

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра конструювання машин

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисну допущено»
Завідувач кафедри
_____ Данильченко Ю.М.
(підпис)

«__» _____ 2022 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності _____ 131 – Прикладна механіка _____
(код і назва)

на тему Автономний сільськогосподарський робот для знищення бур'янів
FLIBot 2.0 _____

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи МІ-01мн _____
(шифр групи)

_____ Ширшов Олександр Романович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник професор, д.т.н. Пасічник В.А. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що в цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ - 2022

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
імені Ігоря Сікорського**

Інститут (факультет) Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 131 – Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Данильченко Ю.М.
(підпис)

« ____ » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

На магістерську дисертацію студенту

Ширшову Олександрові Романовичу _____ ,

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Автономний сільськогосподарський робот для знищення бур'янів FLIBot 2.0

науків керівник дисертації: Пасічник В.А., д.т.н. професор _____ ,
затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2022 р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: Процес пошуку дизайну і технічного рішення модулів наведення та знищення бур'янів сільськогосподарського робота-трактора _____

4. Предмет дослідження Екстер'єр та компоновка загальної платформи, модулів наведення та знищення бур'янів сільськогосподарського робота-трактора, їх функціональні та технічні характеристики _____.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Спираючись на ринковий аналіз й наявні технічні рішення роботів-тракторів для боротьби з бур'янами у сільському господарстві, розробити модулі наведення та знищення бур'янів, створити дизайн робота, виконати розрахунки й провести моделювання основних технічних параметрів модулів наведення та знищення бур'янів для робота-трактора «FLIBot 2.0», розробити технологію виготовлення макету робота-трактора «FLIBot 2.0» та дослідити його роботу, підготувати пропозицію стартап-проєкту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: виготовлення макету, підготовка презентації.

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		<u>завдання</u> <u>видав</u>	<u>завдання</u> <u>прийняв</u>

9. Дата видачі завдання 01.09.2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз перспективних проєктів автономних роботів для боротьби з бур'янами у сільському господарстві	1.01.2021	
2	Розрахунок і моделювання основних технічних параметрів модулів наведення та знищення бур'янів для робота-трактора «FLIBot 2.0»	1.09.2021	
3	Технологічне забезпечення виготовлення макету робота-трактора «FLIBot 2.0» та дослідження його роботи	1.01.2022	
4	Стартап-проєкт робота-трактора «FLIBot 2.0»	1.05.2022	
5	Підготовка презентації, оформлення роботи	5.05.2022	

Студент _____

Ширшов О.Р.

Науковий керівник дисертації _____

Пасічник В.А.

АНОТАЦІЯ

Ширшов О.Р. Автономний сільськогосподарський робот для знищення бур'янів FLIBot 2.0. Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», – Київ, 2022

Досліджене питання використання автономної сільськогосподарської роботизованої техніки, зокрема для ефективної боротьби з бур'янами. Як наслідок розроблено концепцію системи та автономного сільськогосподарського робота для знищення бур'янів FLIBot 2.0, який складається з автономної платформи, системи моніторингу і розпізнавання бур'янів, системи керування пристроями обприскування й випалювання бур'янів, що в сукупності дозволяють використовувати в сучасному сільському господарстві, побудованому на основі технологій Farming 4.0.

Для встановлення модулів системи “моніторингу-розпізнавання-наведення” та обприскування/випалювання розроблені складові модулів та платформа, на якій може бути розміщена дана система. Створено алгоритми керування складовими та їх взаємодії, управління модулями робота-трактора, зокрема системи “моніторинг - розпізнавання - наведення” та обприскування або випалювання.

Розроблено та виготовлено прототип платформи придатної для проведення досліджень з фізичною моделлю та роз'яснення алгоритму наведення на ціль та здійснення обприскування в різних умовах.

Ключові слова: робот, роботизована платформа, управління, розпізнавання.

ANNOTATION

Shyrshov O.R. Autonomous agricultural robot for weed control FLIBot 2.0.

The dissertation on competition of a scientific degree of the master on a specialty 131 - Applied mechanics. - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", - Kyiv, 2022

The issue of using autonomous agricultural robotic equipment, in particular for effective weed control, has been studied. As a result, the concept of FLIBot 2.0 weed control system and autonomous agricultural robot was developed, which consists of an autonomous platform, weed monitoring and recognition system, control system for spraying and burning devices, which together allow use in modern agriculture, based on Farming 4.0 technology.

To install the modules of the “monitoring-recognition-guidance” system and spraying / burning, the components of the modules and the platform on which this system can be placed have been developed. Algorithms for controlling components and their interactions, control of robot-tractor modules, in particular monitoring-recognition-guidance systems, and spraying or firing have been developed.

A prototype of a platform suitable for conducting research with a physical model and explaining the algorithm for targeting and spraying in different conditions has been developed and manufactured.

Keywords: robot, robotic platform, control, recognition.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ РОБОТИЗАЦІЇ БОРОТЬБИ З БУР'ЯНАМИ ДЛЯ КОНЦЕПЦІЇ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА	7
1.1. Концепції точного землеробства та вимоги до їх технічного забезпечення	7
1.2. Сучасні тенденції і конструкції сільськогосподарських роботів для боротьби з бур'янами	12
1.2.1. Роботизація у сільському господарстві	12
1.2.2. Сучасні моделі автономних сільськогосподарських тракторів та інноваційних роботів	14
1.2.3. Сучасні тренди сільськогосподарської робототехніки	26
1.3. Інженерні задачі забезпечення створення перспективних моделей роботів для боротьби з бур'янами	28
1.3.1. Задачі управління роботом	28
1.3.2. Задачі моніторингу й розпізнавання бур'янів	34
1.3.3. Задачі управління виконавчими пристроями роботів	37
1.4. Комплектуючі елементи та можливості їх застосування для сільськогосподарських роботів	38
1.5. Концепція проекту “FLIBot Systems”	42
РОЗДІЛ 2. КОНЦЕПЦІЯ ТА ДИЗАЙН СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО РОБОТА FLIBOT 2.0	45
2.1. Пошукове ескізування концептуального рішення та дизайну	45
2.2. Визначення складових та загальних параметрів проекту сільськогосподарського робота для знищення бур'янів	49

2.3. Загальні інженерні завдання забезпечення функціонування сільськогосподарського робота для знищення бур'янів	52
2.3.1 Визначення схеми керування роботом	52
2.3.2 Визначення завдання наведення лазера	56
2.3.3 Визначення завдання наведення форсунки	57
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО РОБОТА FLIBOT 2.0 ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ	61
3.1. Проєкт рухомої автономної платформи	61
3.2. Проєкт інтегрованої системи “спостереження-обприскування”	62
3.3. Проєкт інтегрованої системи “спостереження-випалювання”	64
3.4. Застосування передових технологій для виготовлення деталей прототипу сільськогосподарського робота FLIBot 2.0	66
3.5. Інтерфейс середовища управління сільськогосподарським роботом FLIBot 2.0	75
3.6. Алгоритмічне забезпечення функціонування сільськогосподарського робота FLIBot 2.0	76
3.7. Дослідний зразок сільськогосподарського робота FLIBot 2.0	79
РОЗДІЛ 4. СТАРТАП-ПРОЄКТ FLIBOT SYSTEM	83
4.1 FLIBot System як об'єкт права інтелектуальної власності	83
4.1.1 Патентний пошук у сфері агро роботів	83
4.1.2 Елементи заявки на патент на проєкт FLIBot System	92
4.2 FLIBot System як стартап-проєкт	93
4.2.1 Визначення характеристик ідеї проєкту	93
4.2.2 Технологічна здійсненність проєкту	94

4.2.3 Характеристика потенційного ринку стартап-проєкту	95
4.2.4 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту	95
4.2.5 Фактори загроз проєкту	96
4.2.6 Фактори можливостей проєкту	96
4.2.7 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку	97
ВИСНОВКИ	98
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ	100
ДОДАТОК А. Конструкторська документація на проєкт “Автономний сільськогосподарський робот FLIBot 2.0”	107
ДОДАТОК Б. База патентного пошуку за запитом "agricultural robot"	120
ДОДАТОК В. Матеріали презентації	141

ВСТУП

Освітня програма “Інструментальні системи інженерного дизайну”, створена в рамках спеціальності “131 - прикладна механіка” надає широкі можливості щодо тематики магістерського дослідження. В даній дисертації обрано перспективний сектор аграрної робототехніки. Тематика магістерської роботи є міждисциплінарною, має значні перспективи з точки зору інноваційності.

Актуальність

Сучасний підхід до оброблення рослин є дуже ресурсозатратним та малоефективним. Більше 95% площі поля вкривається шкідливими хімікатами, що знижують якість продукції на стан ґрунту. Крім того важка техніка значною мірою ущільнює землю, що призводить до її виродження.

Впровадження роботів, які були б здатні цілодобово працювати в полі та були здані самостійно приймати рішення стосовно стану врожаю та потреби втручання у процес вирощування дасть змогу зменшити шкідливий вплив на землю.

Прогнози світових експертів вказують на те, що у найближчі 30-50 років сільське господарство докорінно зміниться й буде значною частиною роботизованим і автоматизованим. Одним із актуальних напрямів в цій сфері є створення роботів для боротьби з бур'янами.

Мета дослідження

Розроблення інноваційного концепту автономного сільськогосподарського робота-трактора для знищення бур'янів, його мехатронних систем, створення прототипу та його тестування.

Задачі дослідження

1. На основі аналізу ринку та наявних технічних рішень автономних роботів-трактора для боротьби з бур'янами запропонувати концепцію і розробити прототип власної автономної мехатронної системи для пошуку та знищення бур'янів у сільському господарстві.
2. Розробити дизайн, виконати розрахунки й провести моделювання основних технічних параметрів модулів знищення бур'янів для робота-трактора «FLIBot 2.0».
3. Розробити технологію виготовлення макету робота-трактора «FLIBot 2.0» та дослідити його роботу.
4. Підготувати пропозицію стартап-проєкту для ринку роботів-тракторів для обприскування та випалювання бур'янів в сільському господарстві.

Об'єкт дослідження

Процес пошуку дизайну і технічного рішення модулів наведення та знищення бур'янів сільськогосподарського робота-трактора.

Предмет дослідження

Екстер'єр та компоновка загальної платформи, модулів наведення та знищення бур'янів сільськогосподарського робота-трактора, їх функціональні та технічні характеристики.

Практична новизна

Вперше в Україні створено інноваційний прототип вітчизняної роботизованої техніки здатної точково обробляти рослини методами хімічного

та енергетичного впливу в сільському господарстві для умов Farming 4.0 як складової Індустрії 4.0.

Апробація роботи

Здійснено проєктний розрахунок модулів обприскування, випалювання та наведення. Виготовлено діючий прототип багатофункціональної платформи, яка може використовуватись в сільському господарстві. Проведено тестування платформи та її основних модулів.

РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ РОБОТИЗАЦІЇ БОРОТЬБИ З БУР'ЯНАМИ ДЛЯ КОНЦЕПЦІЇ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

1.1. Концепції точного землеробства та вимоги до їх технічного забезпечення

Основним трендом ресурсозберігаючих технологій в сільському господарстві є Precision Agriculture (Точне Землеробство) - управління продуктивністю посівів з урахуванням внутрішньопольової варіабельності середовища існування рослин. Його метою є отримання максимального прибутку за умови оптимізації господарських та природних ресурсів. При цьому відкриваються реальні можливості виробництва якісної, екологічно чистої продукції та збереження оточуючого середовища. Такий підхід забезпечує значно більший економічний ефект і, саме головне, дозволяє підвищити відтворюваність ґрунтового плодороддя та рівень екологічної чистоти сільськогосподарської продукції. Точне землеробство дозволяє скоротити відтворення витрати на внесення добрив та насіння в середньому на 30%.

За останнє десятиліття ми стали свідками величезного прогресу в сільськогосподарській техніці та технологіях, зокрема завдяки розробці та застосуванню технологій автоматизації, а також можливостям збору та аналізу даних та інформації різної техніки. Про це йдеться в сучасній колективній монографії [1], де висвітлені актуальні проблеми агроінженерії і зазначається, що “що до 2050 року населення світу збільшиться на 30% із нинішніх приблизно 7 мільярдів до 9 мільярдів, що вимагатиме збільшення світового продовольства на 50%. Таким чином, постійне вдосконалення та інновації в сільськогосподарській техніці та технологіях є важливими для вирішення цієї проблеми”. В роботі представлені загальні підходи до застосування

машинного зору в агроінженерії, безпілотних літальних систем і технологій корисного навантаження для точного землеробства, застосування роботів тощо. Як окремий тренд зазначається активний розвиток автономних транспортних засобів для агроінженерії.

Цікавим є погляд на розвиток сучасної агроінженерії з боку Індустрії 4.0 [2]. У статті розглядаємо, як концепції інноваційного управління ланцюгом поставок в епоху Індустрії 4.0 могли не тільки забезпечити шлях подолання зазначених проблем, але й створити основу для розробки нових форм роботи та бізнес-моделей для Фермерства 4.0. Методи Industrie 4.0 активно досліджуються для галузях сільського господарства, що призвело до появи таких термінів, як Agriculture 4.0 та Farming 4.0. У статті [2] аналізуються конкретні проблеми, з якими стикається сільське господарство вздовж ланцюга постачання сільськогосподарської продукції, щоб забезпечити успішне впровадження підходів Industrie 4.0, дослідження того, як підходи Industrie 4.0 можуть бути адаптовані для застосування до ланцюга постачання сільськогосподарської продукції (рис.1.1).

Базуючись на таких загальних поняттях, як *Connected World* (Підключений Світ) *Internet of Things* (Інтернет Речей), *Smart Data* (Розумні Дані), *Product Lifecycle Management* (Управління Життєвим Циклом Продукту) сформульовані операційні процеси сільського господарства: обробка великих масивів даних; інтелектуальне планування процесів; гнучкий доступ; захист потоку даних; модульні конструкції; зручність для користувачів (рис.1.2).

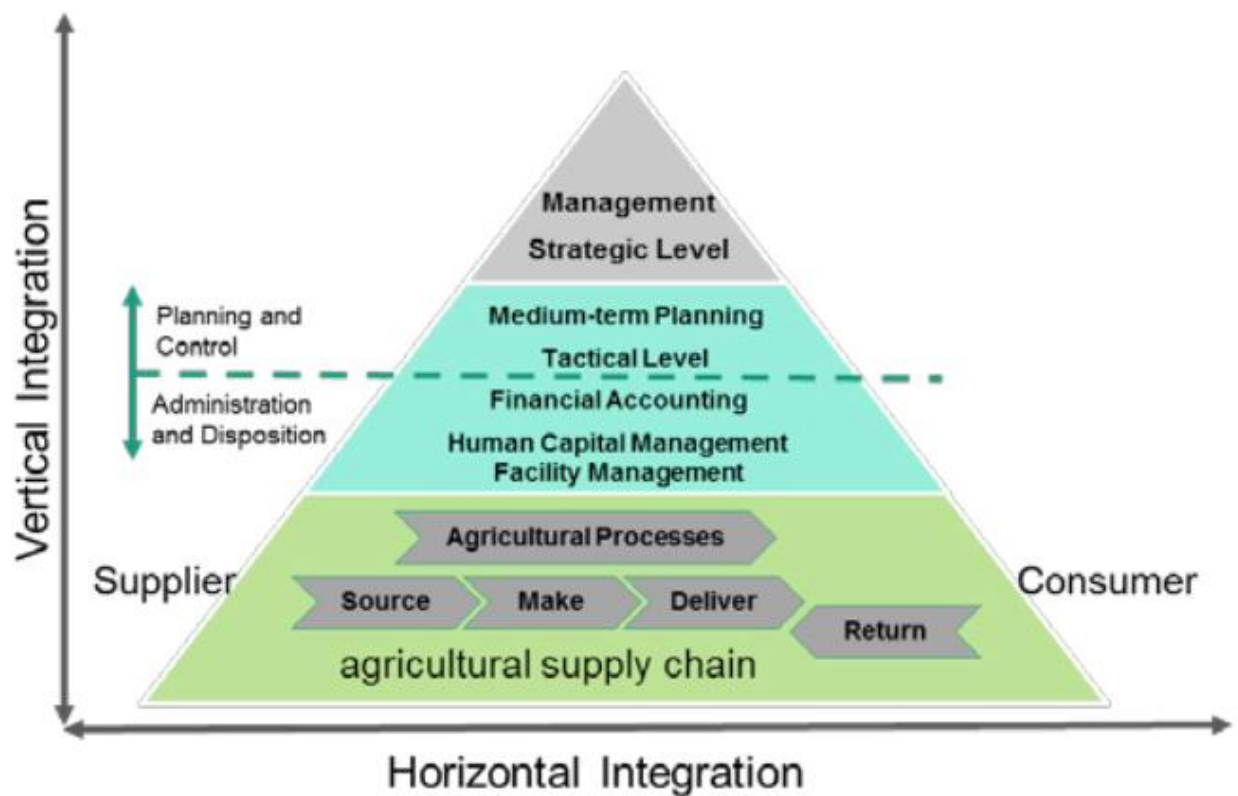


Рисунок 1.1 - Вертикальна та горизонтальна інтеграція в ланцюжку постачання сільськогосподарської продукції [2]

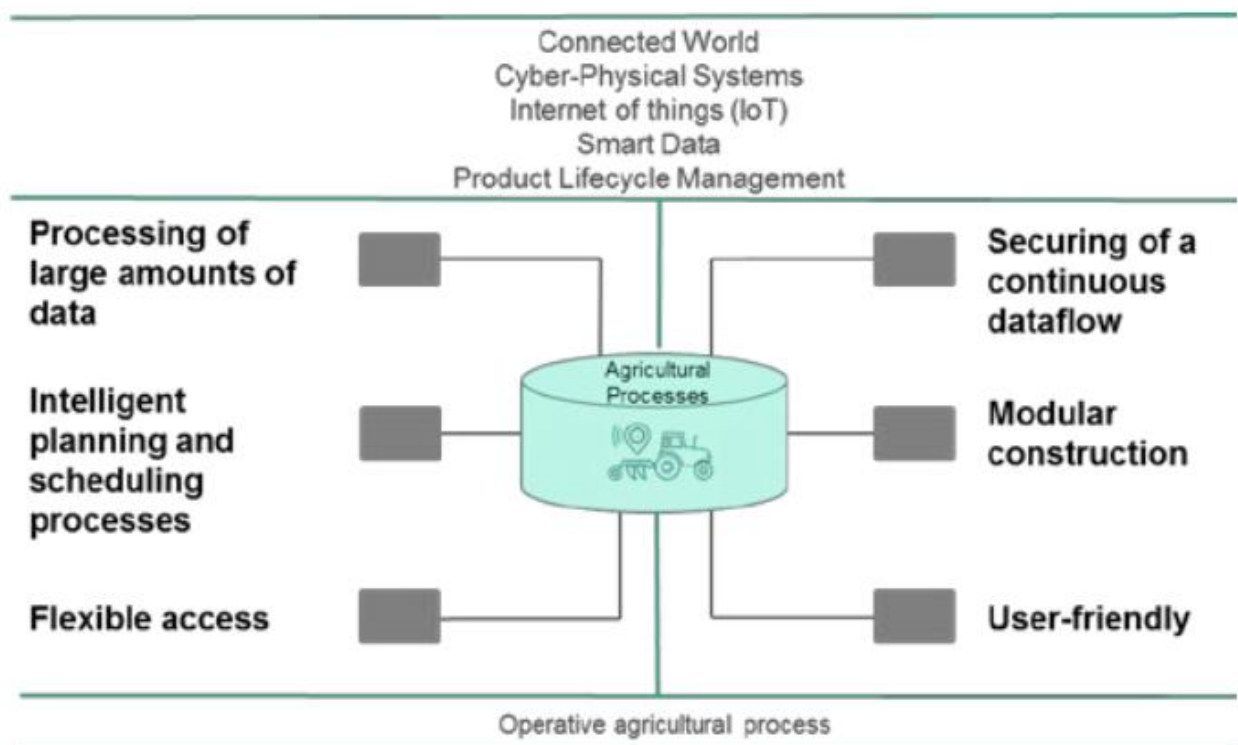


Рисунок 1.2 - Вимоги до сільського господарства з погляду Industrie 4.0

Технологічні рішення забезпечують важливий внесок у перетворення проблем управління ланцюгом постачання сільськогосподарської продукції у можливості. Очевидно, прості технології, такі як Bluetooth, GPS або RFID, у поєднанні зі зв'язком між людьми та сільськогосподарською технікою на всіх рівнях співпраці, дозволяють створити самооптимізуючу структуру ланцюга постачання сільськогосподарської продукції. Вбудовані в інноваційну платформу управління сільським господарством, ці технології можуть бути легко розгорнуті та використані усіма зацікавленими сторонами. Однак нові технології та програмне забезпечення для цифровізації сільськогосподарського бізнесу не можуть самотійно вирішити всі проблеми цифрової трансформації в ланцюжку поставок. Інфраструктура, підвищення кваліфікації та кваліфікація, відповідне структурне та законодавче робоче середовище та бажання впроваджувати нові технології також мають вирішальне значення. Для роботи Farming 4.0 необхідна сучасна телекомунікаційна інфраструктура в сільській місцевості. Крім того, здатність використовувати структуровані та неструктуровані дані вздовж повністю сільськогосподарського ланцюга поставок виявиться важливою для успішної трансформації існуючих сільськогосподарських процесів у ведення сільського господарства в епоху Індустрії 4.0.

Сьогодні за допомогою супутникових знімків практично в реальному часі, а також порівняльного аналізу історичних даних у певній ретроспективі є можливість визначати стан і перспективи окремих ділянок, а поширення застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) дало фермерам можливість дуже швидко й, на відміну від супутникових даних, достатньо дешево отримувати таку інформацію [3], а ринок застосування дронів у сільському господарстві за даними 2016 року був другим за обсягами у цивільних галузях (див.табл.1.1).

Таблиця 1.1 - Використання дронів у цивільних галузях [3]

№	Галузь	Застосування дронів	Бюджет \$ млрд.
1	Інфраструктура	моніторинг інвестицій, технічне обслуговування, інвентаризація активів	45,2
2	Сільське господарство	аналіз ґрунтів та дренажу, моніторинг здоров'я посівів, прогноз врожаю, обприскування пестицидами та добривами	32,4
3	Транспорт	доставка вантажів, медична логістика	13,0
4	Безпека	моніторинг ліній і сайтів, проактивне реагування	10,5
5	Розваги і медіа	реклама, розваги, аерофотозйомка, шоу та спецефекти	8,8
6	Страховання	підтримка в процесі врегулювання претензій, виявлення шахрайства	6,8
7	Телекомунікації	технічне обслуговування вежі, передача сигналу	6,3
8	Гірництво	планування, розвідка, оцінка впливу на навколишнє середовище	4,3

Стаття [3] також цікава тим, що містить класифікацію повітряних дронів сільськогосподарського призначення, та даними про ціни, застосування, переваги і недоліки сучасних комерційних моделей та узагальнення використання дронів у завданнях моніторингу стану посівів.

