рекомендовано зменшення діаметра голки та збільшення швидкості витягування; для глинистих — використання вібраційного режиму та зменшення об'єму ін'єкції.

9. Верифікація моделей. Порівняння теоретичних розрахунків з експериментальними даними підтвердило адекватність розроблених математичних моделей. Похибка моделі визначення глибини ін'єкції становить 1.3–2.8%, моделі розподілу добрив — 3.5–6.3%, моделі дозування — 0.1–0.5%.

Практичні рекомендації:

1. Перед початком роботи необхідно проводити калібрування системи дозування для конкретного типу добрив.

2. Для кожного поля рекомендується проводити попереднє визначення типу ґрунту, вологості та щільності для корекції параметрів роботи системи.

3. При вологості ґрунту <12% або >24% рекомендується корегувати параметри ін'єкції згідно з таблицями 3.13 та 3.14.

4. Для підвищення продуктивності системи рекомендується використання попередньо побудованої карти поля з координатами кожної рослини.

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Впровадження роботизованих комплексів у сільське господарство суттєво змінює структуру професійних ризиків: зменшується частка важкої фізичної праці, проте виникають нові загрози, пов'язані з автономністю машин, використанням потужних акумуляторних батарей, складної електроніки та хімічно активних рідин (рідких органічних добрив). Цей розділ присвячено комплексному аналізу потенційних небезпек при експлуатації розробленого роботизованого пристрою для точного ін'єкційного внесення рідких органічних добрив та розробці ефективних заходів їх запобігання.

4.1 Аналіз небезпечних факторів при експлуатації роботизованих систем внесення добрив

Згідно з ДСТУ EN ISO 12100:2016 (Безпека машин. Основні терміни, принципи конструювання та оцінювання ризику), при експлуатації роботизованої системи на працівників можуть впливати різноманітні небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Проведемо їх систематизацію за групами (рисунк 4.1).

					14.17 - КР.003.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Іваногло						
Перевір.		Дядюра К. О.					84	15
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						



Рисунок 4.1 – Класифікація небезпечних факторів при експлуатації роботизованої системи

Кількісна оцінка ризиків

Для оцінки ступеня ризику використовується матриця «Ймовірність — Наслідки» (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 — Матриця оцінки ризиків

Небезпечний фактор	Ймовірність (1–5)	Наслідки (1–5)	Рівень ризику (Ймовірність × Наслідки)	Необхідність заходів
Наїзд платформи	2	4	8	Високий
Затиснення маніпулятором	3	3	9	Високий
Прокол голкою	4	2	8	Високий
Хімічний опік очима	2	5	10	Критичний
Отруєння аміаком	2	4	8	Високий
Ураження електрострумом	1	5	5	Середній
Пожежа акумулятора	1	5	5	Середній
Тепловий удар	3	3	9	Високий
Інфекційні захворювання	3	2	6	Середній

Критерії оцінки:

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

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

Найбільш критичними ризиками є хімічний опік очей (ризик 10), затиснення маніпулятором (9), тепловий удар (9) та наїзд платформи (8). Для цих ризиків необхідно розробити першочергові захисні заходи.

4.2 Заходи механічної безпеки при роботі з роботизованою системою

Запобігання наїзду мобільної платформи

Згідно з вимогами ISO 18497:2018 (Сільськогосподарські машини та трактори — Безпека високоавтоматизованих сільськогосподарських машин), розроблено багаторівневу систему запобігання наїзду:

1) Віртуальні зони безпеки (Safety Zones):

2) Навколо робота програмно встановлюються дві зони реагування:

3) Зона попередження (Warning Zone): радіус 3 м. При потраплянні людини або тварини в цю зону:

а. Робот зменшує швидкість руху до 0.3 м/с.

б. Вмикається звукова сирена (90 дБ, переривчастий сигнал).

с. Вмикаються проблискові маячки (жовтого кольору).

4) Зона зупинки (Stop Zone): радіус 1.5 м. При потраплянні людини в цю зону:

а. Робот негайно зупиняється (екстрене гальмування).

б. Блокується можливість руху (аварійна зупинка).

с. Вмикається червоний проблисковий маячок та безперервний звуковий сигнал.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок гальмівного шляху:

$$S_{brake} = \frac{v^2}{2 \cdot a_{brake}} + v \cdot t_{reaction}, \quad (4.1)$$

де v — швидкість руху (м/с), a_{brake} — максимальне сповільнення (м/с²), $t_{reaction}$ — час реакції системи (с).

2. Фізичні бампери:

На передній та задній частинах платформи встановлено механічні бампери з контактними датчиками. При спрацюванні датчика (зусилля >10 Н) відбувається негайна аварійна зупинка незалежно від стану програмного забезпечення.

3. Система LiDAR-моніторингу:

Використовується LiDAR RPLIDAR S1 (радіус дії 40 м, кут сканування 360°). При виявленні перешкоди в зоні попередження система подає сигнал; при виявленні перешкоди в зоні зупинки — екстрене гальмування.

4. Візуальна та звукова сигналізація:

- Проблисковий маячок: жовтого кольору — при роботі в автономному режимі; червоного — при аварійній зупинці.
- Звукова сирена: переривчастий сигнал — при наближенні до людини; безперервний — при аварійній зупинці.

Запобігання травмуванню маніпулятором.

Маніпулятор xArm6 з 6 ступенями свободи та робочим радіусом 700 мм створює значну механічну небезпеку.

Заходи безпеки:

1. Обмеження робочої зони:

- Програмне обмеження робочого простору маніпулятора (Joint Limits та Cartesian Limits).
- Швидкість руху в зоні, наближеній до оператора (<50 см), обмежується до 0.1 м/с.
- При виявленні людини в зоні досяжності маніпулятора (700 мм) — автоматична зупинка.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Контроль зусилля та моменту:

- Датчик зусилля на енд-ефекторі (діапазон 0–200 Н, точність ± 0.5 Н).
- При перевищенні зусилля 50 Н (під час занурення) або 10 Н (під час позиціювання) — зупинка руху.
- Алгоритм контролю моменту в суглобах (обмеження 80% від максимального).

3. Аварійна зупинка (Emergency Stop):

- Апаратна кнопка E-Stop (червона «грибок» на жовтому фоні) на корпусі робота.
- Дистанційна кнопка E-Stop на пульті оператора (радіус дії до 100 м).
- При натисканні E-Stop: фізичне розривання ланцюга живлення приводів (не програмна зупинка).

4. Захисні екрани та огородження:

- Прозорий захисний екран (полікарбонат, товщина 4 мм) навколо робочої зони маніпулятора (за потреби).
- Сигнальна розмітка на підлозі (жовто-чорна смуга) навколо зони досяжності.

Захист від проколів ін'єкційною голкою

Ін'єкційна голка (довжина 200 мм, діаметр 6–8 мм, загострення 30–45°) є джерелом підвищеної небезпеки.

Заходи безпеки:

1. Захисний ковпак: під час транспортування та технічного обслуговування голка закривається захисним ковпаком.
2. Блокування руху: при відкритому ковпаку блокується можливість руху маніпулятора (за винятком режиму калібрування).
3. Колірне маркування: голка має яскраво-червоне маркування для привернення уваги.
4. Інструктаж: весь персонал проходить інструктаж щодо правил поводження з гострими інструментами.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Аптечка: на робочому місці обов'язково наявна аптечка з перев'язувальними матеріалами та антисептиками.

4.3 Заходи хімічної безпеки при роботі з рідкими органічними добривами

Рідкі органічні добрива (гній, гноївка, біогумус, компостні витяжки) є біологічно активними середовищами, що містять патогенну мікрофлору, гельмінти та хімічно агресивні сполуки (аміак, сірководень, органічні кислоти).

Класифікація небезпек рідких органічних добрив (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 — Небезпечні властивості рідких органічних добрив

Тип добрив	pH	Вміст аміаку, %	Патогенна мікрофлора	Небезпечні сполуки
Рідкий гній (гноївка)	7.0–8.5	0.1–0.5	E. coli, Salmonella, гельмінти	NH ₃ , H ₂ S, органічні кислоти
Біогумус	6.5–7.5	<0.05	Мінімальна	Органічні кислоти
Компостна витяжка	6.0–7.0	<0.02	Мінімальна	Органічні кислоти

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) (таблиця 4.3).

Персонал, який працює з рідкими органічними добривами, зобов'язаний використовувати наступні засоби індивідуального захисту:

Таблиця 4.3 — Засоби індивідуального захисту при роботі з добривами

Засіб захисту	Тип	Призначення	Коли використовувати
1	2	3	4
Захисні рукавички	Нітрилові (товщина 0.3–0.5 мм)	Захист шкіри рук від контакту з добривами	Завжди при роботі з добривами
Захисні окуляри	Герметичні (з боковим захистом)	Захист очей від бризок добрив	При роботі з насосами, клапанами, при промивці

Засіб захисту	Тип	Призначення	Коли використовувати
1	2	3	4
Респіратор	Клас FFP2 або FFP3	Захист дихальних шляхів від парів аміаку	При роботі з гноївкою, у закритих приміщеннях
Спецодяг	Комбінезон або фартух з водовідштовхувального матеріалу	Захист тіла від забруднення	Завжди при роботі з добривами
Захисне взуття	Гумові чоботи	Захист ніг від контакту з добривами	Завжди при польових роботах

4.4 Заходи електробезпеки при роботі з автономними системами живлення

Розроблювана система відноситься до електроустановок напругою до 1000 В (фактично — 22.2–48 В постійного струму), що згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) класифікується як система з наднизькою напругою (SELV). Проте, висока енергоємність LiPo-акумуляторів (до 12000 мА·год, струм розряду до 15С) створює специфічні ризики, пов'язані з можливим коротким замиканням, перегрівом та займанням.

Класифікація електричних небезпек (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 — Електричні небезпеки та їх наслідки

Небезпека	Причини	Можливі наслідки
Ураження електричним струмом	Пошкодження ізоляції, контакт з струмопровідними частинами	Електротравма, фібриляція серця, смерть
Термічні опіки	Коротке замикання, перегрів проводів, іскріння	Опіки 1-3 ступеня, втрата працездатності
Пожежа акумулятора	Перезаряд, перегрів, механічне пошкодження LiPo-батареї	Пожежа, вибух, токсичне задимлення
Електромагнітні завади	Високочастотні перешкоди від двигунів та контролерів	Збій роботи електроніки, помилкові спрацювання

Конструктивні 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 забезпечує:

- Повний захист від пилу (IP6х).
- Захист від водяних струменів низького тиску (IPх5).
- Захист від дощу, роси, миття.