Найближчою до предметної області спеціальності “131 - прикладна механіка” є роботизовані та мехатронні системи для агроінженерії. Використання роботизованих машин у сільському господарстві стане поширеним у майбутньому. Автоматичні машини замінять людину в сільському господарстві, і вони можуть значно допомогти фермерам у досягненні ефективного сільського господарства. Книга [4] присвячена робототехніці та мехатроніці, які використовуються в сільському господарстві та містить досягнення останніх десятиліть у цій сфері.

1.2. Сучасні тенденції і конструкції сільськогосподарських роботів для боротьби з бур'янами

Мобільні автономні роботи - актуальний тренд в широкому спектрі галузей [5]. Такі роботи активно розвиваються з метою виконання завдань, пов'язаних з переміщенням та взаємодією з навколишнім середовищем, в рамках яких завдання можна виконати навіть без нагляду людей-операторів. Серед таких роботів нас буде цікавити аналіз сучасних тенденцій роботизації в сільському господарстві, сучасні моделі інноваційних роботів та мехатронних систем з виділенням тих аспектів, які є корисними у боротьбі з бур'янами.

1.2.1. Роботизація у сільському господарстві

Говорячи про роботизацію, слід відмітити тренд на перехід сільськогосподарських машин на альтернативні джерела енергії - електричні, на водородному паливі та гібридні. У статті [6] представлено історію розвитку (рис. 1.3) та різні конфігурації силових установок тракторів (рис. 1.4).

Важливими є глобальні тенденції Перетворення попиту на енергію в транспортному секторі [7] (рис. 1.5) та бачення енергонезалежної екосистеми ферми (рис. 1.6). Тут зазначається, що "Майбутні дослідження сільськогосподарської техніки будуть зосереджені на розробці систем навігації (тобто, навігаційного контролю, екологічної обізнаності та планування шляху для оптимізації роботи техніки), а також включення інтелекту для нагляду за операціями та сприйняття, пов'язаного з машиною/довкіллям/людиною. взаємодії. Нарешті, впровадження нових роботизованих технологій покращить реалізацію автоматизації сільськогосподарської техніки, а фермери в майбутньому будуть використовувати надійні незалежні транспортні засоби".

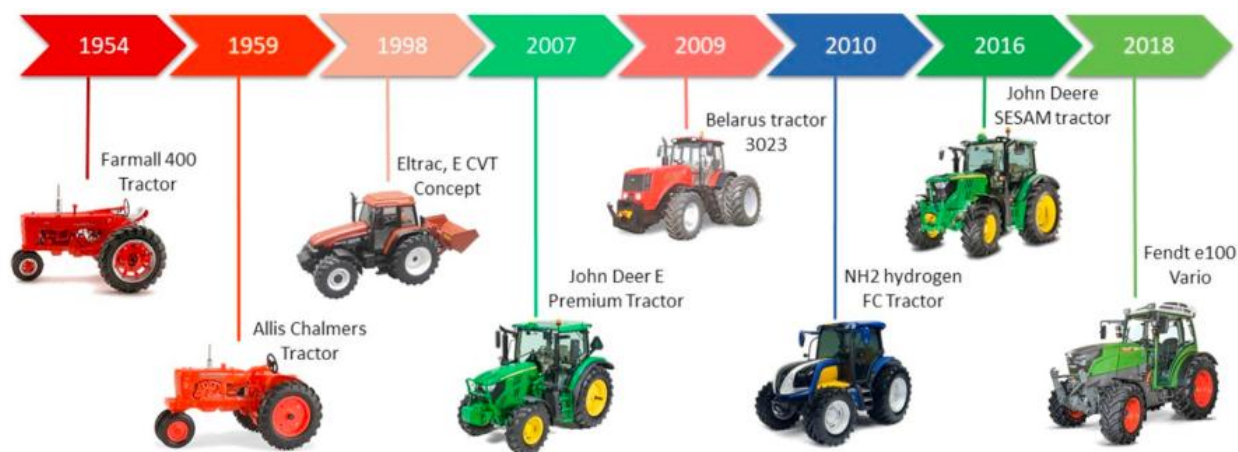


Рисунок 1.3 - Розвиток гібридних тракторів [6]

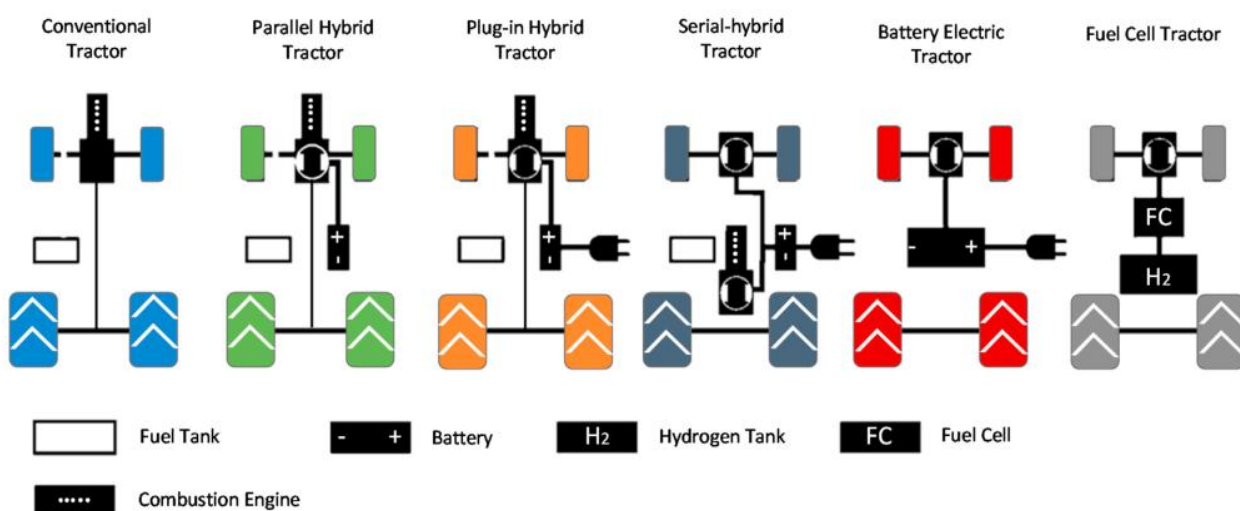


Рисунок 1.4 - Конфігурації трансмісій гібридних електричних тракторів [6]

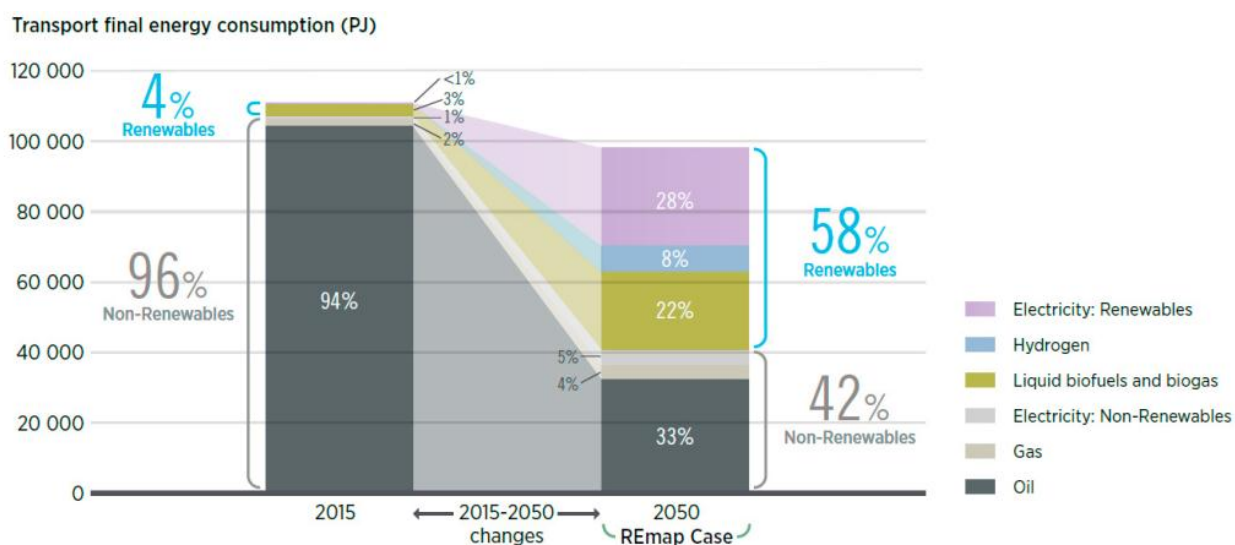


Рисунок 1.5 - Перетворення попиту на енергію в транспортному секторі [7]

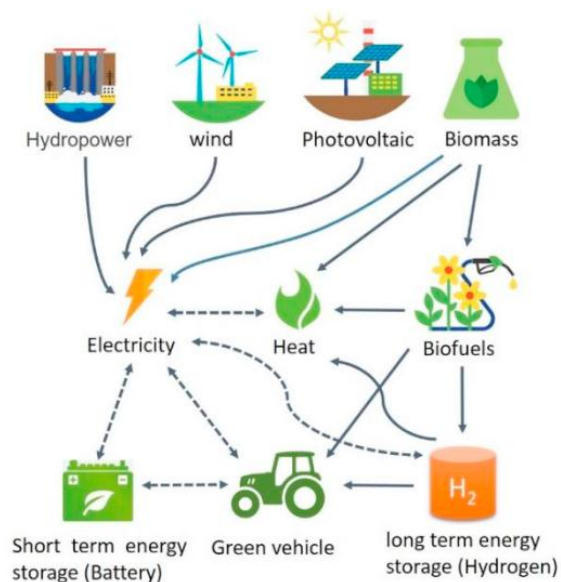


Рисунок 1.6 - Схематичне бачення енергонезалежної екосистеми ферми [7]

1.2.2. Сучасні моделі автономних сільськогосподарських тракторів та інноваційних роботів

Передові глобальні компанії, такі як John Deere, Case IH та інші, а також групи дослідників вже досить тривалий час зайняті розробкою автономних сільськогосподарських тракторів різного призначення. Зокрема у [8] представлено розробки для автономної сівби, що забезпечує високу якість і контрольованість процесу.

Концепція одного з перших автономних агро-роботів наведена у [9]. Проєкт AgroBot складався з мобільної платформи, роботизованої головки з двома степенями вільності, маніпулятора із 6-ма степенями вільності, системи бачення, сенсорів та відповідних систем контролю. Проєкт був призначений для малих фермерських господарств.

Сьогодні основними напрямками роботизації у сільському господарстві є створення: прототипів автономних тяглових роботів-тракторів, наземних малогабаритних автономних роботів для польових робіт, малогабаритних наземних роботів для збору врожаю та обслуговування, БпЛА для широкого спектру завдань. Розглянемо ці групи.

В групі **прототипів автономних тяглових роботів-тракторів** окрім саморобних можна виділити наступні розробки провідних компаній світу.

Case IH Autonomous Concept Vehicle (рис. 1.7) - концепт робота-трактора для демонстрації можливостей дистанційного керування. У майбутньому ця технологія забезпечить більшу експлуатаційну ефективність для таких завдань, як обробка ґрунту, посадка, обприскування та збирання врожаю. Розробка була представлена у 2016 році [6].



Рисунок 1.7 - Case IH Autonomous Concept Vehicle

[<https://www.caseih.com/apac/en-sea/innovations/autonomous-farming>]

Нова концепція **автономного трактора John Deere** (рис. 1.8) — компактний електричний трактор із вбудованим навісним обладнанням. Трактор має загальну потужність 500 кВт і може бути оснащений як колесами, так і гусеницями. Залежно від застосування можливий гнучкий баласт від 5 до 15 тон, щоб зменшити ущільнення ґрунту. Завдяки електричному приводу відсутні експлуатаційні викиди та надзвичайно низький рівень шуму [6].



Рисунок 1.8 - Autonomous cab-less tractor, developed by John Deere

[<https://www.deere.co.uk/en/agriculture/future-of-farming/>]

В групі наземних малогабаритних автономних роботів для польових робіт можна виділити наступні.

Робот HortiBot [10] - одна із тривалих передових розробок автономної платформи. Дана модель була спроектована в Орхуртському університеті (Данія) та була багаторазово модернізована в процесі випробувань та експлуатації. Робоча платформа HortiBot (рис. 1.9) виконана на базі газонокосарки на радіоуправлінні, яка здатна працювати в автономному режимі. Робот використовує систему GPS та здатний обертатися навколо осі. Його габаритні розміри наближені до кубу з довжиною грані 920 мм, а його вага в залежності від навісного обладнання складає від 200 до 300 кг. Чотири колеса приводяться в рух за допомогою приводу, який керується гідравлічним двигуном та центральним електродвигуном постійного струму для окремого управління колісними модулями. Окреме управління колесами дозволяє підвищити маневреність платформи, що в свою чергу дозволяє ефективно працювати на ділянках з малою площею. На сьогодні модель виконана лише у вигляді прототипу та не випущена у масове виробництво.



Рисунок 1.9 - Робот HortiBot [10]

Робот BoniRob [6] є розробкою Deepfield Robotics. Робот (рис. 1.10) представляє собою багатофункціональний агро-робот з можливою заміною навісного обладнання, спроможний управляти всіма колесами та здійснювати рух у всіх напрямках. Це гнучка платформа з окремо керованими колесами. Однією з переваг даного робота є здатність змінювати ширину колії від 0,75 м до 2 м та кліренс - від 0,4 м до 0,8 м. Платформа має 16 ступенів свободи, рух яких забезпечується електричним двигуном та гідравлічним приводом.

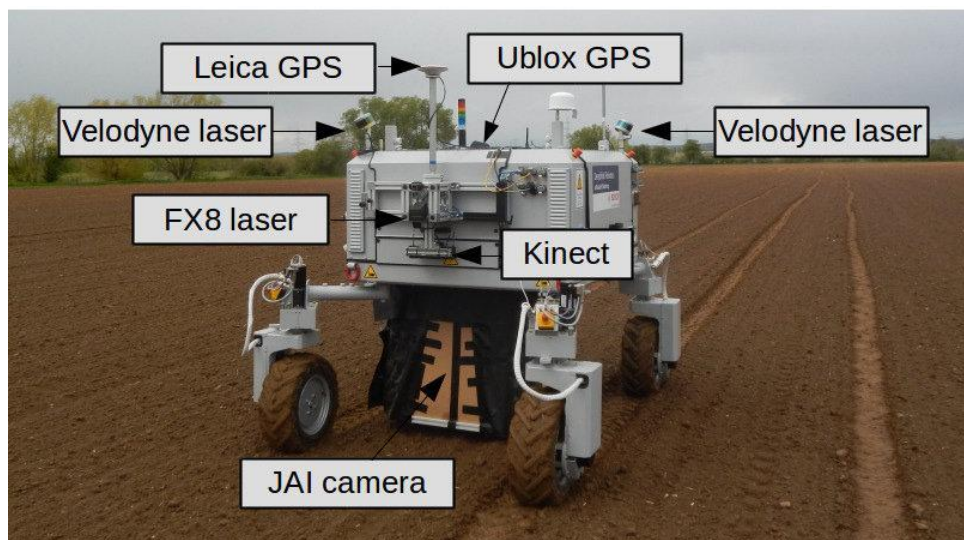


Рисунок 1.10 - Робот BoniRob [https://www.researchgate.net/figure/Agricultural-field-robot-BoniRob-with-all-sensors-The-JAI-camera-is-mounted-inside-the_fig1_318656550]

Платформа SwagBot [11] - всенаправлений електричний робот, яким можна керувати за допомогою комбінації GPS і пропріоцептивних даних, зібраних під час нормальної роботи. розроблена авторами ця модель експериментально перевірена за допомогою випробувань на витривалість, проведених на місцевості з нерівним рельєфом.

Робот Ladybird [6] створили вчені Австралійського центру польової робототехніки (ACFR), Університету Сіднея (рис. 1.11). Ladybird є всеспрямованим роботом, в якому необхідна енергія постачається за допомогою акумулятора, вбудованого в робота, який заряджається фотоелектричними модулями за допомогою сонячної енергії.



Рисунок 1.11 - Робот Ladybird [6]

Батарея складається з акумуляторних батарей, які можуть працювати протягом 7-9 годин на день, а вбудовані фотоелектричні модулі можуть забезпечувати електроенергією в гарну погоду. Автономну навігацію та сприйняття врожаю в цьому роботі виконує мультимодальний набір датчиків, що складається з гіперспектрального, теплового, інфрачервоного, панорамного бачення, стереобачення, LiDAR і GPS. Для виявлення посівних рядів і уникнення перешкод застосована сферична LiDAR камера, спрямована в прямому і зворотному напрямках. Планування маршруту виконується на основі мапи із використанням GPS. Інфрачервоні камери, гіперспектральне

сканування ліній і стереобачення допомагають визначати урожай. Обчислення та обробка забезпечуються комп'ютером (Intel Core i7-3610QE, RAM 16 Gb).

Робот RIPPA™ (Robot for Intelligent Perception and Precision Application) [6] для прополки у виробництві овочів також був створений у центрі ACFR. У цьому роботі компонування платформи було змінено, щоб представити легшу конструкцію в порівнянні з Ladybird, більш надійну та зручну при роботі на фермі (рис. 1.12). Фотоелектричні модулі, встановлені на даху робота, заряджають акумулятор з терміном служби 7 год, який може забезпечити 24 години автономної роботи для робота протягом семи днів тижня. На роботі також була встановлена техніка боротьби з бур'янами, відома як VIIPA™ (Variable Injection Intelligent Precision Applicator), з можливістю швидкого й автономного сушіння місця та точного впорскування рідини в мікродозах. Можливість працювати під нахилом значно збільшує область використання даного робота, так як дозволяє працювати на золистих полях, які переважають на теренах Європи.



Рисунок 1.12 - Робот RIPPA™ [6]

Компанія Naio Technoologies [<https://www.naio-technologies.com/>] розробляє одразу кілька моделей автономних сільськогосподарських роботів.

Робот OZ Weeding Robot - невеликий робот-помічник у сільському господарстві для трудомістких і важких завдань. Робот являє собою автономну

4-колісну платформу з габаритами 130x47x83 см, вагою 150 кг, часом автономної роботи 8 годин, максимальною швидкістю 18 км/год. Робот оснащений системою GPS, здатний переміщувати до 300 кг корисного навантаження та за одну годину обробляти 1000 м.кв. площі (рис. 1.13).

Робот OZ Dino - призначений для прополки для великих овочевих культур. Dino автономно орієнтується з точністю 2 см завдяки системі наведення, яка поєднує інформацію від RTK GPS та інших датчиків. Dino розпізнає посівні рядки та налаштовує інструменти для прополки якомога ближче до рослин. Робот придатний для роботи з листям салату, цибулею, морквою, пастернаком, капустою, цибулею-пореем, цвітною капустою, різними травами (часником, кінзою, м'ятою тощо). Робот має регульовану ширину колії - від 160 до 220 см, масу 1250 кг, може пересуватись зі швидкістю 4 км/год протягом 8-10 годин (рис. 1.14).



Рисунок 1.13 - Робот OZ Weeding Robot [<https://www.naio-technologies.com/>]



Рисунок 1.14 - Робот OZ Dino [<https://www.naio-technologies.com/>]

Робот Dino компанія позиціонує як перший робот-виноградар, альтернативу використанню гербіцидів. Робот вагою 1700 кг має довжину 450 см, регульовану ширину 142-185 см та висоту 200 ± 30 см. Швидкість руху - до 6 км/год, автономність - 8 годин (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 - Робот-виноградар Ted [<https://www.naio-technologies.com/>]

Робот AgBotII [4, 6] був розроблений у Квінсленському технологічному університеті. Робот модульної конструкції здатний працювати в групі з іншими автономними роботами (рис. 1.16). Орієнтування на ділянці

здійснюється за допомогою камер, сенсорів та розвинуеною системою розпізнавання. Призначений для механічного та хімічного знищення бур'янів. На відміну від важкої сільськогосподарської техніки, AgBot II, маючи значно меншу масу дозволяє зменшити ущільнення ґрунтів внаслідок своєї роботи. Робот має два бічний модулі, які складаються з приводів, акумуляторів та необхідної електроніки. Конструкція забезпечує диференційне керування передніми колесами та задніми колісними модулями. За рахунок зменшення кількості приводів, зменшується вартість самого робота. Взаємодія основних підсистем робота AgBotII наведена на блок-схемі (рис. 1.17).



Рисунок 1.16 - Робот AgBotII [4]

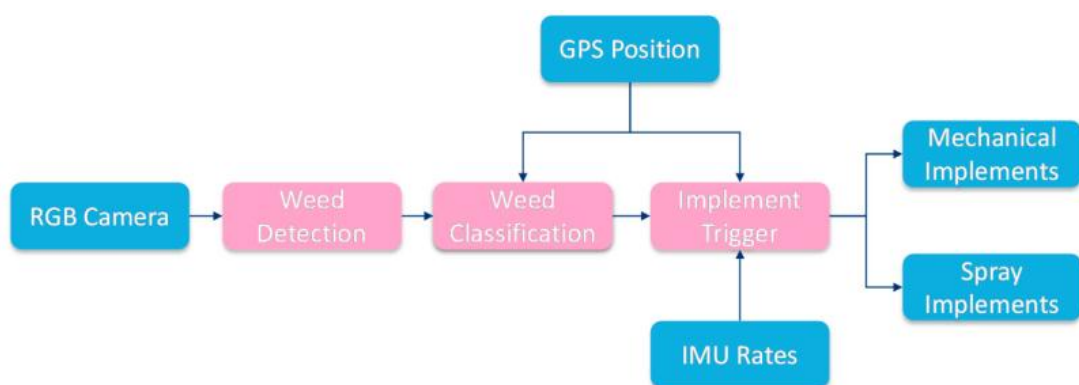


Рисунок 1.17 - Робот AgBotII [4]

Робот ecoRobotix – швейцарської компанії, що виробляє повністю автономні роботи-обприскувачі з фотоелектричним двигуном, які виконують операції з прополки просапних культур, луків і культур між посівами (рис.

1.18). Цей пристрій використовує приймач RTK GPS (Real-Time Kinematic, Global Positioning System) і камеру, щоб позиціонувати себе на фермі та стежити за посівними рядками для виявлення бур'янів між ними. Після систематичного виявлення бур'янів вносять мікродозу гербіциду маніпуляторами робота. Швидкість робота контролюється відповідно до концентрації бур'янів, при цьому найвища продуктивність досягається при низьких або помірних концентраціях у ґрунтах без присутності вологи. Робот може покривати максимальну площу поверхні 3 га/день і 10 га/тиждень при швидкості вітру нижче 60 км/год на рівні поля. Однією з головних переваг цього продукту є його здатність приймати команди зі смартфонів.