2. Захист від короткого замикання:

- Силова лінія акумулятора оснащена плавкими запобіжниками на 20 А (для двигунів платформи) та 10 А (для маніпулятора).
- Додатковий захист — автоматичні вимикачі постійного струму з тепловим та електромагнітним розчіплювачем.
- Всі з'єднання виконані з використанням клемних колодок з ізольованими контактами.

3. Аварійне відключення (E-Stop):

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.
- Після натискання E-Stop живлення може бути відновлене лише ручним поверненням кнопки у вихідне положення.
- Дублювання — дистанційна кнопка E-Stop на пульті оператора.

4. Безпека акумуляторів (BMS):

Використовується «розумна» батарея (Smart Battery) з вбудованою системою керування (BMS), яка моніторить:

- Напругу на кожній комірці (cell) — запобігає перезаряду (>4.2 В) та глибокому розряду (<3.0 В).

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						91
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Температуру батареї — запобігає перегріву ($>60^{\circ}\text{C}$).

– Струм заряду/розряду — запобігає перевищенню допустимого струму.

– Балансування комірок — забезпечує рівномірний заряд всіх комірок.

5. Зарядка акумуляторів:

– Зарядка проводиться лише спеціалізованими зарядними пристроями (LiPo-сумісними) у присутності персоналу.

– Зарядка проводиться у вогнетривких мішках (LiPo Safe Bag) або в спеціально обладнаному місці.

– Забороняється залишати акумулятори на зарядці без нагляду.

– Забороняється заряджати пошкоджені або деформовані акумулятори.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Ідентифікація небезпек. Встановлено, що основними небезпечними факторами при роботі з роботизованою системою є механічні (ризик наїзду платформи, травмування рухомим маніпулятором, проколи гострою ін'єкційною голкою), хімічні (контакт з рідкими органічними добривами, отруєння парами аміаку), електричні (ризик короткого замикання та займання високоємних акумуляторних батарей) та ергономічні (напруження зору, статичне навантаження). Проведено кількісну оцінку ризиків за матрицею «Ймовірність — Наслідки», визначено критичні ризики (хімічний опік очей, затиснення маніпулятором, тепловий удар, наїзд платформи), що потребують першочергових захисних заходів.

2. Заходи механічної безпеки. Впроваджено багаторівневу систему захисту від зіткнень, що відповідає міжнародним вимогам ISO 18497. Розроблено концепцію віртуальних зон безпеки (зона попередження радіусом 3 м та зона зупинки радіусом 1.5 м). Проведено розрахунок гальмівного шляху (1.54 м при максимальній швидкості), що підтверджує ефективність системи екстреного гальмування. Встановлено обмеження зусилля занурення (50–100 Н) та швидкості руху (2–5 см/с при зануренні). Розроблено систему блокування руху при відкритому захисному ковпаку ін'єкційної голки.

3. Заходи хімічної безпеки. Визначено комплекс засобів індивідуального захисту (нітрилові рукавички, герметичні окуляри, респіратор класу FFP2/FFP3, спецодяг, гумові чоботи) та регламент їх використання. Розроблено алгоритм дій при розливі добрив (7 етапів: зупинка роботи, ізоляція місця розливу, збір рідини, дегазація, утилізація, повідомлення керівника). Описано процедури першої допомоги при хімічних опіках шкіри та очей, отруєнні парами аміаку та проковтуванні добрив. Визначено вимоги до зберігання (герметична ємність, температура +5...+25°C) та транспортування добрив.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						93
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. 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 (20 А та 10 А), автоматичних вимикачів та BMS-контролерів для літій-полімерних батарей (контроль напруги на кожній комірці, температури, струму заряду/розряду, балансування). Критично важливим заходом є встановлення апаратної кнопки аварійної зупинки (E-Stop), яка забезпечує фізичне розривання силового ланцюга живлення приводів у нештатних ситуаціях. Встановлено періодичність перевірки опору ізоляції (не рідше 1 разу на 6 місяців), нормативне значення — не менше 1 МОм.

5. Пожежна безпека. Проаналізовано ризики виникнення пожежі через займання LiPo-акумуляторів (клас пожежі D), перегрівання електродвигунів (клас E) або контакт розігрітих вузлів робота із сухою рослинністю (клас A). Розроблено інструкцію дій у надзвичайних ситуаціях з зазначенням засобів гасіння для кожного класу пожежі (вогнегасник класу D для LiPo, вуглекислотний для електрообладнання, вода для рослинності). Визначено вимоги до зберігання (вогнетривкі мішки, температура +5...+25°C, рівень заряду 40–60%) та транспортування акумуляторів (спеціальні контейнери, маркування «Небезпечний вантаж»). Заборонено використання води для гасіння LiPo-батарей через реакцію літію з водою.

6. Ергономіка праці оператора. Визначено вимоги до організації дистанційного робочого місця згідно з ДСТУ 8855:2019 та ISO 9241. Встановлено, що для зниження психофізіологічного навантаження та зорової втоми графічний інтерфейс користувача повинен мати мінімальну затримку передачі відеопотоку (≤ 200 мс) та чітку індикацію статусу системи (кольорове кодування).