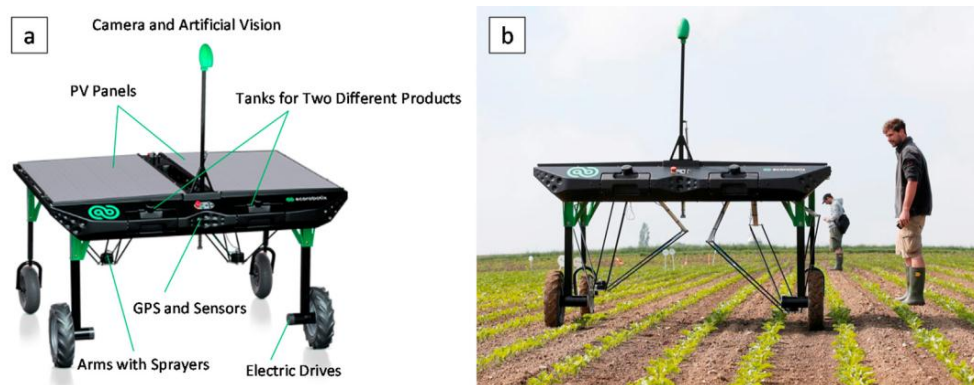


Рисунок 1.18 - Автономний робот для прополки:

а - складові елементи; в - випробування в полі [6]

Робот Thorvald II - перспективна розробка Норвезького університету природничих наук [12]. Thorvald II – це новий робот модульної конструкції, яка дозволяє комбінувати різні роботи з використанням тих самих базових модулів і перебудовувати, використовуючи лише основні ручні інструменти. Модулі розроблені для забезпечення високоякісних робіт, які можна швидко налаштувати для застосування в даному середовищі (рис. 1.19).



Рисунок 1.19 - Модулі Thorvald II. Зліва-направо: низька вузька версія для теплиць, триколісна версія, версія з диференціальним приводом, висока версія для фенотипування, стандартна версія [12]

Тести та досвід використання робота Thorvald II показують великі перспективи на майбутнє. Робот добре працює в абсолютно різних середовищах, постійно відбувається покращення механічної конструкцію на основі досвіду роботи в польових умовах. Мета полягає в тому, щоб скоротити час побудови та витрати на збірку до мінімуму, оскільки це дозволить створити недорогим рої високоефективних роботів. Робот бере участь в експериментах у Норвегії та Великій Британії з такими функціями як, вимірювання вологості ґрунту та фенотипування у відкритих полях, обробка UVB від цвілі та логістика в полуничних тунелях, а також моніторинг та обробка UVB огірків та помідорів у теплицях.

В групі малогабаритних наземних роботів для збору врожаю та обслуговування можна виділити наступні.

Поряд із великими дослідницькими та інноваційними проєктами спостерігається доволі велика кількість невеликих проєктів для широкого спектр застосування від домашніх до фермерських господарств.

У статті [13] надано опис розробки недорогого сільськогосподарського робота для посіву сільськогосподарських культур. Прототип системи складається з двох частин, а саме мобільної основи для переміщення робота та висівного механізму, прикріпленого до мобільної основи. Мобільна база має

чотириколісну конструкцію для полегшення пересування на нерівній місцевості, а механізм висіву використовує концепцію кривошипного повзуна для безперервного впорскування розсади в землю. Випробування посіву сільськогосподарських культур показують, що робот здатний посіяти 138 сіянців за 5 хвилин з точністю 92% у порівнянні зі 102 сіянцями, створеними людьми. Це свідчить про підвищення ефективності посіву сільськогосподарських культур понад 35%.

У роботі [14] представлено концепцію модульного робота для збирання плодів з дерев. Наведені результати вимірювання та моделювання реальних дерева, та обчислення часу, який потрібен роботу, щоб досягти кожного фрукта відповідно до структури та розташування робота. Використано підхід пошуку оптимального варіанта для виконання заздалегідь визначених завдань, наприклад, збільшення кількості зібраних фруктів або мінімізації часу збирання. Результати моделювання, засновані на реальних тривимірних моделях дерев, показують, що модульні роботи можуть зібрати на 30–40 % більше фруктів, ніж роботи з фіксованою структурою такої ж складності.

Окремий напрямок сільськогосподарської робототехніки - роботи-садівники. Так у роботі [15] представлено автономний робот, який здатний підстригати кущі з формуванням крони відповідної форми, а в роботі [16] - розумний автономний садовий ровер для догляду за рослинами в тому числі й для домашніх умов.

Високу мобільність і недоступні для наземних роботизованих засобів забезпечують **Безпілотні літальні апарати (БпЛА)**. В роботі [3] представлено аналіз технологій дронів та їх модифікацій з часом у сільському господарстві за останнє десятиліття. Розглянуто застосування дронів у зоні моніторингу посівів та обприскування пестицидами для точного землеробства. На рис. 1.20 наведено основні типи БпЛА, що застосовуються в сільському господарстві.



а)



б)



в)

Рисунок 1.20 - Типи БПЛА [3]:

а - літаюче крило; б - гелікоптер; в - дрон-мультикоптер

Можливості використання дронів охоплюють широкий спектр завдань моніторингу здоров'я і стану рослин (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Використання дронів у моніторингу стану посівів [3]

Сільськогосподарські роботи	Використання даних на основі зображень	Переваги перед іншими системами аерофотозйомки
● Розвідка врожаю ● Моніторинг здоров'я посівів ● Обстеження перед посівом ● Рекомендація щодо азоту ● Моніторинг врожайності ● Моніторинг стресу рослин ● Оцінка посухи ● Аналіз старіння ● Індексація площі листя ● Класифікація дерев ● Розпилення пестицидів у потрібному місці ● Обприскування добривами	● Оцінка висоти рослин ● Підрахунок рослин ● Моніторинг здоров'я рослин ● Розрахунок наявних поживних речовин ● Класифікація захворювання ● Виявлення бур'янів ● Відносні оцінки біомаси ● 3d / об'ємні дані (пальи, латки, ями та пагорби)	● Дешевше зображення ● Більша точність ● Раннє виявлення проблем ● Частіші індексні звіти ● Швидше реагування ● Краща стабільність

В той же час можна стверджувати, що БПЛА не замінять повністю наземні роботизовані засоби через об'єктивно вищі витрати енергії та наявність потужного вихрового потоку під дроном.

1.2.3. Сучасні тренди сільськогосподарської робототехніки

Аналіз, проведений в розділах 1.2.1 та 1.2.2 дозволяє виокремити глобальні та локальні тренди сучасного світового сільського господарства.

Глобальними трендами є:

- Збільшення частки генерування та споживання відновлюваної енергії;
- Цифровізація об'єктів і процесів;
- Збільшення частки точного землеробства;
- Підвищення ступеня автономності (не залежності від оператора) технічних засобів у сільському господарстві;
- Роботизація та штучний інтелект;

В частині роботизації сільськогосподарського виробництва **локальними трендами є:**

- Автономізація великих тягових машин та навісного обладнання;
- Збільшення частки невеликих автономних машин і роботів та розвиток технологій роботи рою;
- Застосування принципу модульності;
- Зростання кількості та розширення сфери застосування безпілотних літальних апаратів;
- Розвиток різнотипових автономних систем які взаємодіють через технології інтернету речей.

Стосовно конкретного завдання магістерської роботи - роботизації боротьби з бур'янами, перспективним напрямком є створення малогабаритних наземних роботів з високим рівнем автономності та застосуванням штучного інтелекту для розпізнавання бур'янів. Попередній аналіз дозволяє умовно розділити агро роботи на два класи по габаритах: великі та маленькі. Великі агро роботи найчастіше є поліфункціональними, мають велику потужність та запас енергії, виконують значну частину завдань за рахунок внутрішньої системи керування та обчислення. Малорозмірні агро роботи найчастіше виконують обмежені функції, часто передбачається робота рою роботів, значна частина інтелектуальних завдань виконується на централізованому сервері, який також виконує функцію координації робіт рою роботів. На нашу думку застосування другого підходу має вищі перспективи в майбутньому.

Грунтуючись на цьому викладена концепція проєкту, представлена в розділі 1.5.

У таблиці 1.3. наведено наше бачення орієнтовних параметрів перспективних моделей агро роботів для боротьби з бур'янами. Виходячи зі значень для малогабаритних роботів планується розробляти проєкт.

Таблиця 1.3. Параметри перспективних моделей агро роботів

Параметр	Значення для великогабаритних агро роботів	Значення для малогабаритних агро роботів
Маса, кг	500 - 2000	50 - 500
Габарити (Д+Ш+В), м	3 - 9	0,5 - 3
Швидкість переміщення, км/год	2 - 10	
Автономність, годин	4 - 12	0,5 - 4

1.3. Інженерні задачі забезпечення створення перспективних моделей роботів для боротьби з бур'янами

1.3.1. Задачі управління роботом

В загальній постановці управління автономним роботом повинно розглядатись як задача управління будь-яким транспортним засобом, який має визначену масу із центром її розташування, колісну формулу з параметрами шасі, керованістю кожної осі, підвіскою, параметрами шин (покришок) або гусеничного ходу, системи гальмування тощо. В цьому аспекті корисним є підручник [17]. Деякі питання, викладені тут не є актуальними, наприклад, рух на великій швидкості. В той же час значна кількість математичних моделей може бути використана для аналізу параметрів динаміки руху автономного робота-трактора FLIBot 2.0.

В частині розуміння можливостей застосування й управління мехатронними електричними системами наведені у підручнику [18]. Детально розглянуті питання вибору та моделювання електричних та електрично керованих виконавчих елементів, зокрема електричних насосів, електрогідравлічних циліндрів, електричних вентиляторів, електрогідравлічних клапанів тощо. Значна увага приділена проєктуванню логічних контролерів, починаючи основ проєктування логічної системи, опису процесу та функціональному аналізу, формальному моделюванню дискретних систем, розробці схеми логічного контролера, програмуванню логічного контролера, схеми підключення, вибору системи автоматизації, Проблемам безвідмовного проєктування, блокування та перевірки і закінчуючи прикладами реалізації. тут цікавим є приклад проєктування процесу збирання фруктів (рис. 1.21) за допомогою таблиці послідовності (рис. 1.22).

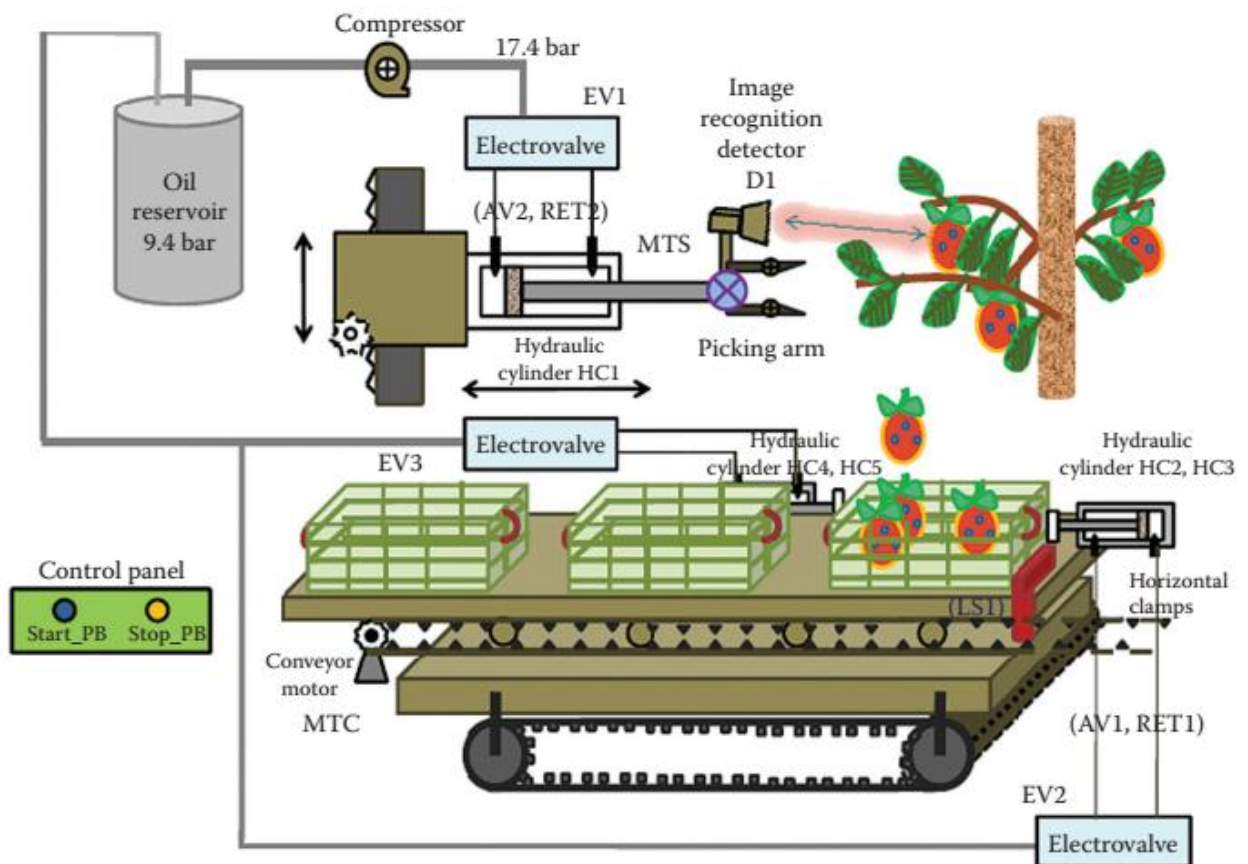


Рисунок 1.21 - Процес автоматизації збирання фруктів [18]

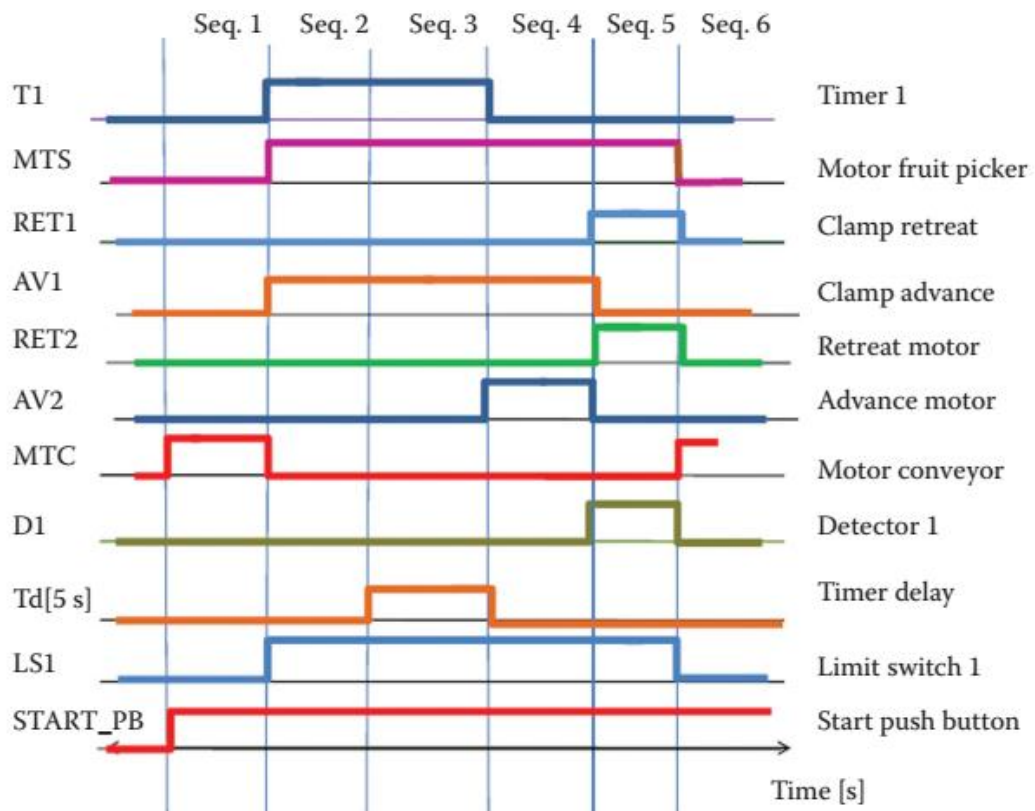


Рисунок 1.22 - Хронологічна діаграма процесу збору фруктів [18]

Ще одним цікавим аспектом джерела [18] є детально розглянуті питання вибору і моделювання елементів зондування та збору даних. Системно розглянуті питання елементів виявлення та вимірювання - низки аналогових і цифрових датчиків широкого спектру застосування, а також побудова промислової мережі передачі даних, включаючи топологію, компоненти мереж, специфікації обмежень, комунікаційні протоколи, аудит, критерії продуктивності, контрольні показники та вибір компромісу.

Стаття [19] розглядає випадок трактора, підключеного до причіпного обладнання, обидва з яких були автоматизовані для навігаційних цілей. Наведені вимоги до архітектури зв'язку для керування як трактором, так і агрегатом для наведення. Основна ідея полягає в тому, щоб управляти системою наведення через мережу ISO 11783 (рис. 1.23), яка, з одного боку, забезпечує канал зв'язку, але, з іншого боку, також встановлює обмеження для потоків інформації.

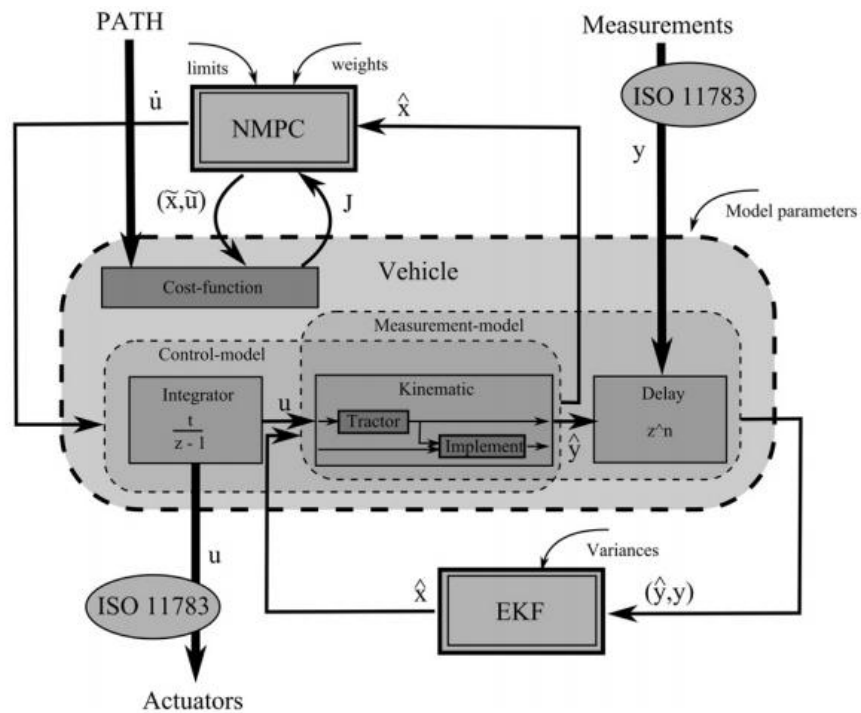


Рисунок 1.23 - Потoki інформації всередині програмного забезпечення між класами зберігання та різними модулями [19]

Найбільш близькою до концепції FLIBot 2.0 є система, викладена у [20]. Тут зазначається, що сьогодні і в майбутньому потрібна більш ефективна сільськогосподарська техніка, оскільки сільськогосподарські площі стають все більш обмеженими, а витрати на енергію та робочу силу зростають. Для підвищення їх ефективності в [20] досліджено задачу відстеження траєкторії автономного трактора як сільськогосподарської виробничої машини. Перевага надана прогнозованому управлінню моделлю для керування динамікою повороту трактора, який може впоратися з обмеженнями на стани та приводи в системі (рис. 1.24). Динаміка рискання визначається за допомогою нелінійної ідентифікації системи частотної області методом найменших квадратів. Швидкість контролюється пропорційно-інтегрально-похідним контролером, а кінематичний контролер траєкторії використовується для обчислення сигналів бажаної швидкості та бажаної швидкості рискання для підсистем, щоб мінімізувати помилки відстеження як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках. Також наведені усі передавальні функції.

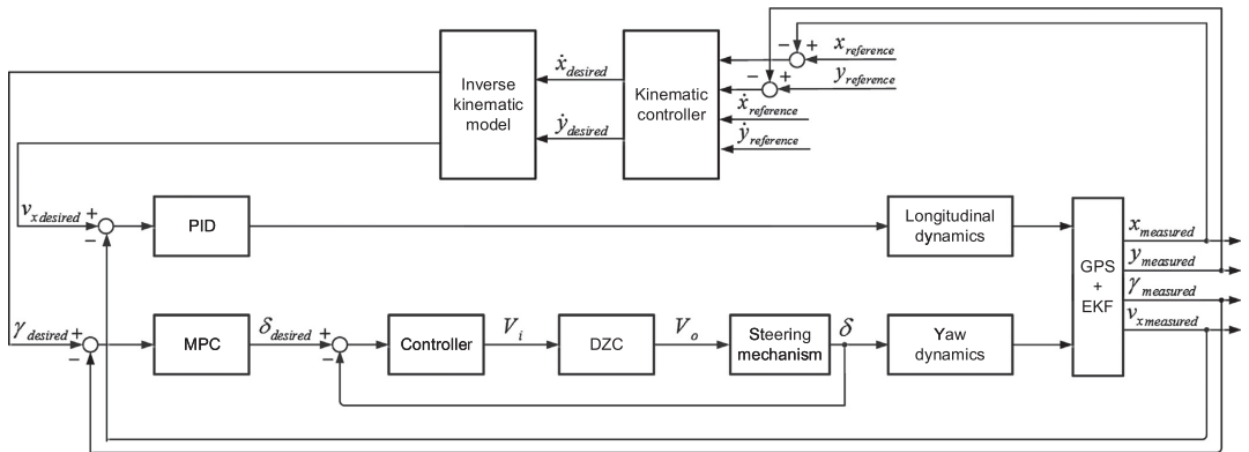


Рисунок 1.24 - Структурна схема системи управління [20]

У статті [21] представлена стратегія скоординованої багатоагентної прополки в умовах часткової екологічної інформації. Мета – продемонструвати доцільність координаційних стратегій для покращення ефективності прополки автономних сільськогосподарських роботів (рис. 1.25). Показано, що за наявності достатньої кількості агентів команда автономних роботів може успішно прополювати поля з різною початковою щільністю банку насіння, навіть якщо до початку прополювання може пройти кілька днів. Крім того, продемонстровано, що використання обміну інформацією між агентами значно покращує продуктивність системи у міру збільшення кількості агентів. В якості домену для тестування цих алгоритмів було розроблено середовище моделювання Weed World, яке дозволяє в реальному часі візуалізувати скоординовану політику прополки та включає реалістичну генерацію бур'янів. У роботі визначено необхідну кількість агентів для заданої початкової щільності банку насіння та різної дозволеної кількості днів до початку процесу прополки.

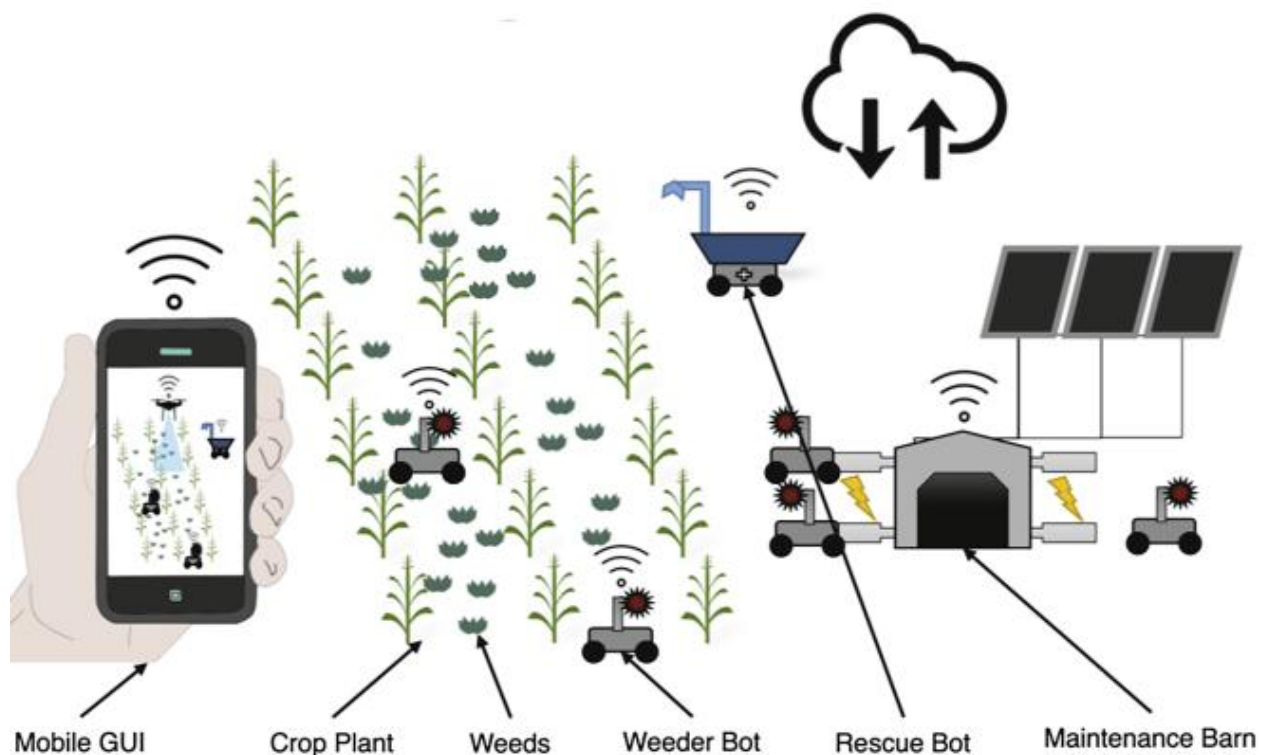


Рисунок 1.25 - Концепція роботизованої боротьби з бур'янами командою ботів для прополки та автоматизованих амбарів для технічного обслуговування [21]

У статті [22] розглянуті особливості руху автономного транспортного засобу по нерівній місцевості. Тут йдеться про автоматичну оцінку та класифікацію місцевості, яка виконується сільськогосподарським транспортним засобом. Мобільність і безпека транспортних засобів, а також успішне виконання важливих сільськогосподарських завдань, включаючи посів, оранку, внесення добрив і контрольований рух, залежать або можуть бути покращені шляхом правильного визначення рельєфу. Оцінка місцевості виконується за допомогою не лише традиційних ознак зовнішнього вигляду, тобто колірних і геометричних властивостей, а й контактних ознак, тобто вимірювання динамічних ефектів на основі фізики, які керують взаємодією транспортного засобу з місцевістю.

Таким чином достатній комплекс наукових публікацій достатній для адекватного вирішення комплексу завдань управління агроботом FLIBot 2.0.

1.3.2. Задачі моніторингу й розпізнавання бур'янів

Однією зі складних з точки зору прикладної механіки задач реалізації проєкту FLIBot 2.0 є застосування технічного зору для моніторингу бур'янів та штучного інтелекту для їх розпізнавання.

Алгоритми застосування технічного зору і управління об'єктами на основі цих даних у середовищі MathLab наведені у фундаментальному підручнику [23].

Його перша частина містить загальні відомості про системи координат та їх трансформації в часі, включаючи процедури їх реалізації у MathLab.

Друга частина присвячена мобільним роботам, зокрема питанням колісних роботів: подібних до авто; з диференціальним керуванням; всенаправлені. Всі варіанти виконання можуть мати місце при створенні автономних роботів для боротьби з бур'янами. також представлені моделі та алгоритми для дронів. Також розглянуті питання навігації колісних роботів у відкритому характерний для сільського господарства) та обмеженому просторі, планування траєкторій переміщень. Важливим є питання локалізації (визначення місця розташування робота в глобальній системі координат та прив'язування до мапи.

Третя частина стосується керування виконавчими органами роботів з різною ступеню вільності. Тут основний акцент зроблено на синтезі та аналізі різного роду маніпуляторів, зокрема пряма й зворотна задача кінематики механізму та визначення траєкторії виконавчого органу. Наведені теоретичні основи та приклади реалізації вирішення задач визначення швидкостей і прискорень в елементах маніпуляторів. Окремо розглянуті питання моделювання динаміки механізмів та управління.

Четверта частина присвячена комплексу питань машинного зору. Розглянуті фізичні основи та спектральне представлення світла, його

представлення у вигляді складових червоного, зеленого та синього (RGB), формування зображення, зокрема через оптичну систему, оброблення та трансформування зображення, розпізнавання та виділення його елементів. Велика частина прикладів стосується сільськогосподарської тематики, як наприклад на рис. 1.26. Також розглянуті питання використання кількох зображень з різних точок зору, що дозволяє формувати стереозображення.

Остання, п'ята частина присвячена розгляду питань управління роботами на основі візуальних даних для випадків розташування камери на рухомому виконавчому органі (рис.1.27,а) та стаціонарної камери (рис.1.27,в).

Даний підручник може розглядатись як один з основних для розробників автономних мобільних роботів оснащених системами технічного зору для потреб сільського господарства.

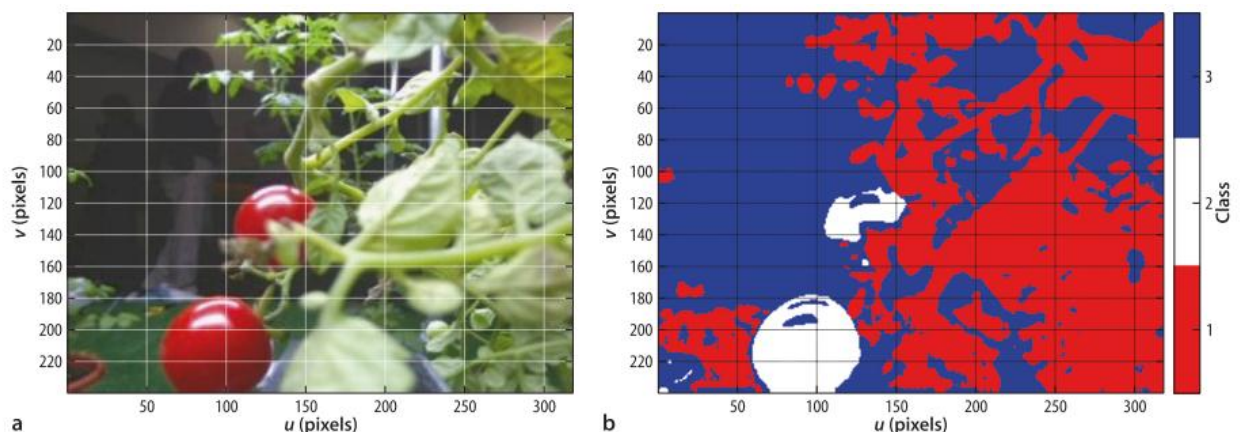


Рисунок 1.26 - Приклад садового зображення [23]

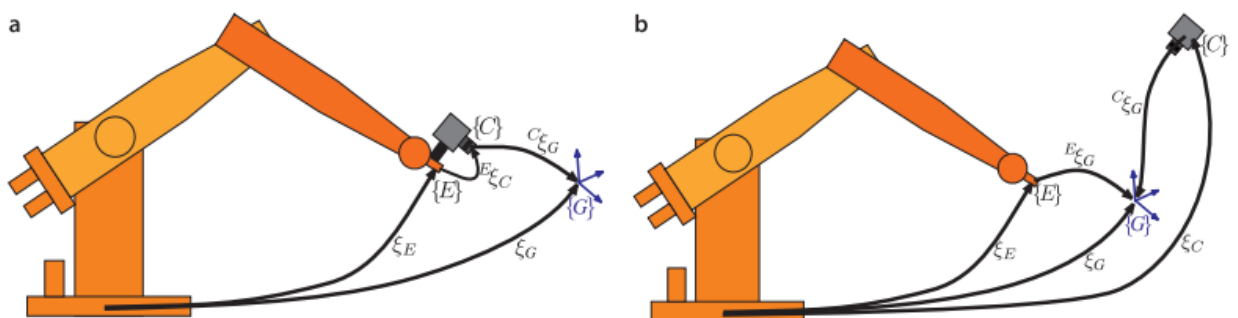


Рисунок 1.27 - Системи координат [23]:

виконавчий орган {E}, камера {C}, ціль {G}:

а - конфігурація із замкнутим циклом; б - конфігурація із відкритим циклом

Значна кількість прикладів і результатів практичного застосування машинного зору в різних сферах наведена в колективній монографії [24]. Найближчими до тематики дослідження даної дисертації є розділи 9-11, у яких розглянуті питання визначення параметрів і стану біомаси.

У статті [25] як результат практичного тестування робота AgBot II наведено опис системи класифікації бур'янів на основі візуальних даних для забезпечення автономної точної прополки без попереднього знання видів бур'янів (рис. 1.28). Продemonстровано реалізацію триетапного конвеєра, який складається з початкового спостереження за полем, автономної обробки та маркування даних, а також точної прополки. На основі польових випробувань продемонстровано, що запропонована система може маркувати в 12,3 і 23,3 рази менше зразків, ніж традиційне повне маркування даних, одночасно досягаючи 78% і 97% точності класифікації для кожного відповідного набору даних, без будь-яких попередніх знань про види бур'янів перед розгортанням.

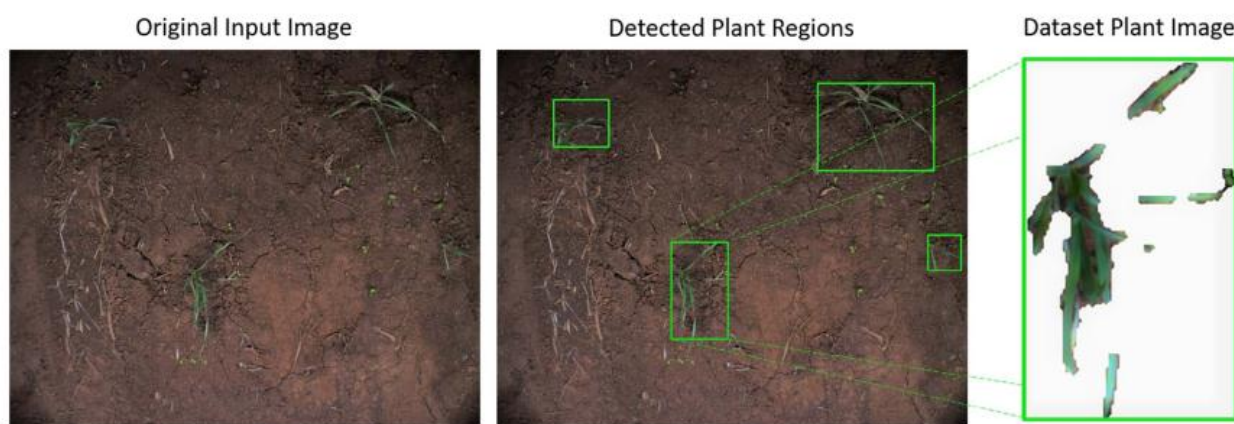


Рисунок 1.28 - Приклад генерації набору даних [25].

У статті [26] на базі робота BoniRob для розрізнення посівів/бур'янів використовується піксельна класифікація даних датчиків MWLP. Класифікація заснована на спектральних ознаках для поділу ґрунту/біомаси та на 3D ознаках поверхні для розрізнення культур/бур'янів. У поєднанні з

агрегацією сітки система надає готові до використання вхідні дані для приводів прополки. Таким чином, скасовуються основні проблеми надійності для польового застосування автоматичної класифікації рослин (перекриття, сегментація). Крім того, завдяки класифікації на основі пікселів можлива швидка та легка адаптація системи до нових польових ситуацій за допомогою In-Field-Labeling. Це дозволяє непідготовленим користувачам тренувати неромережу на своїх даних. Нарешті, позначення невеликих наборів даних у величезній кількості польових ситуацій описаним способом відкриє двері для довгострокових (або довічних) стратегій машинного навчання.

Проект ASETA розробляє теорію та методи роботизованих сільськогосподарських систем. В ASETA безпілотні літальні апарати та безпілотні наземні транспортні засоби використовуються для автоматизації завдання виявлення та лікування бур'янів на полях цукрових буряків. Стаття [27] описує працюючу автоматичну роботизовану систему прополки разом із впровадженими системами комп'ютерного зору та розпізнавання.

Таким чином можна констатувати, що останніми роками ведуться інтенсивні наукові дослідження у сфері застосування машинного зору і розпізнавання бур'янів. результати дозволяють говорити про можливості доволі ефективного їх застосування вже на даний час, а в майбутньому вони будуть покращені.

1.3.3. Задачі управління виконавчими пристроями роботів

Зменшення витрат гербіцидів при знищенні бур'янів можливе шляхом точкового вприскування. Для цього на першому етапі слід за результатами динамічного моніторингу виявити розташування рослин на ґрунті, а далі виявити бур'яни. Далі через систему зворотного зв'язку в момент проходження форсунок над бур'янами слід дати команду дозованого сприскування гербіцидів. Така система представлена в роботі [28], За допомогою машинного зору він відокремлює засіяні овочеві культури від бур'янів. Кожен бур'ян у рядку обробляють індивідуальними крапельками гербіциду, не зачіпаючи

урожай. Це призводить до значного скорочення використання гербіцидів. Кожні 200 мс модуль Blythii фіксує зображення, сегментує та класифікує зображення для створення карти розпилення. Це передається на контролер розпилення, який оцінює його рух і збуджує електромагнітні клапани відповідно до карти розпилення (рис. 1.29). Обприскування рослин можливе й у вертикальній площині для завдань, які цього потребують [29].

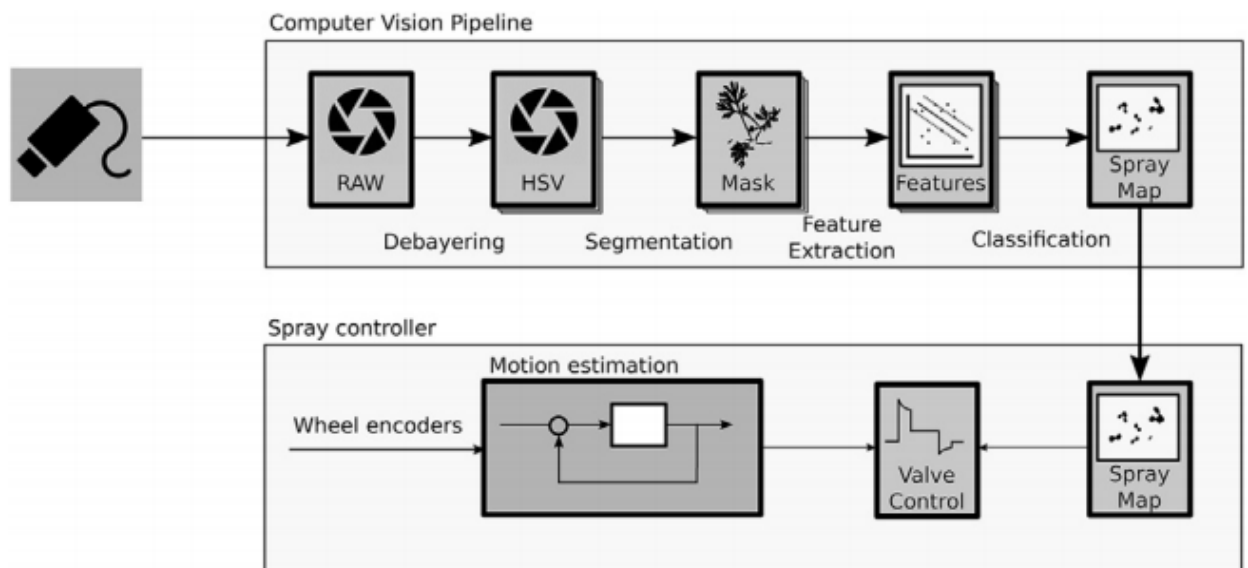


Рисунок 1.29 - Взаємодія системи машинного зору та контролеру вприскування гербіцидів [28]

У вирішенні завдань моделювання динаміки складових елементів робота у середовищі MATHLAB буде корисною монографія [30].

1.4. Комплектуючі елементи та можливості їх застосування для сільськогосподарських роботів

Основою забезпечення рухомості автономного робота-трактора є електроприводи. Для випадку підбору параметрів електродвигуна з урахуванням необхідних задач управління тим стане в нагоді навчальний посібник [31].

Автономність робота трактора забезпечуватимуть мобільні джерела енергії, такі як сонячні панелі та акумулятори. Їх сукупні параметри повинні

забезпечити потрібну потужність та запас автономності як по часу роботи, так і по дистанції, яку повинен проходити робот. У статті [6] наведено можливості конфігурація інтегрованих систем зарядки з використанням сонячних панелей (рис. 1.30) та еволюцію розвитку літій-іонних батарей за останні 50 років (рис. 1.31).

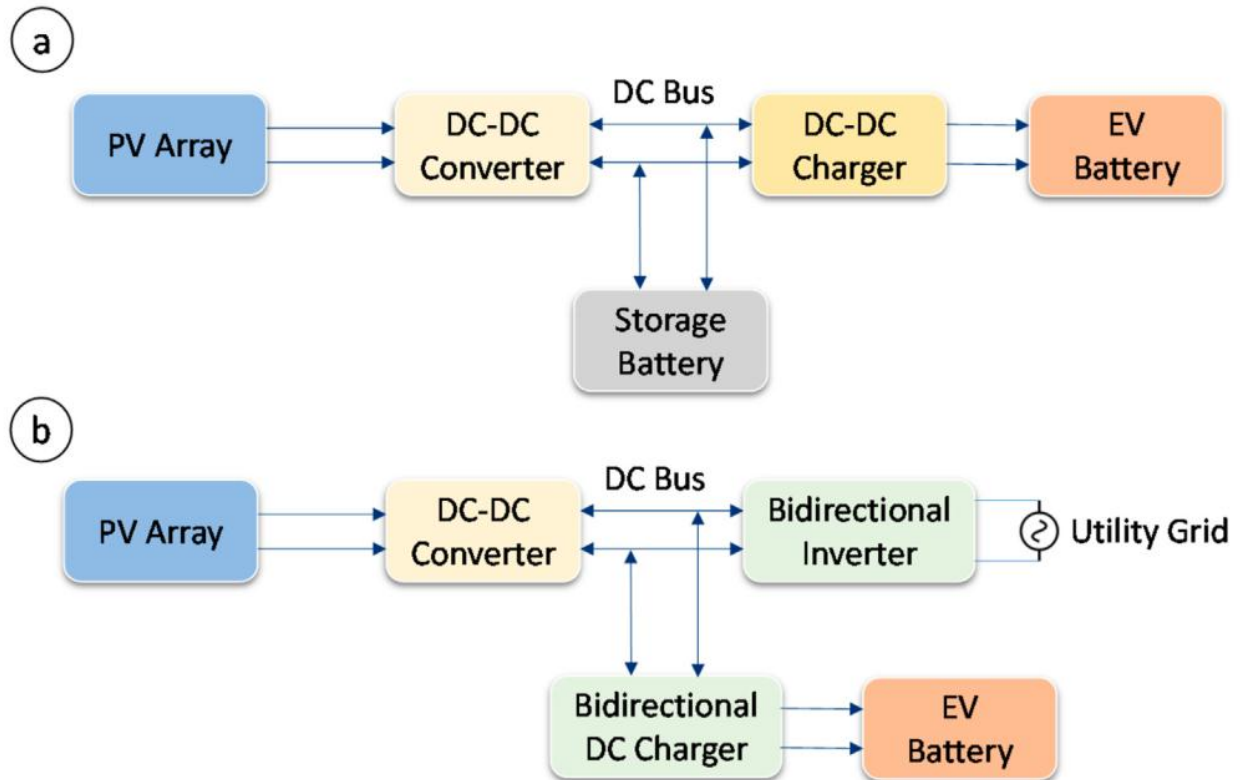


Рисунок 1.30 - Позабортна конфігурація інтегрованих систем зарядки з використанням сонячних панелей [6]:

а) конфігурація поза мережею, б) конфігурація в мережі

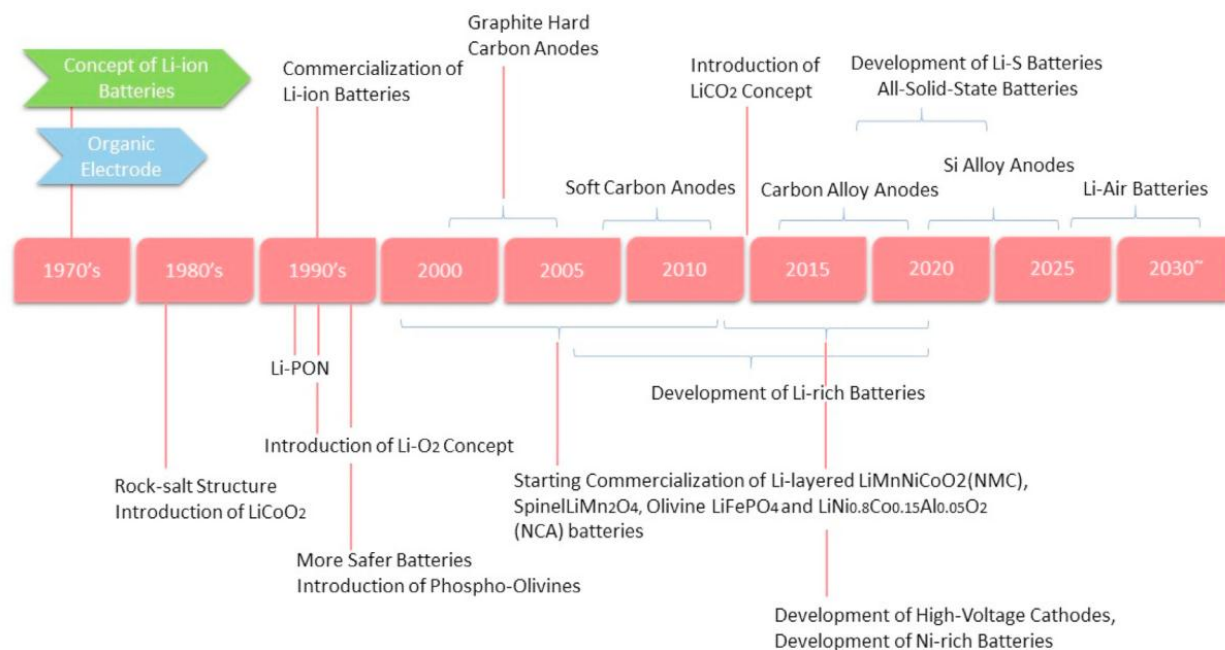


Рисунок 1.31 - Еволюція та прогрес літій-іонних акумуляторів [6]

В статті [3] наведено узагальнення можливості застосування різних камер (див. табл. 1.4).