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						94
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

СТАРТАП-ПРОЄКТ: СИСТЕМА ТОЧНОГО ВНЕСЕННЯ РІДКИХ ОРГАНІЧНИХ ДОБРИВ

У п'ятому розділі представлено стартап-проект впровадження розробленої роботизованої системи для точного ін'єкційного внесення рідких органічних добрив. Проведено маркетинговий аналіз ринку, розроблено бізнес-модель комерціалізації, виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності інвестицій та розраховано термін окупності проекту.

5.1 Маркетинговий аналіз ринку агроробототехніки

Аналіз ринкового середовища

Ринок агроробототехніки переживає стрімке зростання, зумовлене потребою у підвищенні продуктивності, дефіцитом робочої сили та вимогами до сталого розвитку. Як зазначається в дослідженнях, впровадження автоматизації в сільське господарство стає критично необхідним для подолання проблеми нестачі робітників, оскільки «ніхто більше не хоче бути сільськогосподарським робітником» .

Ключові драйвери ринку:

1. Дефіцит робочої сили. Сільське господарство стикається з гострою нестачею кваліфікованих кадрів, особливо для рутинних та фізично важких операцій. Роботизовані системи дозволяють замінити до 34 людино-годин роботи за 8-годинну зміну одним роботом .

					14.17 - КР.003.5.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Іваногло.			РОЗДІЛ 5			Лім.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								95	10
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

2. Економія ресурсів. Точне внесення добрив дозволяє зменшити витрати ресурсів на 20–40% та підвищити врожайність на 10–15%, що є критичним у контексті зростання цін на добрива та паливе .

3. Доступність технологій. Розвиток RaaS-моделей (Robot as a Service) значно знижує бар'єри для впровадження роботизованих систем, роблячи їх доступними навіть для малих господарств .

4. Екологічна стійкість. Точне землеробство мінімізує хімічне навантаження на ґрунт, зменшує викиди парникових газів та запобігає забрудненню водних ресурсів.

5. Державна підтримка. У багатьох країнах впроваджуються програми стимулювання автоматизації сільського господарства. Наприклад, у 2026 році уряди різних країн активно підтримують RaaS-моделі через нормативні акти та фінансові стимули .

Сучасний стан галузі вирощування перцю в Україні:

Ринок овочівництва в Україні (зокрема, вирощування перцю, томатів, баклажанів) характеризується високою інтенсивністю праці. Станом на 2025 рік, галузь відчуває гострий дефіцит кваліфікованих кадрів (агрономів-скутів) та сезонних робітників. Традиційні методи моніторингу та внесення добрив (ручний обхід полів) стають економічно не вигідними через низьку швидкість та суб'єктивність даних.

Основні тенденції в українському овочівництві:

- Зміна географії виробництва через кліматичні зміни та безпекову ситуацію.
- Зростання частки інтенсивних технологій (крапельне зрошення, мульчування, фертигація).
- Підвищення попиту на органічну продукцію та продукцію з контрольованим вмістом нітратів.
- Перехід від екстенсивних методів до інтенсивних з використанням елементів точного землеробства.

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						96
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цільова аудиторія

Основні сегменти цільової аудиторії:

1. Середні та великі фермерські господарства (площа під овочами >10 га), які використовують інтенсивні технології (крапельне зрошення, розсадна технологія). За оцінками, в Україні налічується близько 3 000–5 000 таких господарств.

2. Органічні господарства, де використання синтетичних добрив обмежене або заборонене, а рідкі органічні добрива є основним джерелом живлення рослин.

3. Тепличні комбінати, де критично важливим є постійний контроль мікроклімату та стану рослин, а точне внесення добрив дозволяє оптимізувати витрати.

4. Агрохолдинги, що потребують цифровізації полів для інтеграції в ERP-системи та отримання об'єктивних даних для прийняття управлінських рішень.

5. Сервісні компанії (підрядні організації), які надають послуги з внесення добрив та моніторингу полів.

Географічне охоплення:

Початковий фокус — Україна (південні та центральні регіони), з подальшим розширенням на країни Європи, де ринок агроробототехніки є більш розвиненим.

Конкурентний аналіз (таблиця 5.1).

На ринку присутні альтернативні рішення для внесення добрив та моніторингу посівів:

Ключові конкурентні переваги розробленої системи:

1. Комплексність підходу — поєднання контактного ін'єкційного внесення добрив з візуальним фенотипуванням рослин для диференційованого дозування.

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						97
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Адаптивність до рельєфу — використання 6-ступеневого маніпулятора дозволяє компенсувати нахили платформи та забезпечувати перпендикулярне занурення голки.

3. Автономність — повністю безпілотна робота з можливістю дистанційного моніторингу.

4. Точність дозування — похибка менше 3% навіть для в'язких добрив.

5. Екологічність — зменшення втрат азоту на 30% порівняно з традиційними методами.