Таблиця 1.4 - Датчики обробки зображень, що використовуються в точному сільському господарстві [3]

Сенсор	Можливості визначити	Переваги	Недоліки
Камера видимого спектру (RGB)	Колір, Розмір, Форму, Контур, Поверхня	- Легко визначити при візуальному огляді - Дешево і невеликого розміру - Невелике навантаження для БПЛА - Висока роздільна здатність - Простота використання	- Лише три канали - Неможливо виявити багато функцій - Неможливо знайти порушення в даних - Потрібна ще більш висока роздільна здатність
Мультиспектральна камера	Зовнішній вигляд і геометрію, NVDI (Normalized Difference Vegetation Index)	- Зображення з більшою кількістю діапазонів спектру, ніж (RGB) - Більше інформації, ніж цифрове зображення RGB - Захоплює спектральні смуги поблизу інфрачервоного випромінювання (NIR) - Надає інформацію про коефіцієнт відбиття видимого світла та індекси	- Потрібен комп'ютер - Важчий і дорожчий - Отримані зображення залежать від кліматичних умов - Обмеження роздільної здатності зображення - Висота, на якій може літати БПЛА, і отримання зображення

		рослинності	
Гіпер-спектральна камера	Індекси RVI та NDVI	- Створює зображення за допомогою тисяч вузьких смуг - Багатовимірні набори даних - Може виявити більше функцій, ніж мультиспектральна камера	- Потрібні швидкі комп'ютери - Більш дорога і складна у використанні. - Потребує великої ємності для зберігання даних - Велика вага
Тепловізійна камера	Індекс вмісту води (Crop Water Stress Index - CWSI)	- Мають більшу спектральну та просторову роздільну здатність. - Швидке визначення температури поверхні, - Малий розмір - Низька вага	- Теплові зображення залежать від погодних умов - Точність системи залежить від роздільної здатності камери. - Модель, яка оцінює стан води рослин, залежить від багатьох змінних

В якості обприскувачів можуть використовуватись широке коло форсунок - пристрої з одним або декількома отворами для розпилення рідини, яка надходить в нього під тиском. Рідина може бути поживною, - тоді це добриво, нейтральною, - тоді це зволоження, або руйнівною, - тоді це отрута (гербіцид). Існує декілька типів розпилювальних форсунок: струменеві, вихрові й з обертовим розпилювачем. В нашому проєкті планується застосовувати струменеві форсунки з електронним керуванням для забезпечення дозованості та своєчасності вприскування рідини. Для створення прототипу можливе використання автомобільних форсунок для омивання скла разом із насосом.

Для випалювання бур'яну можна використовувати лазери, потужність яких дозволяє це зробити ефективно. Як варіант - застосування лазерів, що використовуються у різанні матеріалів, наприклад [32]. В такому випадку джерелом лазерного випромінювання слугує світлодіод потужністю від 5 Вт з довжиною хвилі 450 нм (синій лазер), який живиться електричним струмом 12 В, має оптичну систему фокусування та вбудовану систему охолодження. Для механічного знищення бур'янів можна використовувати різноманітні пристрої

від примітивних тяпок до спеціалізованих по відношенню до певних бур'янів знищувачів.

1.5. Концепція проєкту “FLIBot Systems”

Сільськогосподарський робот FLIBot 2.0 ми розглядаємо як основний виконавчий елемент загальної системи “FLIBot Systems” автоматизованої боротьби з бур'янами, яка складається (рис. 1.32) з: автотрейлера-матки (1); системи спостереження на базі аеродронів (2); системи точного позиціонування з використанням GPS та локальних радіомаяків (3), що встановлюються на час роботи; рою автономних сільськогосподарських роботів FLIBot 2.0 (4).

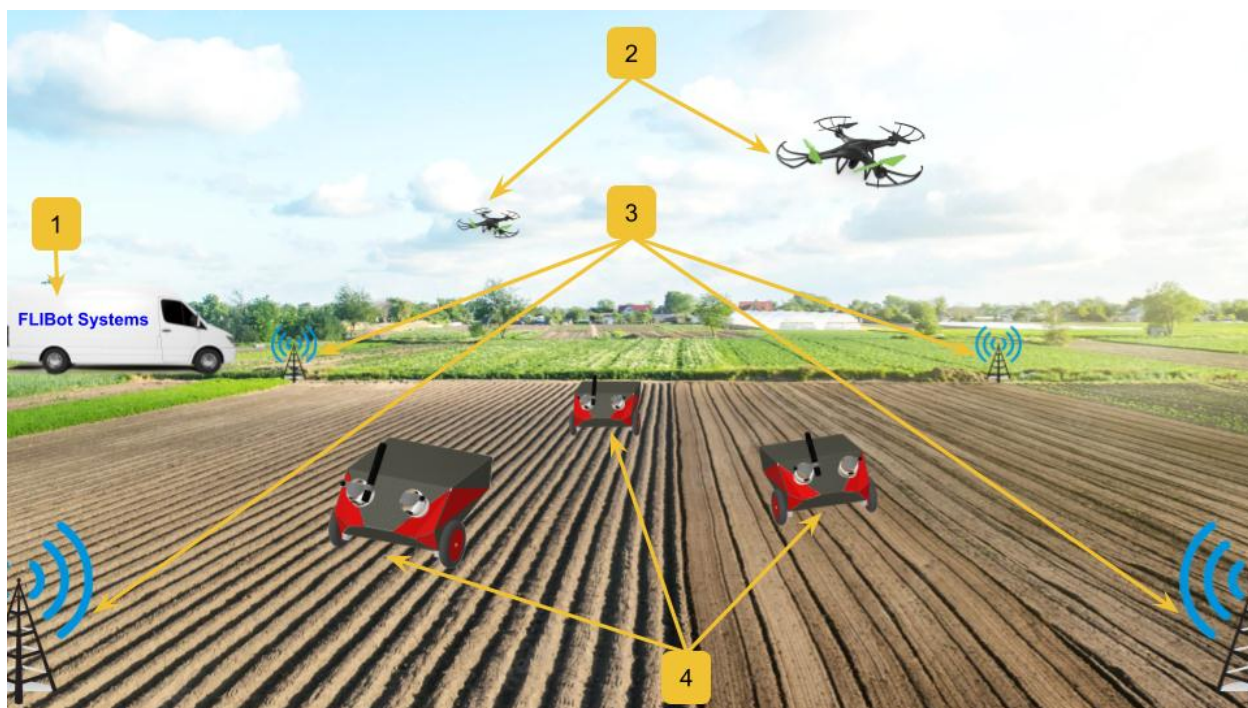


Рисунок 1.32 - Концепція перспективної автономної системи боротьби з бур'янами з використанням рою роботів FLIBot 2.0:

- 1 - автотрейлер-матка; 2 - аеродрони; 3 - локальні GPS-радіомаяки;
4 - рой автономних сільськогосподарських роботів FLIBot 2.0

Автотрейлер-матка містить запаси енергії, запаси хімічних рідин, є засобом доставки всіх компонентів до ділянки і центром загального керування.

Після висування автотрейлера-матки на задану позицію і фіксації на ній, спочатку рой аеродронів здійснює виконання завдань аеророзвідки над ділянкою для виявлення й диференціювання фрагментів поля з точки зору їх ураженості. Також аеродрони є засобами доставки й установки тимчасових радіомаяків, які забезпечуватимуть вирішення завдань точного позиціонування всіх елементів системи в системі координат поля. Після оцінювання стану ділянки на центральному сервері автотрейлера-матки визначається кількісна потреба і розподіл індивідуальних завдань для рою роботів FLIBot 2.0.

Типове завдання для одиночного робота виглядатиме так:

- висунутись у точку (координати);
- розпочати рух вздовж рядка спостерігаючи через камери стан посівів і транслуючи відеопотік на центральний сервер;
- при виявленні бур'яну та отриманні від центрального серверу його координат і способу знищення - активізувати функцію зниження хімічним або енергетичним способом;
- продовжити рух до моменту завершення завдання або вичерпання резерву енергії/гербіцидів;
- повернутись на базу (автотрейлер-матку) для поповнення запасів енергії або гербіцидів та виконання наступного завдання, або ж завершити роботу.

Виходячи з цього формуватимуться підходи до створення автономного робота FLIBot 2.0, а саме:

- наявність системи позиціонування в системі координат, сформованої автотрейлером-маткою (для забезпечення виходу до точки старту та повернення на базу);
- наявність системи відеомоніторингу з високошвидкісним каналом передачі потокового відео на сервер;

- можливість автономного розпізнавання рядка і забезпечення автономного руху вздовж рядка;
- наявність системи наведення засобів знищення бур'янів на точку, координати якої отримано сервером.

Зазначена концепція не вимагає при створення робота передбачити великий запас ходу (ємність акумуляторів), адже можна обмежитись тривалістю автономної роботи 30-40 хв., після чого робот може повернутись на базу для швидкої заміни виснаженої батареї на заряджену. Це саме стосується й запасів хімічної рідини, яких повинно вистачити на цей саме час автономної роботи і які швидко можуть бути поповнені.

Висновки по розділу

Таким чином, аналіз сучасного стану роботизації завдань боротьби з бур'янами дозволив виявити перспективні технічні рішення й концепції та на основі цього сформулювати власне бачення перспективного проєкту автономного сільськогосподарського робота FLIBot 2.0, суть якого буде розкрито й описано в наступних розділах.

РОЗДІЛ 2. КОНЦЕПЦІЯ ТА ДИЗАЙН СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО РОБОТА FLIBOT 2.0

Для пошуку технічного рішення реалізації власного проєкту автономного сільськогосподарського робота для боротьби з бур'янами для функціоналу, визначеного в розд. 1.5 знайти привабливий зовні образ, який би відрізняв його від аналогічних роботів. Далі слід чітко визначитись із його компонентами з розподілом їх на такі, як слід купити і які слід виготовити. перевагу слід надати готовим компонентам. Ще далі слід визначити перелік інженерних завдань, які необхідно вирішити для забезпечення функціонування робота як системи. Цим питанням присвячений даний розділ.

2.1. Пошукове ескізування концептуального рішення та дизайну

При виборі продукції споживачі в першу чергу звертають увагу на зовнішній вигляд, а вже потім ознайомлюються з технічними характеристиками. Крім того, доведено, що інколи люди навіть схиляються до красивішого варіанту навіть якщо він поступається своїми параметрами продукту менш привабливого вигляду. Для приваблення потенційних покупців необхідно створити привабливий і водночас функціональний дизайн платформи автономного сільськогосподарського робота FLIBot 2.0. Важливим аспектом є й ергономіка техніки. Тому за мету було поставлено створення такого дизайну платформи, який би виконував свої функції але й водночас “кидався в очі” потенційним покупцям.

Першим варіантом ескізу став робот, схожий на легковий автомобіль без кабіни. Він мав декілька варіацій. Перша його варіація передбачала встановлення однієї камери для знаходження цілей та окреме розташування лазера та форсунки. Це рішення дозволяє обробляти декілька рослин одночасно двома різними методами. Була обрана більш проста форма для легшого монтажу та демонтажу баків, батарей на інших складових робота, які

б з часом потребували обслуговування. Друга варіація даної пошукового ескізування (рис. 2.1) передбачала встановлення двох камер, на яких були встановлені лазери та форсунки. Це рішення передбачало ряд позитивних якостей. Зокрема, встановлення двох камер дає змогу збільшити бінокулярний зір, більший кут огляду, визначати відстань, проглядати сліпі до цього зони, на яких також могли б рости бур'яни. Завдяки двом камерам з'являється оглядати один рядок насаджень відразу з трьох сторін.

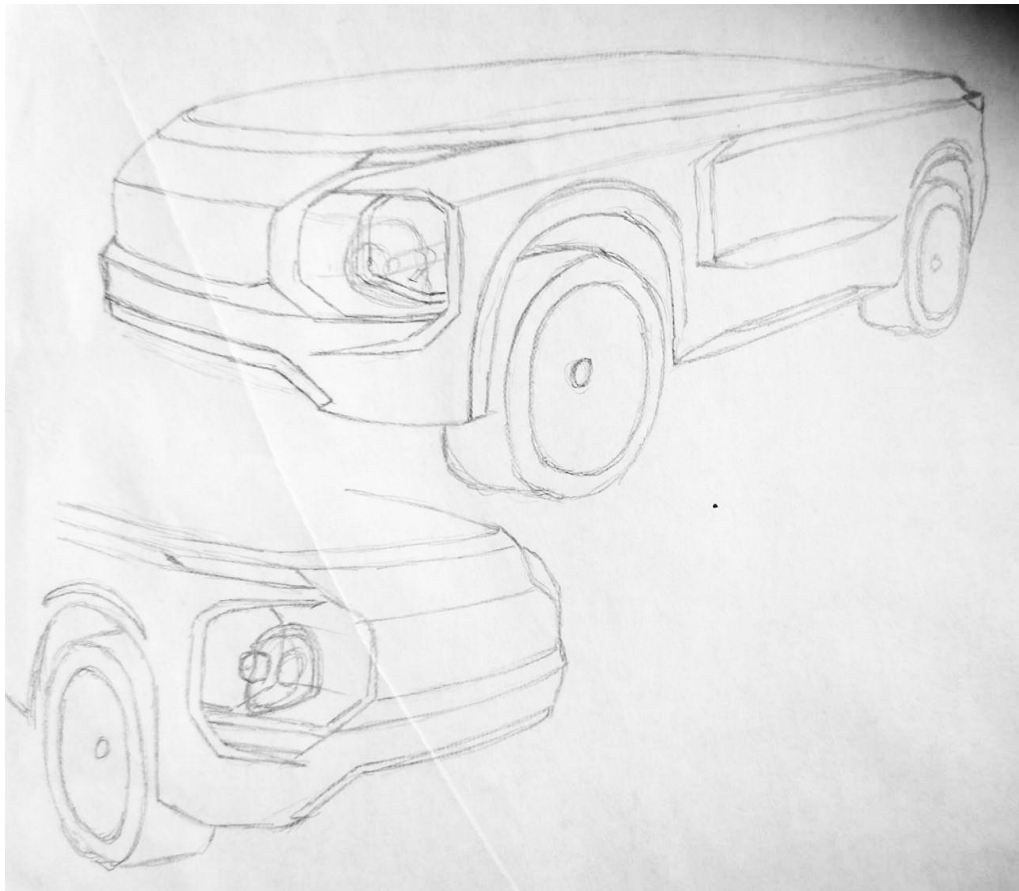


Рисунок 2.1 - Перший варіант ескізу FLIBot 2.0

Аналіз даного варіанту виявив кілька недоліків, зокрема: красива форма колісних арок створювала передумови набивання вологим ґрунтом під час негоди; застосування автомобільної системи керування обмежує маневреність робота; деякі елементи, наприклад бампери, мають виключно декоративний характер і не несуть функціонального навантаження. Тому постало питання пошуку наступного варіанту.

Другий варіант (рис. 2.2) схожий на дизайн робота FLIBot 1.0. Він як і FLIBot 1.0 оснащений чотирма незалежними привідними колесами, які дозволяють досягти високої маневреності під час роботи. Представлена платформа оснащена двома камерами з можливістю встановлення на них елементів впливу, таких як форсунка або лазер. В ході аналізу було знайдено декілька наступних недоліків:

- передня частина робота має загострену форму. З одного боку це виглядає гарно, з іншого боку це нераціональне використання простору, тому вирішено замінити її на більш рівну.
- Використання чотирьох незалежних коліс є чудовим рішенням, проте потребує значних вкладень та ускладнює систему керування роботом, тому було вирішено замінити її на систему з двома передніми привідними колесами на одному поворотним позаду платформи.

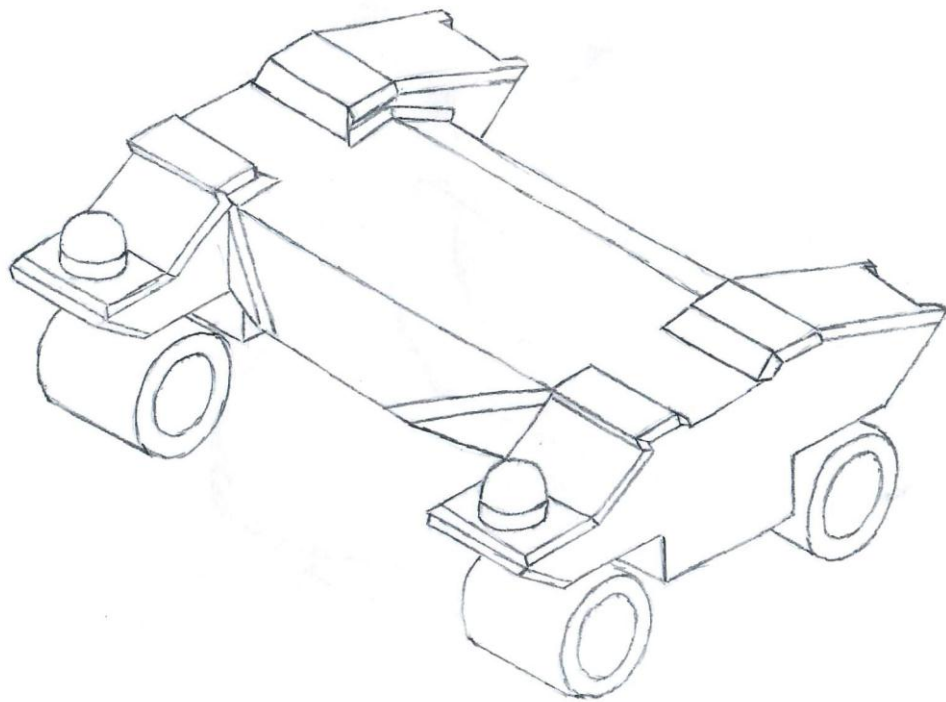


Рисунок 2.2 - Другий варіант ескізу FLIBot 2.0

Проаналізувавши перші два прототипи було вирішено створити третій зразок робота, в якому було враховано всі недоліки попередніх варіантів. Фінальний варіант дизайну робота-трактора для оброблення рослин FLIBot 2.0

(рис. 2.3) має триколісне шасі, два передніх колеса якої є привідними і керованими заднє спарене (для зменшення тиску на землю) колесо виконує функції опори і є самовстановлюючим. Робот оснащений двома камерами, на які встановлено по одному лазеру та по одній форсунці для випалювання та обприскування рослин відповідно. За рахунок розподілення всіх систем забезпечення пересування робота по його бортам вдалося максимально збільшити просвіт з поверхнею по якій він буде рухатись, що ви цілком вирішує проблему заминання рослин в процесі роботи. Встановлення систем обприскування на кожен з камер дозволить одночасно як видаляти шкідливі рослини так і удобрювати вирощувані культури, що максимально збільшує ефективність роти робота-трактора. Розташування баків та сонячних батарей в верхній центральній частині платформи дозволило досягнути бажаного балансу розподілення ваги, що позитивно впливає на зниження впливу трактора на ґрунт.

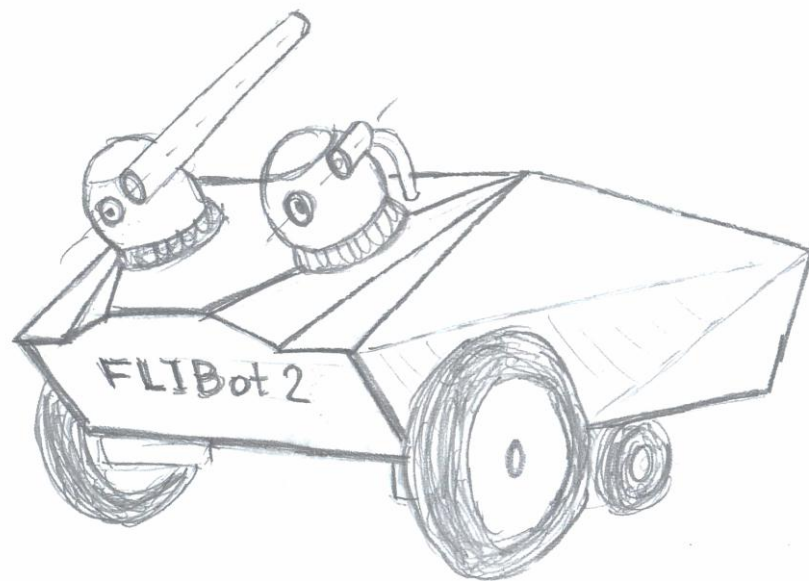


Рисунок 2.3 - Фінальний варіант ескізу FLIBot 2.0

2.2. Визначення складових та загальних параметрів проєкту сільськогосподарського робота для знищення бур'янів

Визначившись з зовнішнім виглядом та концепцією майбутнього робота-трактора для оброблення рослин наступним кроком буде визначення

його складових елементів та загальних параметрів. Перелік і зв'язок окремих підсистем робота наведений на рис. 2.4. На рисунку тонкими лініями показані інформаційні та управлінські зв'язки, з них - пунктирними лініями ті, що реалізуються за бездротовими технологіями, потовщеними лініями показані лінії живлення.