Таблиця 5.1 — Порівняльний аналіз конкурентних рішень

Критерій	Розроблена система	Традиційні розкидачі	Дрони-обприскувачі	Стационарні IoT-станції	Ручна праця
1	2	3	4	5	6
Точність позиціонування	Висока ($\pm 1-2$ см)	Низька ($\pm 20-50$ см)	Середня ($\pm 10-20$ см)	Висока (в точці)	Середня
Глибина внесення	5-25 см (регульована)	0-5 см (поверхнево)	0-2 см (поверхнево)	0-15 см (в точці)	5-15 см
Диференційоване дозування	Так (кожна рослина)	Ні (суцільне)	Частково (зони)	Частково	Ні
Автономність	Повна	Часткова	Повна	Автоматична	Ні
Вартість (орієнтовна)	\$25,000-35,000	\$15,000-50,000	\$5,000-20,000	\$2,000-10,000	\$10,000 - 30,000/рік
Продуктивність	50-100 рослин/год	1-5 га/год	5-20 га/год	24/7 моніторинг	0.5-1 га/день
Коефіцієнт використання азоту	65-75%	35-45%	40-50%	40-50%	50-60%
Екологічне навантаження	Мінімальне	Високе	Середнє	Низьке	Середнє

SWOT-аналіз проєкту (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 — SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
1	2
• Комплексність даних (грунт + рослина)	• Висока початкова вартість прототипу
• Адаптивність до рельєфу (маніпулятор 6-DOF)	• Обмежений час роботи від батареї (4-6 год)
• Висока точність дозування ($\pm 2-3\%$)	• Залежність від погодних умов (дощ, бруд)
• Автономність (безпілотна робота)	• Складність технічного обслуговування
• Відсутність ущільнення ґрунту (легка вага)	• Відсутність досвіду серійного виробництва
• Економія добрив (20-30%) та води	• Обмежена продуктивність (50 рослин/год)
• Зменшення екологічного навантаження	
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
• Зростання ринку органічного землеробства	• Швидке копіювання технології конкурентами
• Модель RaaS (Robot as a Service)	• Технічні поломки в польових умовах
• Інтеграція ІІІ для прогнозування внесення	• Складнощі з сертифікацією та стандартизацією
• Розширення на нові культури (томати, баклажани)	• Зниження цін на традиційні добрива
• Партнерство з виробниками систем зрошення	• Висока конкуренція з боку великих виробників
• Державні програми підтримки інновацій	• Юридичні та регуляторні обмеження
• Експортний потенціал (країни ЄС)	• Ризик недостатнього попиту

5.2 Розробка бізнес-моделі комерціалізації системи

Бізнес-модель (Canvas)

Для успішної комерціалізації системи моніторингу та внесення добрив пропонується гібридна бізнес-модель, що поєднує продаж апаратної частини з програмною підпискою (модель «продукт як послуга»).

Таблиця 5.3 — Характеристика основних елементів бізнес-моделі

Елемент бізнес-моделі	Опис та реалізація
Ціннісна пропозиція	1. Точне ін'єкційне внесення добрив: зменшення витрат добрив на 20-30% та підвищення врожайності на 10-15%.
	2. Комплексний моніторинг: автономний робот зі ШІ для аналізу стану рослин та вологості ґрунту.
	3. Платформа аналітики: хмарна система з інтуїтивним інтерфейсом, яка надає миттєві рекомендації.
	4. Екологічність: зменшення викидів парникових газів та запобігання забрудненню водних ресурсів.
Цільові клієнти	1. Малі та середні фермерські господарства (основна ціль): кому потрібна доступна технологія без великих капіталовкладень.
	2. Органічні господарства: для яких використання синтетичних добрив обмежене.
	3. Великі агрохолдинги: для масштабного моніторингу окремих ділянок.
	4. Агросервісні компанії: для надання послуг моніторингу своїм клієнтам.
Канали збуту	1. Прямі продажі через власний веб-сайт та call-центр.
	2. Партнерська мережа через дилерів сільгосптехніки та дистриб'юторів добрив.
	3. Участь в агровиставках («АгроВесна», «AgroExpo»).
	4. Співпраця з агроплатформами (AgriAnalytica, TopAgro).
Модель монетизації	Гібридна модель:
	• Разова оплата за апаратну частину (робот + сенсори).
	• Щомісячна/щорічна підписка на програмне забезпечення, аналітику, технічну підтримку та оновлення ШІ-моделей.
	• Модель RaaS (Robot as a Service) — здача в оренду з оплатою за гектар або за рослину.
Ключові ресурси	Команда розробників ШІ та робототехніків, патентовані алгоритми, серверна інфраструктура, партнерські угоди, сервісні центри.

Моделі монетизації

Варіант А — Прямий продаж:

- Продаж робота за ціною \$25,000–35,000.
- Річна підписка на ПЗ (\$2,000–3,000/рік) включає: оновлення ШІ-моделей, хмарне сховище даних, технічну підтримку, аналітичні звіти.

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						100
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Варіант Б — RaaS (Robot as a Service):

RaaS є перспективною бізнес-моделлю, що набуває все більшої популярності в агросекторі. Як показують приклади, французька компанія Naio Technologies успішно застосовує RaaS модель у Каліфорнії, де фермери отримують прибутковість з першого дня завдяки значно нижчим початковим витратам. Аналогічно, японська компанія inaho використовує RaaS модель з оплатою за обсяг зібраного врожаю, що повністю усуває ризик для фермера.

За цією моделлю:

- Фермер платить не за роботу, а за гектар обробленої площі або за кількість рослин.
- Компанія бере на себе обслуговування, ремонт, страхування робота, а також навчання персоналу.
- Сервісна компанія «забезпечує все: картографування, транспортування, управління та моніторинг робота на фермі з гарантованими результатами».

Орієнтовна вартість послуги:

- \$500–800/га за комплексний аудит та внесення добрив.
- \$0.5–1.0/рослину за точкове внесення.

Порівняльна характеристика моделей монетизації (таблиця 5.4):

Таблиця 5.4 — Порівняння моделей монетизації

Критерій	Прямий продаж	RaaS (оренда)	Гібридна модель
Початковий внесок	Високий (\$25,000-35,000)	Низький (від \$500/га)	Середній (\$10,000-15,000)
Дохід для компанії	Одноразовий + підписка	Регулярний (щомісячний)	Одноразовий + регулярний
Ризик для клієнта	Високий	Низький	Середній
Лояльність клієнта	Середня	Висока	Висока
Складність реалізації	Середня	Висока	Середня
Прогнозованість доходу	Низька	Висока	Середня

Маркетингова стратегія

1. Продуктова стратегія:

- Розробка MVP (Minimum Viable Product) з базовим функціоналом для перцю.
- Розширення функціоналу для інших культур (томати, баклажани, огірки).
- Розробка мобільного додатку для дистанційного моніторингу.

2. Комунікаційна стратегія:

- Участь у профільних виставках та демо-заходах .
- Співпраця з аграрними ЗМІ та блогерами.
- Проведення польових демонстрацій для фермерів.
- Створення онлайн-спільноти користувачів.

3. Стратегія ціноутворення:

- Ранній доступ (Early Adopters): знижка 15–20%.
- Пілотний проєкт: безкоштовне тестування для великих господарств.
- Програма лояльності: знижка на підписку при продовженні.

4. Партнерська стратегія:

- Співпраця з виробниками систем крапельного зрошення (продаж робота як опції до системи поливу).
- Партнерство з виробниками органічних добрив (комплексні рішення).
- Співпраця з аграрними консультаційними компаніями.

5.3 Розрахунок собівартості розробки прототипу та терміну окупності

Калькуляція собівартості прототипу (таблиця 5.1).

Розрахунок виконано для створення MVP (Minimum Viable Product) — дослідного зразка. Ціни наведено в гривнях за курсом НБУ станом на 2026 рік (\$1 ≈ 45 грн).

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						102
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.5 — 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) — 6-DOF	1	380 000	380 000
3	Камера Intel RealSense D435i	1	18 000	18 000
4	Система дозування (перистальтичний насос + клапани + трубки)	1	35 000	35 000
5	Бак для добрив (нерж. сталь, 20 л з мішалкою)	1	12 000	12 000
6	Датчик ґрунту (TEROS 12) + Data Logger	1	22 000	22 000
7	Бортовий комп'ютер (Intel NUC / Jetson)	1	35 000	35 000
8	Навігація (LiDAR S1 + GPS RTK + IMU)	1	45 000	45 000
9	Акумуляторна батарея (LiPo 22Ah) та BMS	1	15 000	15 000
10	Конструкційні матеріали (3D-друк, профілі, кріплення)	—	15 000	15 000
Разом матеріальні витрати				757 000

Витрати на розробку програмного забезпечення та інтеграцію (таблиця 5.6):

Таблиця 5.6 — Витрати на розробку ПЗ та інтеграцію

Стаття витрат	Тривалість, міс	Витрати, грн/міс	Сума, грн
Розробка ROS 2 архітектури (2 інженери)	6	80 000	480 000
Розробка ШІ-моделей комп'ютерного зору (2 ML-інженери)	4	100 000	400 000
Розробка хмарної платформи та аналітики (2 backend-розробники)	4	80 000	320 000
Розробка мобільного додатку (1 розробник)	3	40 000	120 000
Випробування та оптимізація (2 інженери-тестувальники)	3	50 000	150 000
Разом витрати на розробку ПЗ			1 470 000

									Архив
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ				

Непрямі витрати (накладні) (таблиці 5.7, 5.8):

Таблиця 5.7 — Непрямі витрати

Стаття витрат	Сума, грн
Оренда приміщення (лабораторія, офіс) — 12 міс	240 000
Комунальні послуги	60 000
Юридичне супроводження (патентування, реєстрація)	100 000
Маркетингові дослідження та промоція	80 000
Адміністративні витрати	50 000
Разом непрямі витрати	530 000

Таблиця 5.8 – Повна собівартість розробки прототипу:

Категорія	Сума, грн	Частка, %
Матеріальні витрати (Hardware)	757 000	27.5
Розробка ПЗ та інтеграція	1 470 000	53.4
Непрямі витрати	530 000	19.1
Загальна собівартість	2 757 000	100

Повна собівартість прототипу становить приблизно \$65,600 (2 757 000 / 42).

Розрахунок економічної ефективності для фермера.

Розглянемо господарство площею 20 га під перцем з використанням крапельного зрошення. Порівняння проводиться між традиційним поверхневим внесенням добрив та роботизованим ін'єкційним внесенням (таблиця 5.9).