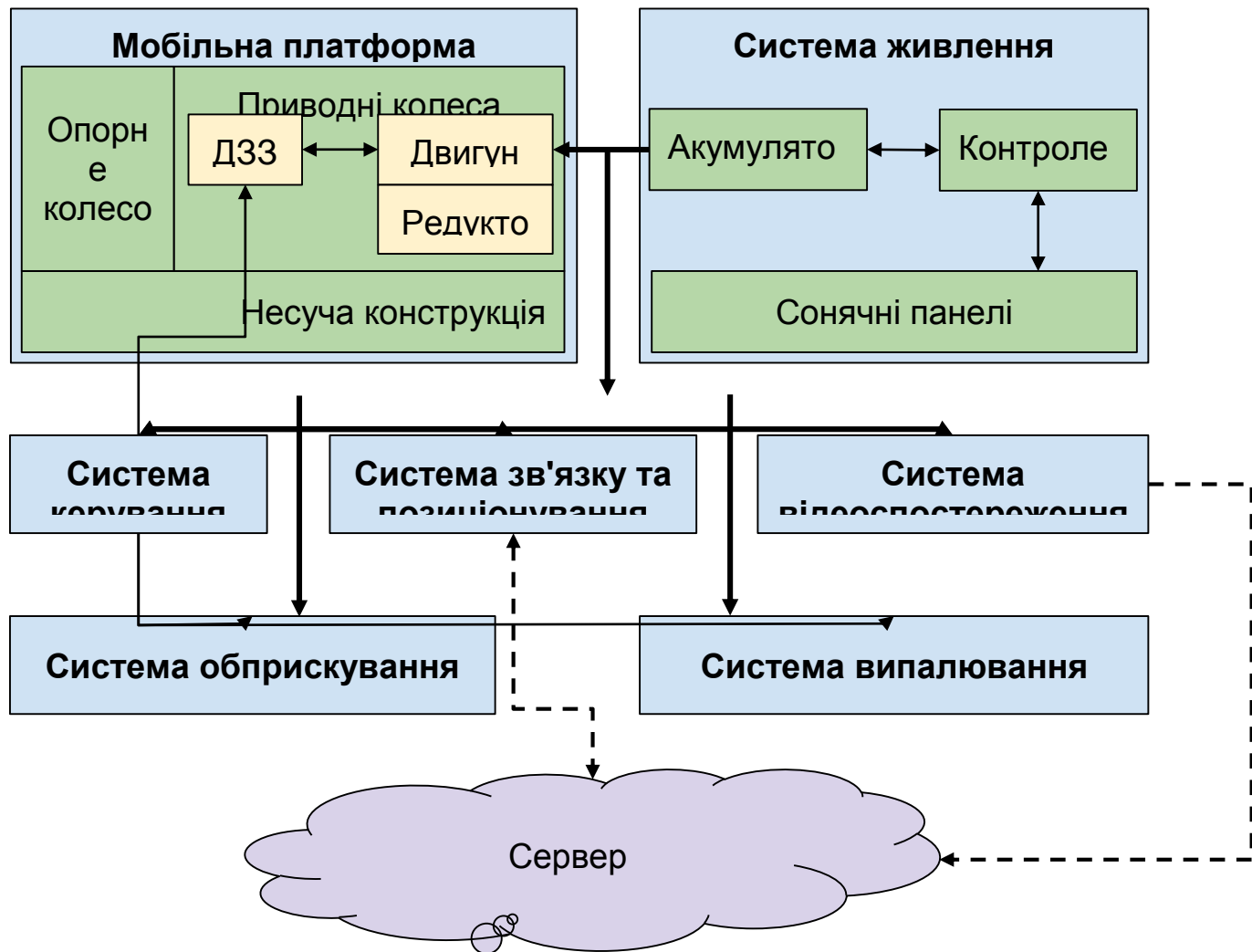


Рисунок 2.4 - Системи робота FLIBot 2.0

Розглянемо ці системи і підсистеми.

1. **Мобільна платформа.** Конструкція, призначена забезпечення пересування робота та кріплення всіх інших елементів системи та надання йому привабливого зовнішнього вигляду. Пересування забезпечується двома привідними колесами та одним опорним колесом. Привідні колеса виконані у вигляді готового блоку, що складається з двигуна постійного струму і

редуктора. На колесі стоїть датчик зворотного зв'язку, який дозволяє визначити кут повороту колеса та його кутову швидкість обертання. Маневреність забезпечується за рахунок різниці повороту приводних коліс.

2. **Система живлення.** Являє собою інтегровану систему “акумулятор - сонячні панелі”, поєднанні системою керування живленням. Джерелом живлення виступають літій-залізо-фосфатні акумулятори. Вони виконують функцію як джерела енергії так і її накопичувача енергії, отриманої від сонячних панелей та від зарядного пристрою. Для автономного функціонування робота було вирішено встановити сонячну батарею, яка б заряджала акумулятори. Таким чином можна суттєво підвищити тривалість автономної роботи робота без збільшення ємності акумулятора.

3. **Система керування.** Забезпечує вирішення завдань руху робота, в т.ч. до заданої точки, вздовж рядка, маневрування, а також керування виконавчими органами і системами, зокрема, відеокамерами з інтегрованими до них системою обприскування та системою випалювання. Керування траєкторією руху робота та видачу вказівок щодо застосування того чи іншого обладнання впливу на рослини буде здійснюватися з контролера Arduino. Вибір саме такого контролера зумовлений співвідношенням ціна-продуктивність. Тобто даний виріб здатний задовольнити всі покладені на нього задачі, при цьому він значно дешевший в порівнянні з іншими аналогами. Сама ж мапа розташування бур'янів формуватиметься на сервері в за результатами даних системи відеоспостереження, а завданням системи управління буде порахувати поточну точку наведення з урахуванням руху робота та способу знищення бур'яну.

4. **Система відеоспостереження.** Являє собою набір двох відеокамер із доступом до Wi-Fi, які реалізують бінокулярний машинний зір, що дозволяє формувати (частково) тривимірну модель спостережуваних об'єктів та визначати відстань до них. Камери встановлені з можливістю повороту в двох площинах, що дає можливість збільшити зону огляду та спрямовувати дві камери на один об'єкт. Для забезпечення наведення та спостереження було

прийнято рішення використовувати ESP модулі з камерами. Дані модулі придатні для програмування та здатні виконувати функцію розпізнавання об'єктів. Рухи відеокамер також використовуються для наведення системи обприскування та системи випалювання. Дана комбінація дозволяє підлаштовувати робот під різні потреби, такі як: удобрення рослин, знищення бур'янів, точний полив, тощо. Все це можна здійснювати замінюючи одну програму на іншу.

5. **Система зв'язку та позиціонування.** Реалізується через наявність датчика GPS-позиціонування, прив'язки до локальних радіоміток та для забезпечення двостороннього зв'язку робота із сервером.

6. **Система обприскування.** Система призначена для точкового і дозованого внесення порції хімічної рідини у точку з відповідною координатою, значення якої надає система керування роботом. Наведення на точку відбуватиметься за рахунок серводвигунів відеокамери, на якій встановлено форсунку. Обприскування рослин буде здійснюватися за допомогою форсунки, яка під тиском буде порційно виприскувати рідину (гербіцид, воду або добриво, в залежності від поставленої задачі). В цьому їй допомагатиме насос високого тиску для обприскувачів, здатний забезпечити тиск близько 9 атм. Форсунки необхідно розташувати в жорсткій зв'язці з камерою наведення. Таким чином, після зведення центру влучання струменем з центром камери можна буде досягти високої точності потрапляння рідини саме туди куди було заплановано.

7. **Система випалювання.** Для забезпечення лазерного випалювання бур'янів було обрано, на ранніх етапах використовувати лазерний модуль, який дозволяє пропалювати молоді пагони рослин. Даний модуль повинен бути виставлений у відповідності з камерою як і форсунка, тобто точки влучення лазерним променем та струменем повинні співпадати з центром наведення камери. На початкових етапах розвитку проєкту обприскувальний на лазерний модулі налаштовані на точну роботу на певній дистанції. В

подальшому можливе встановлення серводвигунів для налаштування центру влучання підлаштовуючись під дистанцію до цілі.

2.3. Загальні інженерні завдання забезпечення функціонування сільськогосподарського робота для знищення бур'янів

2.3.1 Визначення схеми керування роботом

Для виконання задач переміщення і маневрування робота необхідно обрати найкращу колісну формулі й оптимізувати кількість приводів для їх скорочення. На рис. 2.5 представлена схема керування платформою оснащеною чотирма привідними колесами, кожне з яких може повертатися на кут 180° відносно своєї осі. ака схема характерна для роботів HortiBot, BoniRob, FLIBot 1. Така схема забезпечує найвищу маневреність (можна розвернутись на місці або ж різко змінити напрямок руху з нульовим радіусом розвороту). Основним недоліком такого рішення є збільшення кількості проводів (4 для повороту і 4 для руху), підвищена конструктивна складність та підвищені вимоги до системи керування, зокрема по кількості керованих координат.

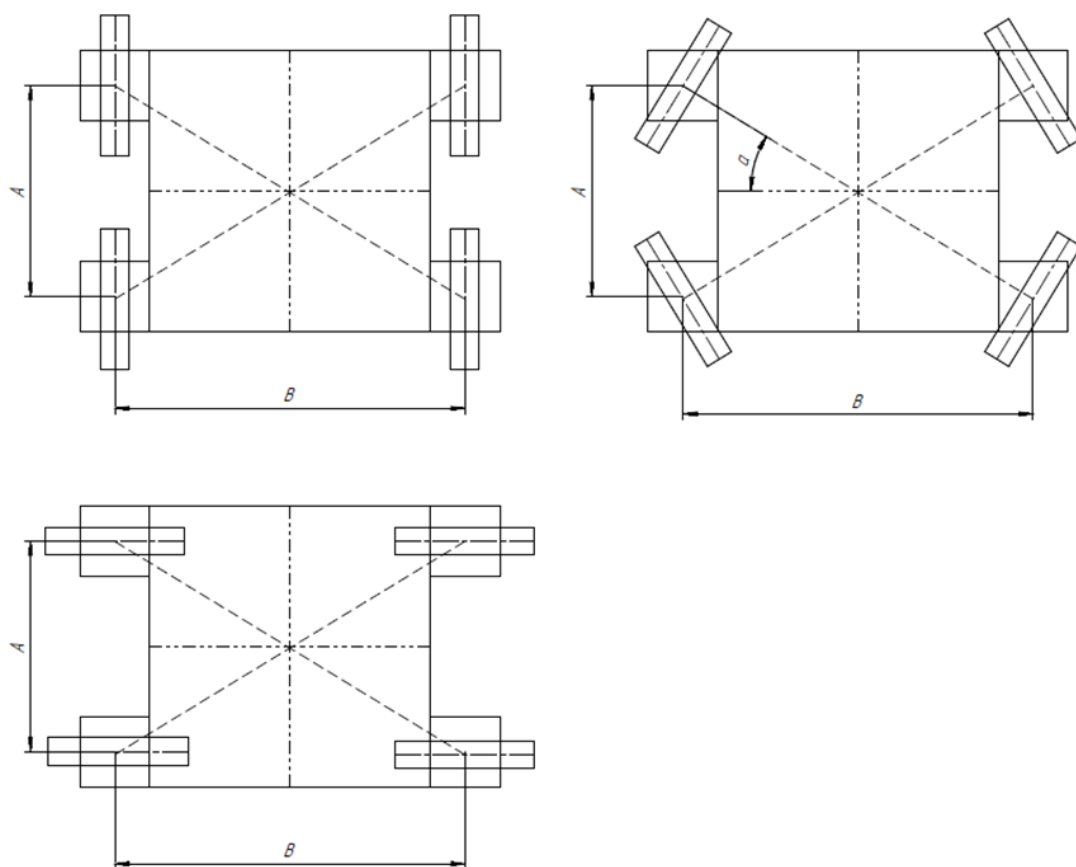


Рисунок 2.5 - Схема керування з 4-ма привідними
та 4-ма поворотними колесами

Наступним, але не менш ефективним варіантом стала пропозиція застосовувати платформу на базі 2-х поворотних та 2-х приводних коліс. Така система притаманна проєктам AgBot II та іншим. Дана схема керування представлена на рис. 2.6. Схема дозволяє скоротити кількість двигунів. Проте це рішення зменшує маневреність робота в порівнянні з попереднім варіантом. Така платформа не зможе здійснити розворот на місці і не може без радіусу розвороту змінити напрямок руху. Спрощуються й вимоги до системи управління таким роботом, проте все одно потребує уваги синхронізація роботи як приводних так і поворотних коліс. Зважаючи на переваги та недоліки двох описаних схем було вирішено реалізувати третю, таку яка б ввібрала в себе кращі сторони попередніх варіантів та мінімізувала негативні моменти.

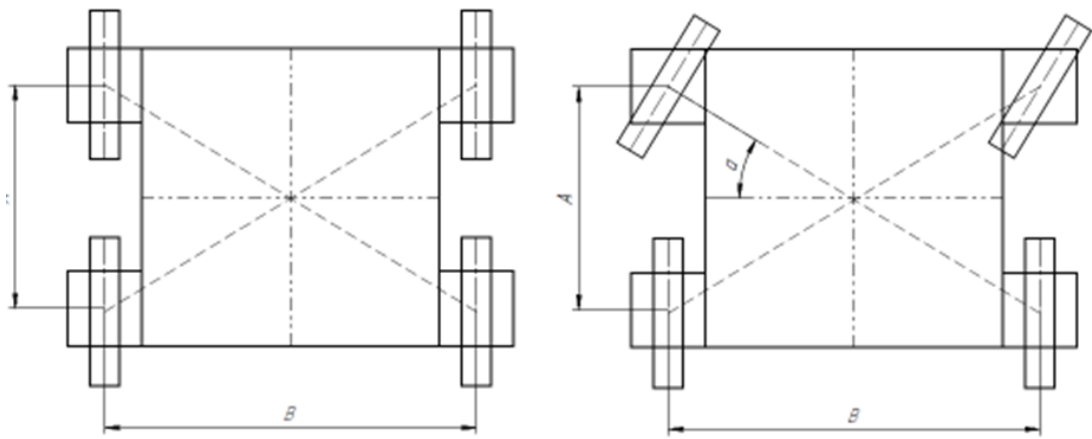


Рисунок 2.6 - Схема керування з 2-ма привідними та 2-ма поворотними колесами

На рисунку 2.7 представлена прийнята у проєкті схема керування автономною платформою FLIBot 2.0. Дана схема представляє собою два приводних керованих колеса, які повертатимуть платформу в той чи інший бік на рахунок різної частоти обертів коліс. Крім того платформа оснащена одним поворотним некерованим колесом, яке слугує опорою для задньої частини робота. Така схема управління присутня й у деяких інших моделях агро роботів. За рахунок використання лише одного поворотного колеса яке може обертатися на 360° стає можливим розворот платформи на місці, навколо вертикальної осі одного з коліс, проте на відміну від схеми 1 при розвороті на місці спостерігається наїзд приводних і опорного колеса на рядки. Таким чином використовується лише два мотора, як на другій схемі і водночас залишається можливим розворот на місці, як у першому варіанті. Така схема висуває мінімальні вимоги до системи управління, одне з яких - приводи руху повинні мати зворотний зв'язок по положенню для забезпечення можливості керування управління. Відповідно спрощується і програмне забезпечення, яке буде контролювати лише режими обертання 2-х приводних коліс, в той час як поворотне колесо слугує лише опорою і не виконує ніяких функцій керування.

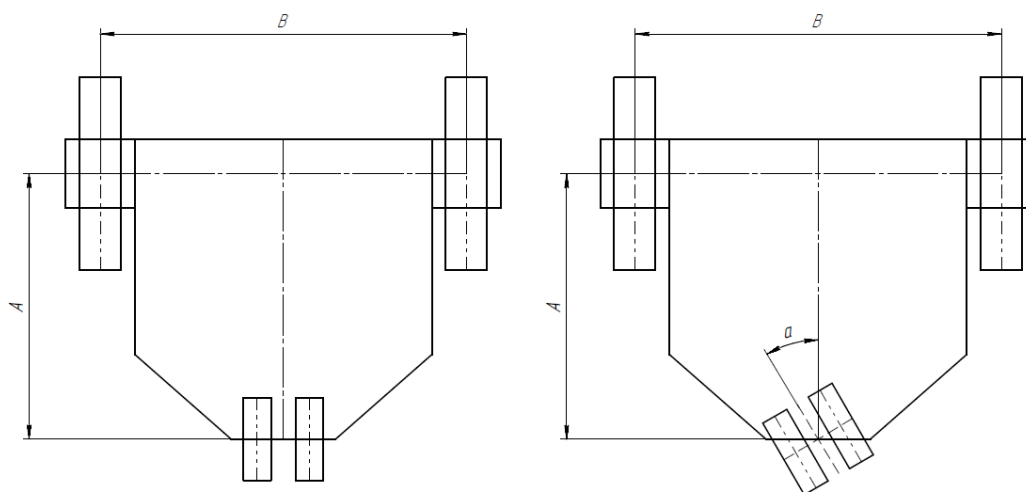


Рисунок 2.7 - Схема керування з 2-ма приводними та одним опорним колесами

Порівняння трьох вище описаних варіантів наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Варіанти реалізації управління рухом

Роботи	Приводних коліс	Поворотних коліс	Переваги	Недоліки
HortiBot, BoniRob, FLIBot 1	4	4	Найвища маневреність	Найвища складність керування та висока вартість
AgBot II	2	2	Помірна складність та вартість	Низька маневреність
FLIBot 2.0	2		Висока маневреність й невисока вартість	Обмеження в маневреності

Як можна бачити, схема обрана для робота FLBot 2.0 має суттєві переваги, а зазначений недолік потребує пояснення, яке наведено далі. На рис. 2.8 представлена схема розвороту робота трактора. Послідовність розвороту є такою: 1 - робот виїжджає за межі поля; 2 - здійснює розворот на 90 градусів; 3 - зміщується на позицію до наступної групи рядків; 4 - розвертається на 90 градусів для захождення на нову позицію. Як видно з рисунку застосування концепції з двома керованими приводними та одним некерованим поворотним

колесами дозволяє однобляти ділянки поля не пропускаючи при цьому рядків, що дозволяє оптимізувати траєкторію його переміщення. Рис. 2.8. визначає розміри зони розвороту роботу при переходженні до групи наступних рядків.

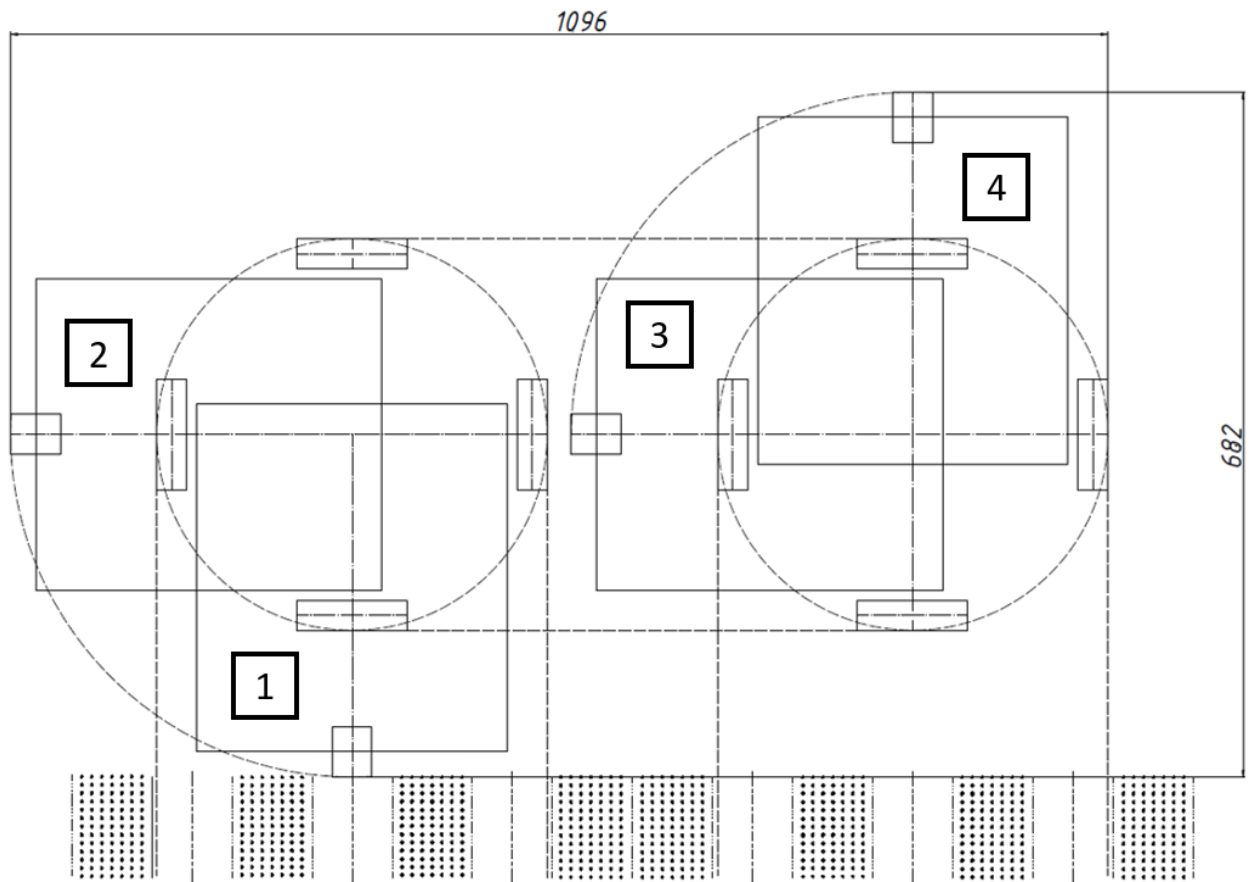


Рисунок 2.8 - Схема розвороту робота

2.3.2 Визначення завдання наведення лазера

Розрахункова схема для наведення лазера на точку, визначену як місце розташування бур'яну наведена на рис. 2.9. Після отримання координат точки розміщення бур'яну, який слід випалити, необхідно сумістити оптичну вісь камери з відповідним об'єком та забезпечити з урахуванням відстані доворот камери на кут, який забезпечить влучання променя лазера у зазначену точку.

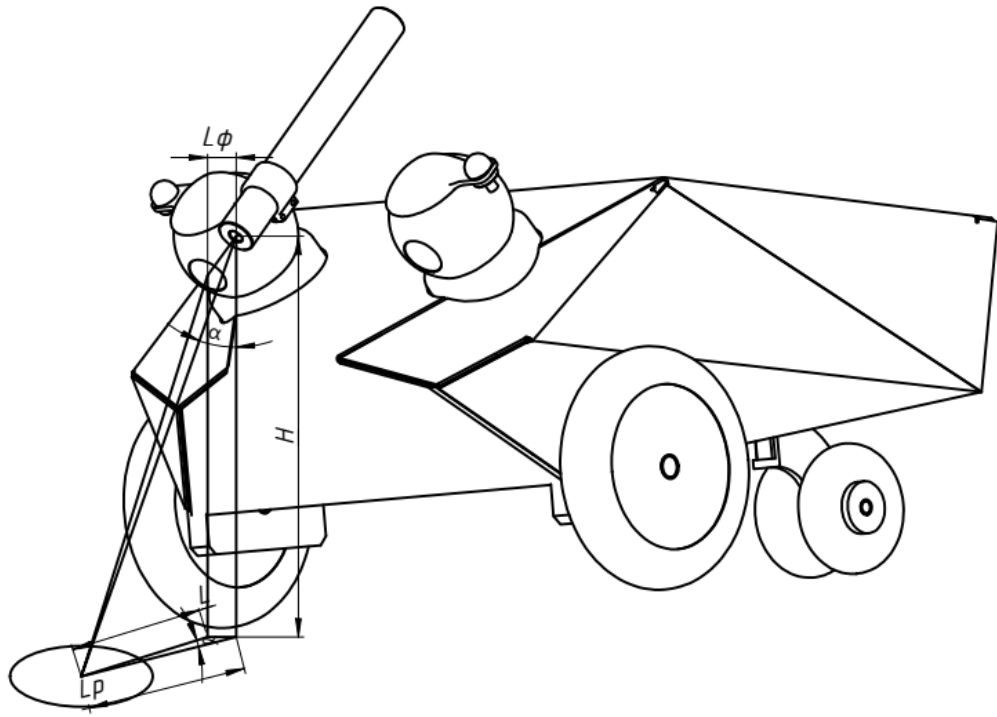


Рисунок 2.9 - Схема наведення лазера на ціль

Система наведення лазера складається з двох елементів: поворотної камери розпізнавання та наведення і лазера для знищення бур'янів. Лазер жорстко зафіксований на камері таким чином щоб розташування випромінювач лазера та об'єктив камери лежали в одній площині. Принцип роботи даної системи полягає наступному: під час руху автономної платформи камера сканує поверхню та шукає на ній бур'яни. В момент коли камера виявила ціль вона автоматично наводиться на неї таким чином, щоб вісь центру об'єктива проходила через об'єкт на який вона наведена. Камера визначає відстань по прямій від неї до рослини. На базі отриманих даних програмне забезпечення робота виконує розрахунок, який допомагає навести вісь лазера на ціль. Знаючи відстань від осі камери до осі лазера та маючи значення відстані до цілі виконується наступний розрахунок:

$$L_p = \sqrt{L_\phi^2 + L^2}, \text{ де} \quad (2.1)$$

L_p - відстань від лазера до цілі

L_{Φ} - фіксована відстань між віссю об'єктива та віссю лазера

L - відстань від об'єктива камери до цілі

Для визначення кута повороту камери для наведення лазера застосовується наступна формула:

$$\gamma = \arcsin(L_{\Phi}/L_p) \quad (2.2)$$

Отримавши значення кута необхідного повороту камери, вона повертається, таким чином наводить вже вісь лазера на ціль, після чого відбувається процес випалювання.

2.3.3 Визначення завдання наведення форсунки

Система обприскування робота FLIBot 2.0 побудована аналогічно системі випалювання, тобто процес зведення осі форсунки з ціллю абсолютно ідентичний попередньому. Проте для точного потрапляння рідини на рослину необхідно врахувати, що рідина випущена з форсунки має певну форму і траєкторію, тому для її знаходження необхідно провести певні розрахунки згідно розрахункової схеми, наведеної на рис. 2.10.

Для того аби розібратися з наведенням форсунки для оприскування необхідно зрозуміти, як себе поводить рідина після вильоту з форсунки. Стрімнь випущений з форсунки може має три частини [36]: компакту, роздріблену та розсіяну. Компактна частина стрмея характеризується циліндричною або близькою до неї формою. Вона зберігає свою цілісність. Роздріблена частина супроводжується її розширенням та подальшим руйнуванням на окремі частинки. В розпиленій частині струмнь складається з окремих крапель.

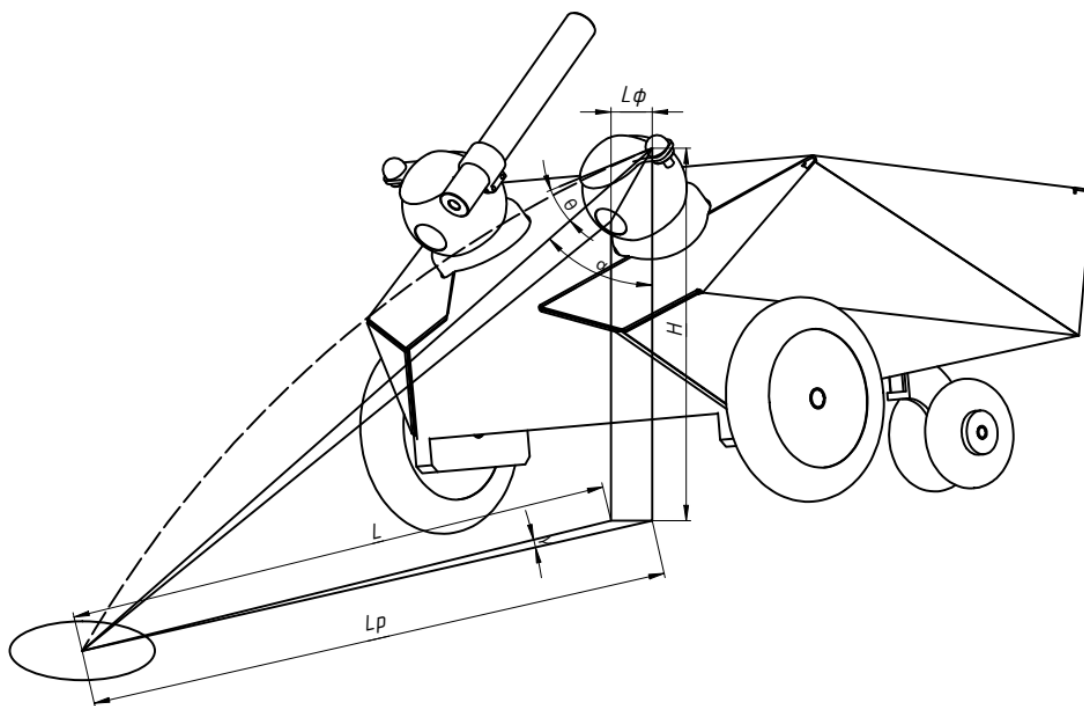


Рисунок 2.10 - Схема наведення системи обприскування

Для здійснення точного точкового обприскування необхідно щоб випущена струя долетіла до цілі в момент коли вона ще компактна. Для цього при розрахунку траєкторії польоту струї необхідно визначити довжину компактного участка струменя. Її можна визначити за наступною формулою:

$$l \approx 0.415 \sqrt[3]{\theta H^2 d_0}, \text{ де} \quad (2.3)$$

d_0 - діаметр вихідного отвору, мм

H - напор перед вихідним отвором, м

θ - кут нахилу осі форсунки до горизонту, град

Для конкретно нашого робота, знаючи значення напора та діаметр форсунки цю формулу можна переписати так:

$$l \approx 0.415 \sqrt[3]{3\theta} \quad (2.4)$$

Для розрахунку траєкторії польоту струменя застосуємо наступні формули:

$$z = x \operatorname{tg} \theta_0 - \frac{x^2}{4H \left(1 - \frac{\lambda x}{d_0 \cos \theta_0}\right) \cos^2 \theta_0}, \text{ де} \quad (2.5)$$

λ - коефіцієнт спротиву під час руху струменя в повітрі.

В свою чергу λ визначається як:

$$\lambda = 0,25 \left(1 - e^{-\frac{H}{1600d_0}}\right) \quad (2.6)$$

$$\lambda = 0,25 \left(1 - e^{-\frac{2}{1600 * 0,00075}}\right) \approx -1,074$$

Дальність польоту струї L дорівнює:

$$L = 0,42H + 1000d_0 \quad (2.7)$$

В нашому випадку дальність польоту струменя L дорівнює:

$$L = 0,42 * 2 + 1000 * 0,00075 = 1,59 \text{ м}$$

В залежності від того, яким чином робот повинен буде обробити ту чи іншу рослину можна буде обирати алгоритм розрахунку для отримання компактної або розпиленої струї. За горизонтальну лінію для розрахунків робот використовувати лінію від форсунки до цілі.

Висновки по розділу

Для реалізації концепції, викладеної в розділі 1.5 виконане пошукове ескізування, яке дозволило обрати привабливе зовні та технічно ефективне по суті технічне рішення платформи у вигляді триколісної платформи, два передніх колеса якої є приводними та мають датчики зворотного зв'язку, що дозволяє реалізувати точне управління із гарними показниками маневреності.

Підібрані схеми та наведено математичні залежності, необхідні для забезпечення функціонування системи наведення на об'єкт, що враховує варіант його знищення - випалювання або обприскування хімічною рідиною.

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО РОБОТА FLIBOT 2.0 ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ

Для проектування й створення дослідного зразка сільськогосподарського робота FLIBot 2.0 згідно з концепцією, викладеної в розд. 1.5 та концептуальними засадами дизайну, викладеними в розд. 2 розроблено проєктну документацію, технологію виготовлення прототипу та виготовлено дослідний зразок.

3.1. Проєкт рухомої автономної платформи

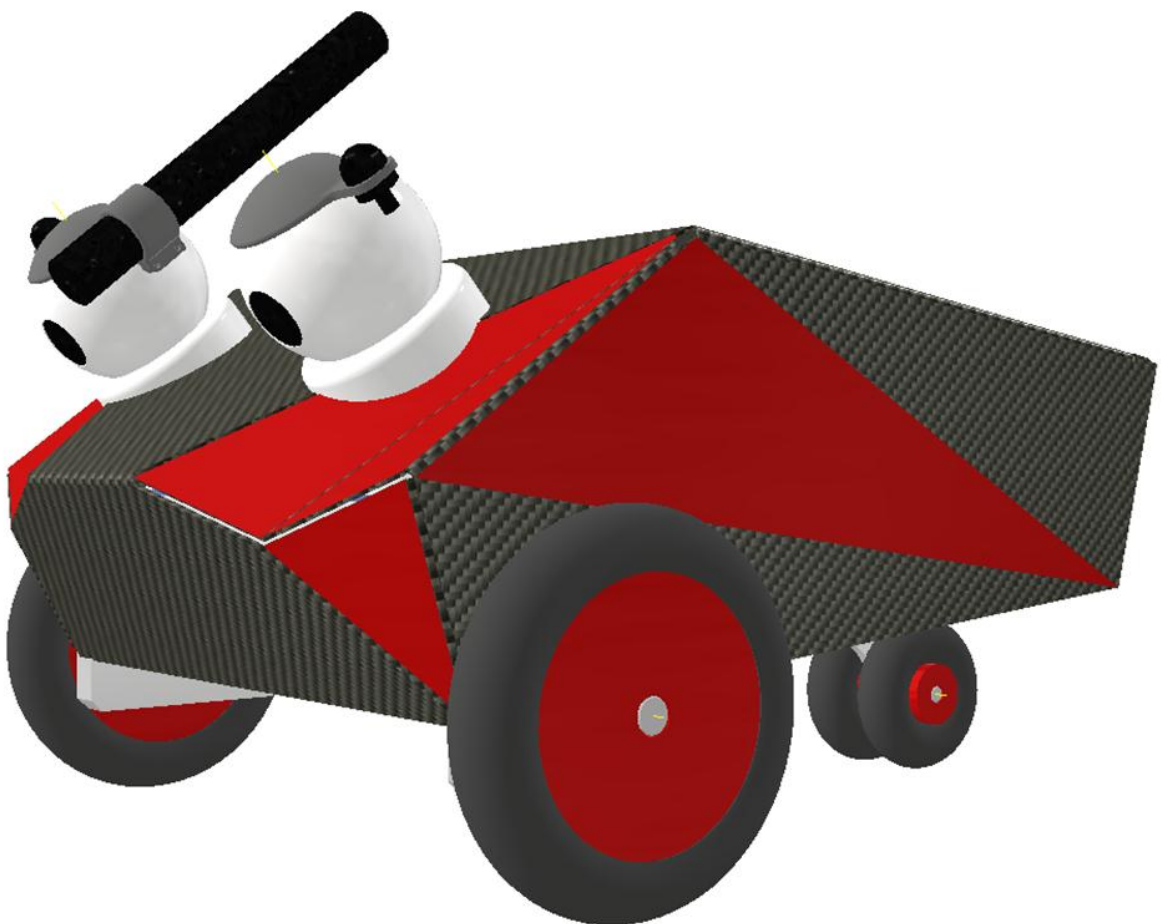


Рисунок 3.1 - 3D-модель автономного робота для знищення бур'янів

Розглянемо конструкції найбільш функціонально насичених деталей.

Конструювання деталі “Обшивка”. Деталь “Обшивка” призначена для надання естетично привабливого вигляду платформи. Головною її функцією є захист складових елементів робота від негативного впливу зовнішнього середовища, зокрема ультрафіолетового випромінювання, вологи та пиляви. Використання даної деталі дозволяє уникнути можливих механічних пошкоджень елементів систем в процесі експлуатації. 3Д-модель деталі “Обшивка” та її розгортка наведені на рис. 3.2.

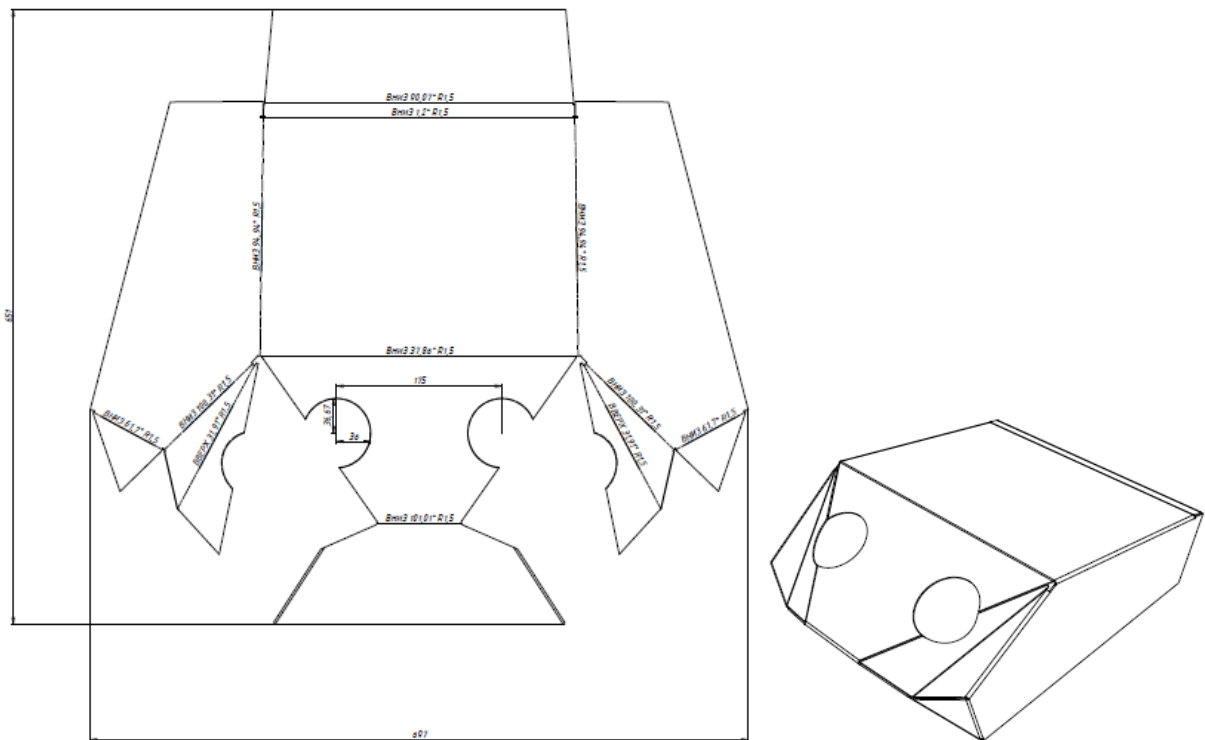


Рисунок 3.2 - деталь “Обшивка”

3.2. Проєкт інтегрованої системи “спостереження-обприскування”

Інтегрована система “Спостереження-обприскування” (рис. 3.3) призначена для виявлення необхідних видів рослин серед усього різноманіття насаджень та оброблення їх хімічною рідиною.

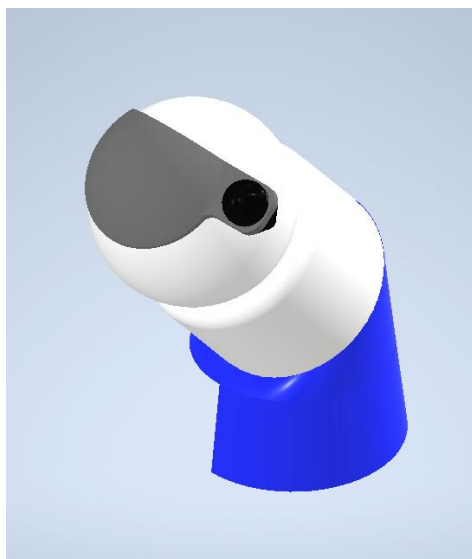


Рисунок 3.3 - 3D модель системи спостереження-обприскування

Конструювання деталі “Кріплення форсунки”. Деталь “Кріплення форсунки” призначена для точного встановлення форсунки на корпус камери. Ескіз деталі та її 3Д-модель наведені на рис. 3.4.

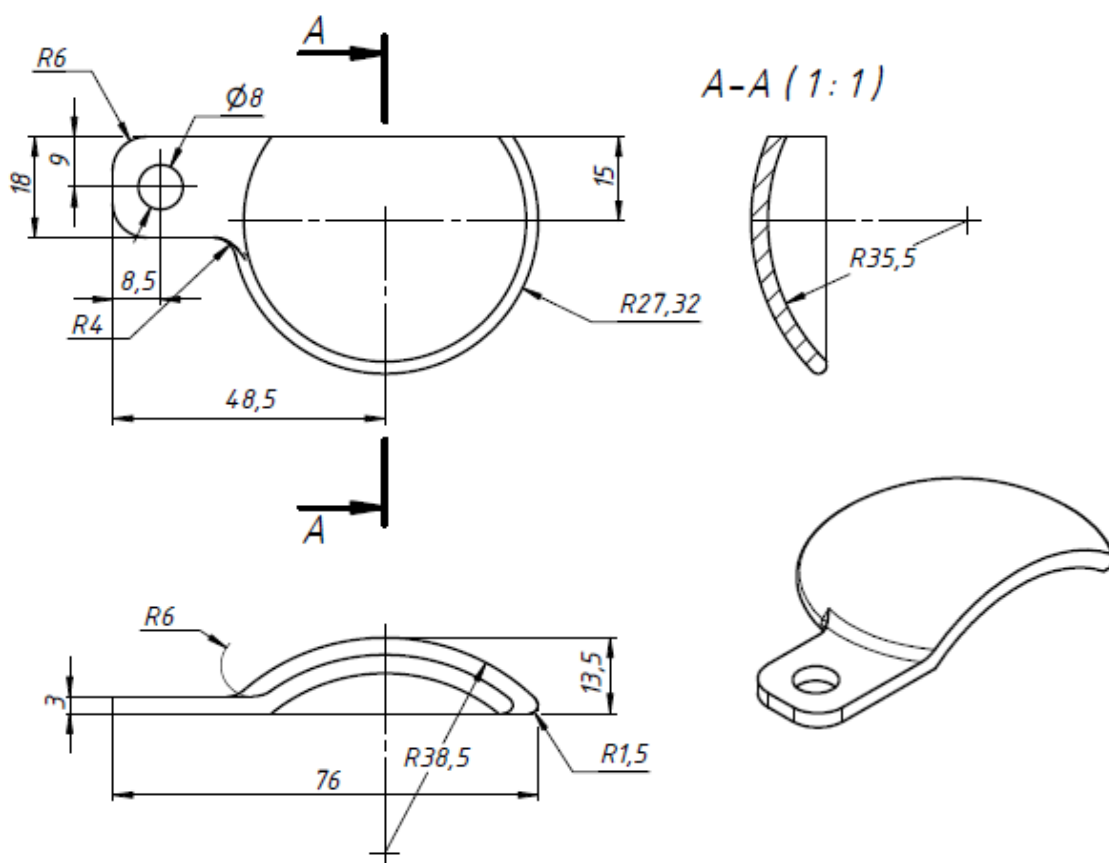


Рисунок 3.4 - Деталь “Кріплення форсунки”

3.3. Проєкт інтегрованої системи “спостереження-випалювання”

Інтегрована система “Спостереження-випалювання” (рис. 3.5) призначена для виявлення необхідних видів рослин серед усього різноманіття насаджень та знищення їх у разі необхідності лазером.

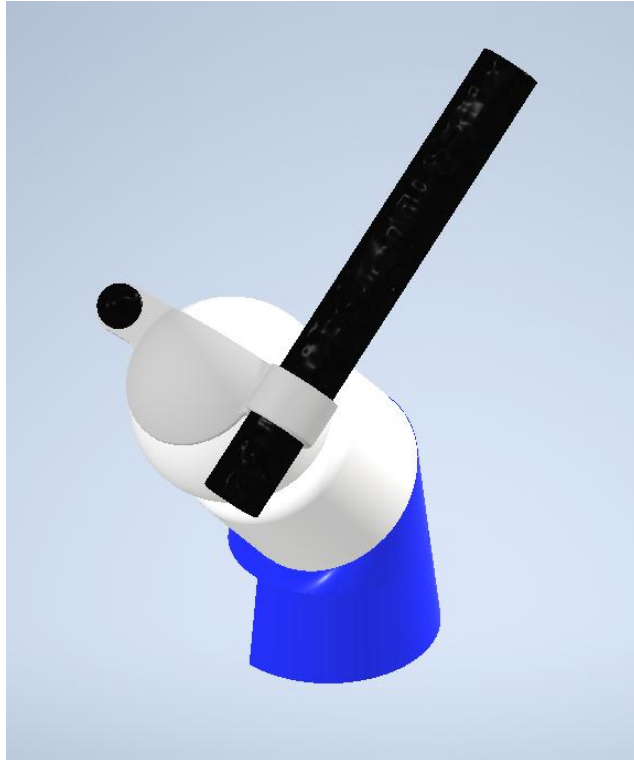


Рисунок 3.5 - 3D модель системи спостереження-випалювання

Конструювання деталі “Кріплення лазера”. Деталь “Кріплення лазера” призначена для точного встановлення лазера на корпус камери. За необхідності на дане кріплення може бути встановлено додаткову форсунку для збільшення варіативності оброблення. Ескіз деталі та наведені на рис. 3.6.