Таблиця 5.9 — Порівняльний аналіз витрат на 1 га перцю

Показник	Традиційне внесення	Роботизоване внесення	Економія
1	2	3	4
Витрати на добрива			
Норма внесення (еквівалент N), кг/га	120	100	-20 кг
Вартість добрив, грн/га	30 000	25 000	-5 000
Втрати добрив			
Втрати азоту, %	42.8	11.2	-31.6%
Вартість втрачених добрив, грн/га	12 840	2 800	-10 040
Врожайність			
Урожайність, т/га	28.7	32.5	+3.8 т

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						104
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Показник	Традиційне внесення	Роботизоване внесення	Економія
1	2	3	4
Вартість додаткового врожаю (15 000 грн/т)	—	57 000	+57 000
Витрати на внесення			
Паливо/електроенергія, грн/га	2 500	800	-1 700
Оплата праці, грн/га	3 000	1 000	-2 000
Амортизація обладнання, грн/га	4 000	5 000	+1 000
Загальний економічний ефект, грн/га	—	—	+60 260

Загальний економічний ефект на 20 га: $60\,260 \times 20 = 1\,205\,200$ грн/рік.

Розрахунок терміну окупності

Сценарій А — Прямий продаж (для господарства 20 га):

- Вартість системи: 2 757 000 грн (прототип) або ~1 500 000 грн (серійне виробництво).
- Річний економічний ефект: 1 205 200 грн.
- Термін окупності (прототип): $2\,757\,000 / 1\,205\,200 = 2.3$ роки.
- Термін окупності (серійне виробництво): $1\,500\,000 / 1\,205\,200 = 1.25$ роки.

Сценарій Б — Модель RaaS (Robot as a Service):

- Вартість послуги для фермера: $\$600/\text{га} \times 20 \text{ га} = \$12,000 \approx 504,000$ грн/рік.
- Річний дохід від одного клієнта: 504,000 грн.
- При 10 клієнтах: 5,040,000 грн/рік.
- Операційні витрати (обслуговування, логістика, персонал): 40% від доходу.
- Чистий прибуток: $5,040,000 \times 0.6 = 3,024,000$ грн/рік.
- Термін окупності (прототип): $2,757,000 / 3,024,000 = 0.91$ року (≈ 11 місяців).

Термін окупності інвестицій: $2\,757\,000 / 2\,407\,200 = 1.15$ року (≈ 14 місяців).

Аналіз чутливості (таблиця 5.10).

Таблиця 5.10 — Аналіз чутливості терміну окупності

Змінна	Оптимістичний сценарій	Базовий сценарій	Песимістичний сценарій
Вартість системи	1,200,000 грн	2,757,000 грн	3,500,000 грн
Економія на добривах	+30%	Базове	-30%
Ефект на врожайність	+15%	+10%	+5%
Термін окупності (продаж)	0.8 року	2.3 роки	4.5 роки
Термін окупності (RaaS)	0.6 року	0.9 року	1.4 роки

Оцінка інвестиційної привабливості (таблиця 5.11).

Таблиця 5.11 – Ключові фінансові показники проєкту (на 3 роки):

Показник	Значення
Загальний дохід	105,604,000 грн
Загальний чистий прибуток	18,362,400 грн
Середня рентабельність продажів	17.4%
Середня рентабельність інвестицій (ROI)	666% (за 3 роки)
Внутрішня норма доходності (IRR)	~85%
Термін окупності	1.15 року

Висновки

1. Ринковий потенціал. Аналіз ринку агроробототехніки підтверджує високий потенціал розробленої системи. Ключовими драйверами зростання є дефіцит робочої сили в сільському господарстві, зростання вартості ресурсів (добрива, вода, енергія) та перехід до точного землеробства. Світовий ринок агроробототехніки демонструє стабільне зростання, причому сегмент систем точного внесення добрив є одним з найбільш динамічних. Встановлено, що близько 600 мільйонів дрібних фермерів у світі потребують доступних роботизованих рішень, але лише ~150,000 з них мають роботів, що свідчить про величезний потенціал ринку .

2. Конкурентоспроможність. SWOT-аналіз показав, що головною конкурентною перевагою розробленої системи є комплексність підходу (поєднання контактного ін'єкційного внесення з візуальним фенотипуванням), висока точність дозування та адаптивність до нерівного рельєфу. На відміну від дронів та традиційних розкидачів, система забезпечує адресну доставку добрив до кожної рослини з урахуванням її індивідуальних потреб, що дозволяє зменшити витрати добрив на 20–30% та підвищити врожайність на 10–15%.

3. Бізнес-модель. Запропоновано гнучку модель комерціалізації, що поєднує прямий продаж апаратно-програмного комплексу, підписку на програмне забезпечення та надання послуг за моделлю RaaS (Robot as a Service). Як показують успішні приклади Naio Technologies та inaho, RaaS-модель дозволяє фермерам отримувати прибутковість з першого дня використання робота завдяки значно нижчим початковим витратам . Сервісна компанія при цьому бере на себе картографування, транспортування, управління та моніторинг робота на фермі з гарантованими результатами . Впровадження RaaS також вирішує проблему високої вартості обладнання, яка є «основною перешкодою для впровадження для малих та середніх господарств» .

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						107
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Собівартість розробки. Повна собівартість виготовлення дослідного зразка (прототипу) становить 2,757,000 грн (~\$65,600). Основну частку витрат складають: розробка програмного забезпечення та ІІІ-моделей (53.4%), високотехнологічні комплектуючі: маніпулятор xArm6, лідарна навігація та оптичні сенсори (27.5%), та непрямі витрати (19.1%). При переході до серійного виробництва очікується зниження собівартості до 1,500,000 грн за рахунок оптимізації логістики, гуртових закупівель та стандартизації виробництва.

5. Інвестиційна привабливість. Розрахунок економічної ефективності для кінцевого споживача (фермерського господарства площею 20 га) продемонстрував високу рентабельність впровадження системи. Економічний ефект досягається за рахунок: економії добрив (5,000 грн/га), зменшення втрат азоту (10,040 грн/га), підвищення врожайності (57,000 грн/га) та оптимізації витрат на внесення (2,700 грн/га). Загальний економічний ефект на 20 га становить 1,205,200 грн/рік. Розрахунковий термін окупності проєкту становить: для моделі прямого продажу — 2.3 роки (1.25 роки при серійному виробництві), для моделі RaaS — 0.9 року (≈11 місяців), для гібридної моделі — 1.15 року (≈14 місяців). Це є високим показником для ринку агротехніки, де прийнятним вважається термін до 3–4 років.

6. Ризики та перспективи. Ключовими ризиками проєкту є технічні збої в польових умовах, швидке копіювання технології конкурентами, складнощі з сертифікацією та регуляторні обмеження, особливо щодо автономної роботи роботів у відкритому полі. Для мінімізації цих ризиків пропонується: створення резервного фонду на ремонт та обслуговування, реєстрація патентів та ноу-хау, тісна співпраця з регуляторними органами, розробка страхових продуктів для техніки та врожаю.

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						108
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розроблено та обґрунтовано параметри роботизованого пристрою для точного ін'єкційного внесення рідких органічних добрив у кореневу зону рослин. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наступні висновки.

Встановлено, що традиційні методи внесення добрив, зокрема поверхневе розкидання, спричиняють значні втрати азоту, які сягають від сорока до шістдесяти відсотків, та мають високу нерівномірність розподілу з коефіцієнтом варіації від двадцяти п'яти до сорока відсотків. Запропонований роботизований пристрій із шестиступеневим маніпулятором здатен адаптуватися до нерівностей рельєфу та виконувати адресну ін'єкцію добрив безпосередньо в кореневу зону кожної рослини.

Розроблено комплекс математичних моделей, що описують процес ін'єкційного внесення. Модель визначення оптимальної глибини та гідравлічна модель системи дозування забезпечують похибку розрахунку глибини на рівні 1,3–2,8 відсотка, тиск ін'єкції в діапазоні 0,3–0,8 мегапаскаля та продуктивність насоса 0,1–2,0 літра за хвилину з похибкою дозування 2–3 відсотки. Модель розподілу добрив у ґрунті дозволяє визначити оптимальну відстань між точками ін'єкції в межах 20–40 сантиметрів з похибкою моделі 3,5–6,3 відсотка.

Кінематичну модель побудовано за параметрами Денавіта-Хартенберга з використанням алгоритму Левенберга-Марквардта. Робочий простір маніпулятора становить 0,87 кубічного метра з досяжністю точок на відстані 200–600 міліметрів від основи на висоті 0–300 міліметрів над поверхнею ґрунту.

					14.17 - КР.003.0.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Іваногло.				ВИСНОВКИ		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К. О.							109	3
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.	Дядюра К. О.								

Апаратна частина системи включає енд-ефектор з ін'єкційною голкою з нержавіючої сталі марки 12X18H10T діаметром 8 міліметрів, довжиною 200 міліметрів та кутом загострення 30–45 градусів. Запас міцності голки становить 62,5, що гарантує надійну роботу. Система дозування базується на перистальтичному насосі потужністю приблизно 1 ват з баком об'ємом 13 літрів. Сенсорне забезпечення включає RGB-D камеру Intel RealSense D435i з точністю позиціювання 1–2 сантиметри та можливістю оцінки вегетаційного індексу NDVI, ультразвуковий датчик HC-SR04 з похибкою плюс-мінус 3 міліметри та тензодатчик з діапазоном вимірювання 0–200 ньютонів. Енерговитрати на одну ін'єкцію становлять 30,25 джоуля.

Програмна архітектура побудована на базі операційної системи роботів ROS 2 Humble. Система локалізації та навігації з використанням GPS-RTK, інерціального вимірювального модуля та лідара забезпечує точність позиціювання 2–5 сантиметрів з плануванням маршруту за алгоритмами A-star та динамічного вікна. Детекція рослин реалізована за допомогою нейронної мережі YOLOv8 із середньою точністю понад 0,85 та швидкістю обробки 15–30 кадрів за секунду. Керування маніпулятором здійснюється в середовищі MoveIt 2 з обмеженням зусилля занурення 50–100 ньютонів та швидкості 2–5 сантиметрів за секунду.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ	Аркуш
						110
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.

					14.17 - КР.003.0.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Іваногло М			СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.									111	3
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К.О.										

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.

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.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ	Аркуш
						112
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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. 003.0.000 ПЗ	Аркуш
						113
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		