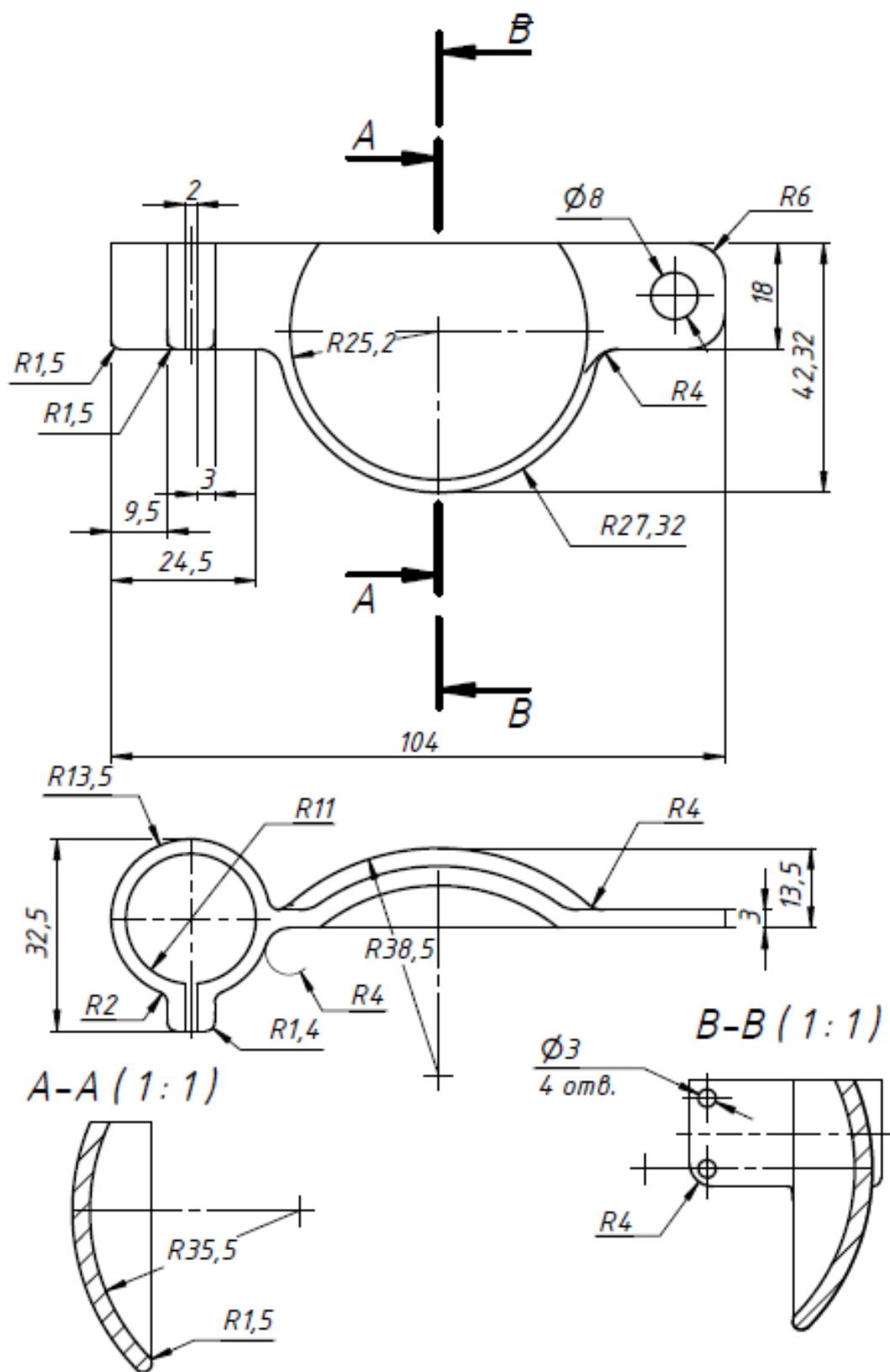


Рисунок 3.6 - деталь “Кріплення лазера”

3.4. Застосування передових технологій для виготовлення деталей прототипу сільськогосподарського робота FLIBot 2.0

Для виготовлення оригінальних деталей макету робота FLIBot 2.0 ми активно застосовувати адитивні технології на базі FabLabKPI (<https://fablab.kpi.ua/>). Технології дозволяють отримати деталі шляхом послідовного накладання шарів матеріалу і мають переваги і недоліки (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Адитивні технології. Переваги і недоліки.

Переваги	Недоліки
● невисока вартість обладнання ● маловідходність виробництва ● можливість створювати деталі будь-якої форми ● низька собівартість продукції	● розмір деталей обмежений розміром робочої зони ● невеликий вибір матеріалів придатних для 3D друку ● утворені поверхні деталей часто потребують додаткової обробки

Застосування адитивної технології для виготовлення деталі “Платформа камери”.

На рис. 3.7 наведено 3Д-модель деталі, на рис. 3.8 - інтерфейс програмного середовища підготовки керуючої програми, на рис. 3.9 - результат виготовлення деталі. Час виготовлення деталі “Платформа камери” склав 1 год 33 хв. Маса отриманої деталі складає 24 грами.

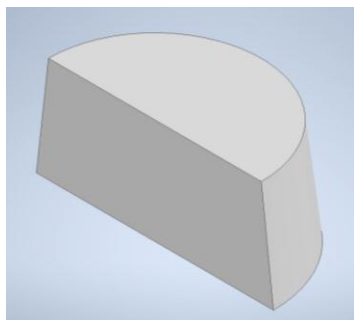


Рисунок 3.7 - 3Д-модель деталі “Платформа камери”

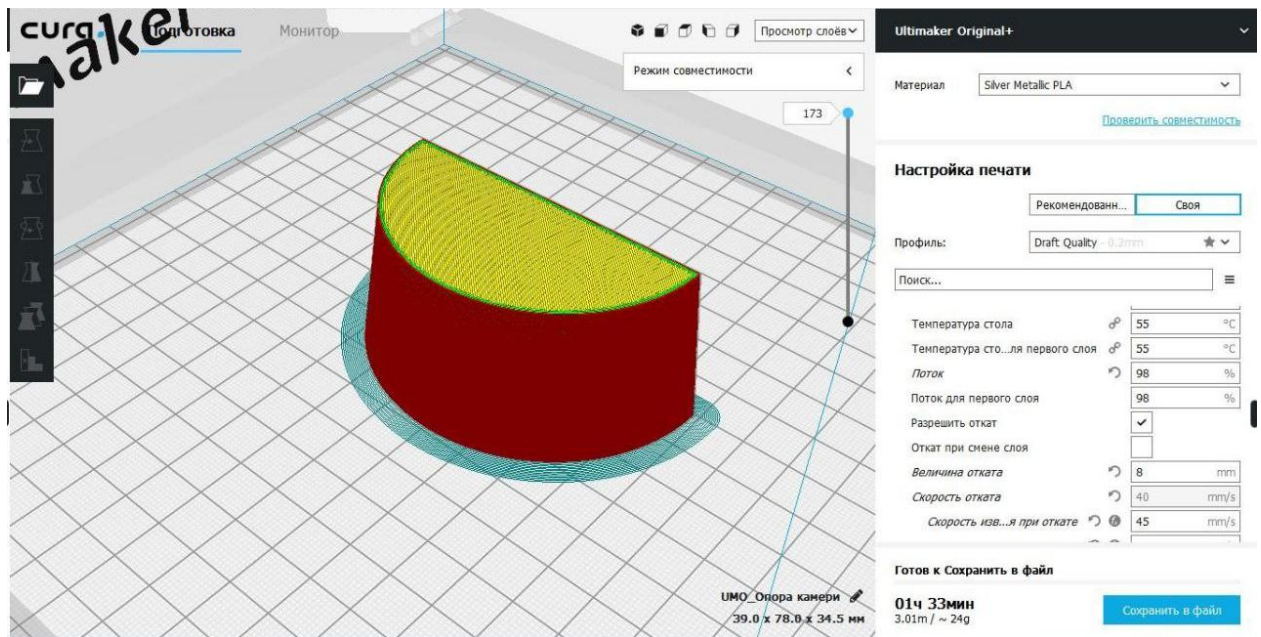


Рисунок 3.8 - Інтерфейс програмного середовища підготовки керуючої програми виготовлення деталі “Платформа камери”

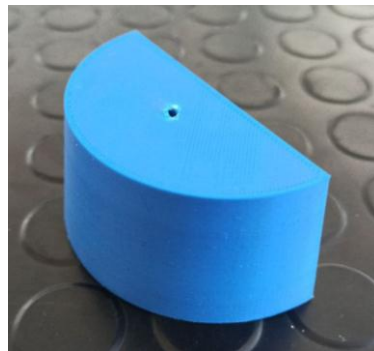


Рисунок 3.9 - Результат виготовлення деталі “Платформа камери”

Застосування адитивної технології для виготовлення деталі “Нахилена проставка”.

На рис. 3.10 наведено 3Д-модель деталі, на рис. 3.11 - інтерфейс програмного середовища підготовки керуючої програми, на рис. 3.12 - результат виготовлення деталі. Час виготовлення деталі “Нахилена платформа” склав 2 год 15 хв. Маса деталі складає 31 грам.

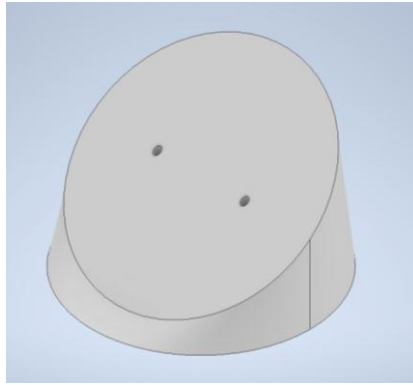


Рисунок 3.10 - 3D-модель деталі “Нахилена проставка”

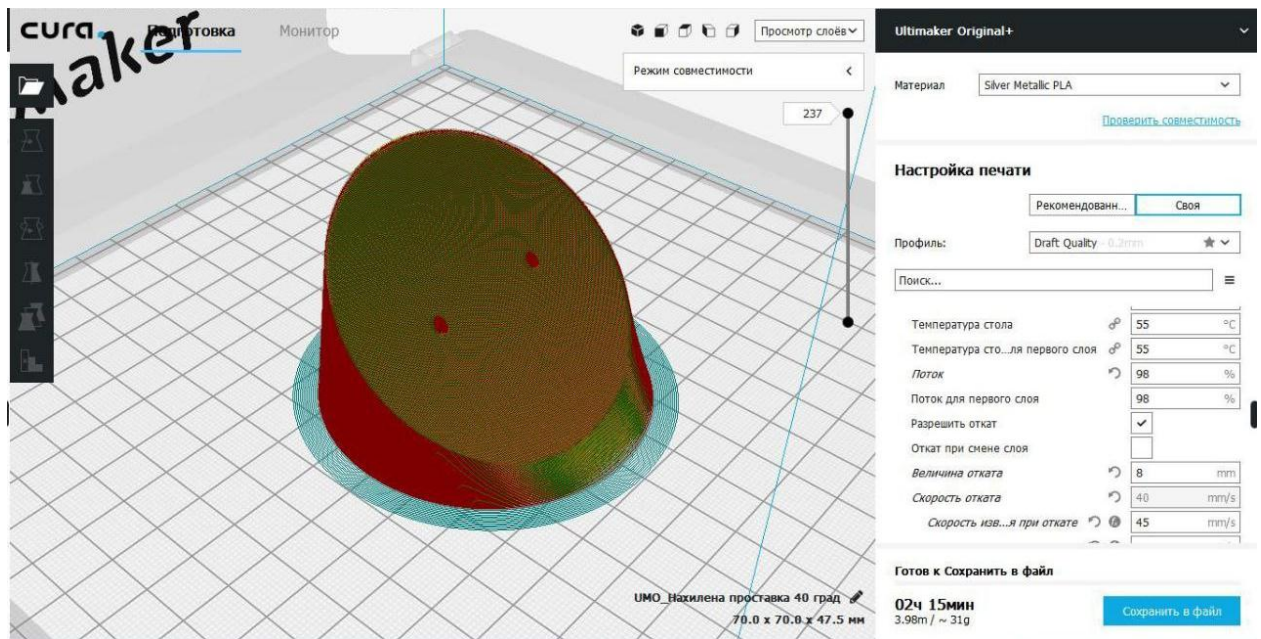


Рисунок 3.11 - Інтерфейс програмного середовища підготовки керуючої програми виготовлення деталі “Нахилена проставка”

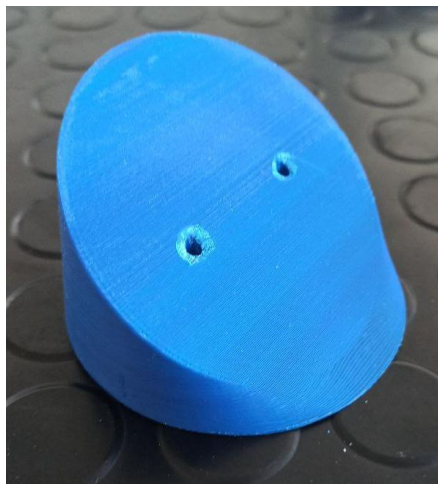


Рисунок 3.12 - Результат виготовлення деталі “Нахилена проставка”

Застосування адитивної технології для виготовлення деталі “Кріплення насоса”.

На рис. 3.13 наведено 3Д-модель деталі, на рис. 3.14 - інтерфейс програмного середовища підготовки керуючої програми, на рис. 3.15 - результат виготовлення деталі. Час виготовлення деталі “Кріплення насоса” склав 1 год 7 хв. Маса деталі складає 15 грам.

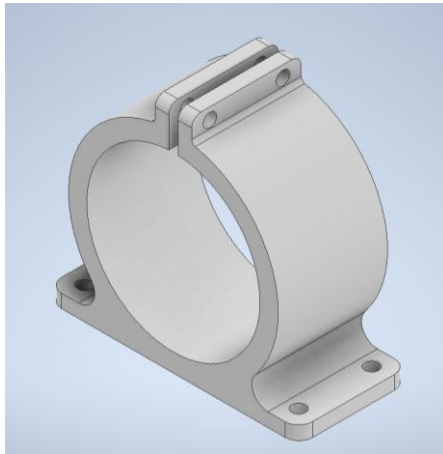


Рисунок 3.13 - 3Д-модель деталі “Кріплення насоса”

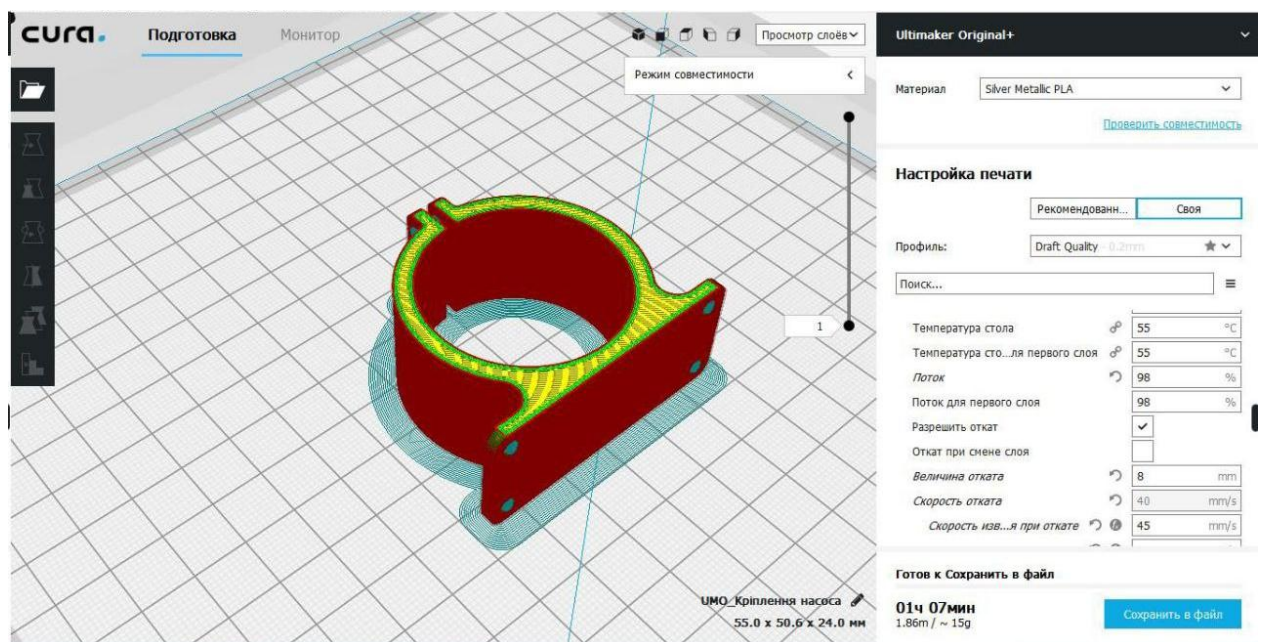


Рисунок 3.14 - Интерфейс программного середовища підготовки керуючої програми виготовлення деталі “Кріплення насоса”

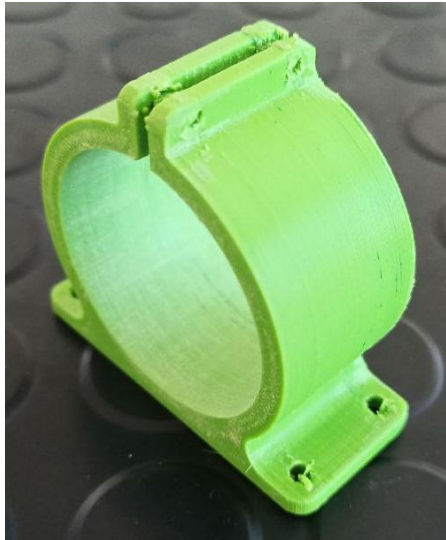


Рисунок 3.15 - Результат виготовлення деталі “Кріплення насоса”

Застосування адитивної технології для виготовлення деталі “Кріплення лазера”.

На рис. 3.16 наведено 3D-модель деталі, на рис. 3.17 - інтерфейс програмного середовища підготовки керуючої програми, на рис. 3.18 - результат виготовлення деталі. Час виготовлення деталі “Кріплення лазера” склав 1 год 10 хв. Маса отриманої деталі складає 14 грамів.

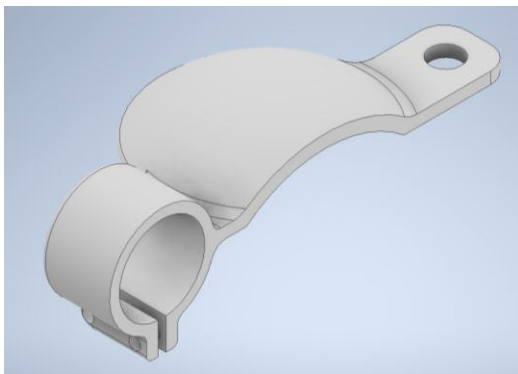


Рисунок 3.16 - 3D-модель деталі “Кріплення лазера”

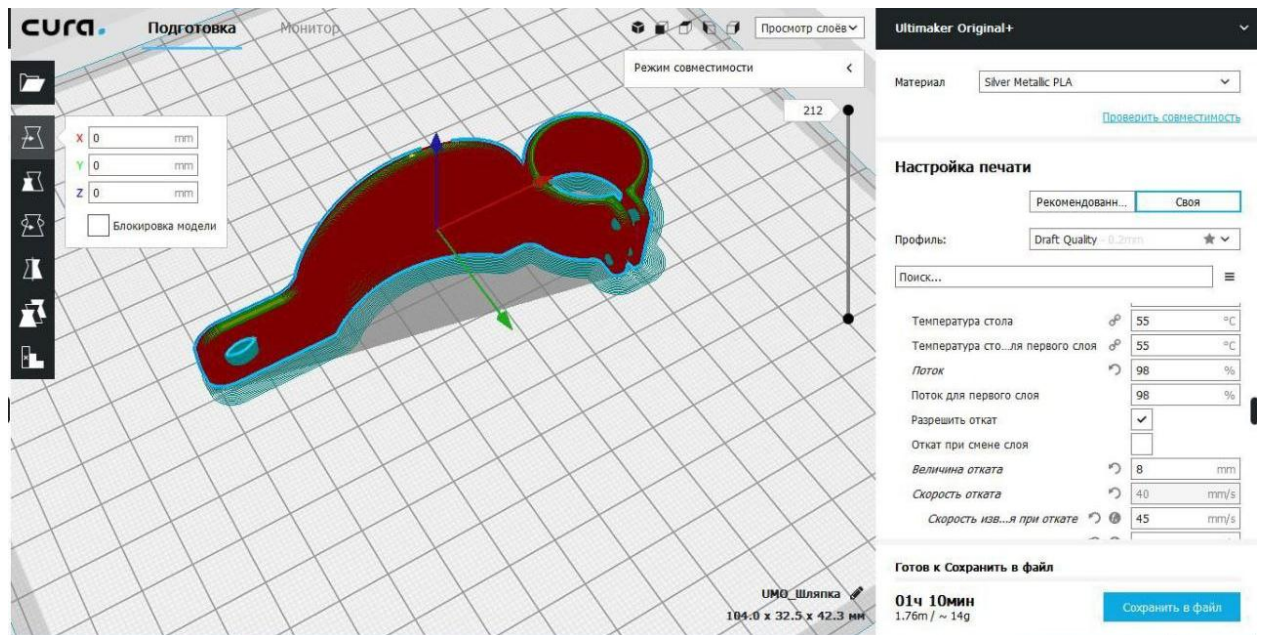


Рисунок 3.17 - Інтерфейс програмного середовища підготовки керуючої програми виготовлення деталі “Кріплення лазера”



Рисунок 3.18 - Результат виготовлення деталі “Кріплення лазера”

Застосування адитивної технології для виготовлення деталі “Кріплення форсунки”.

На рис. 3.19 наведено 3D-модель деталі, на рис. 3.20 - інтерфейс програмного середовища підготовки керуючої програми, на рис. 3.21 - результат виготовлення деталі. Час виготовлення деталі “Кріплення форсунки” склав 36 хв. Маса отриманої деталі складає 8 грамів.

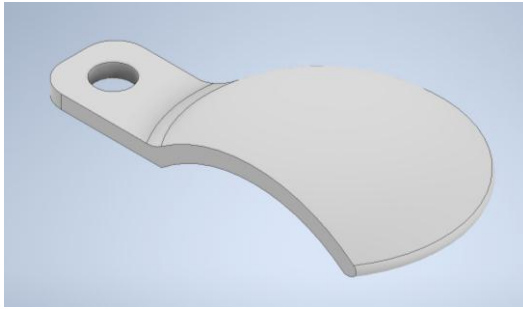


Рисунок 3.19 - 3Д-модель деталі “Кріплення форсунки”

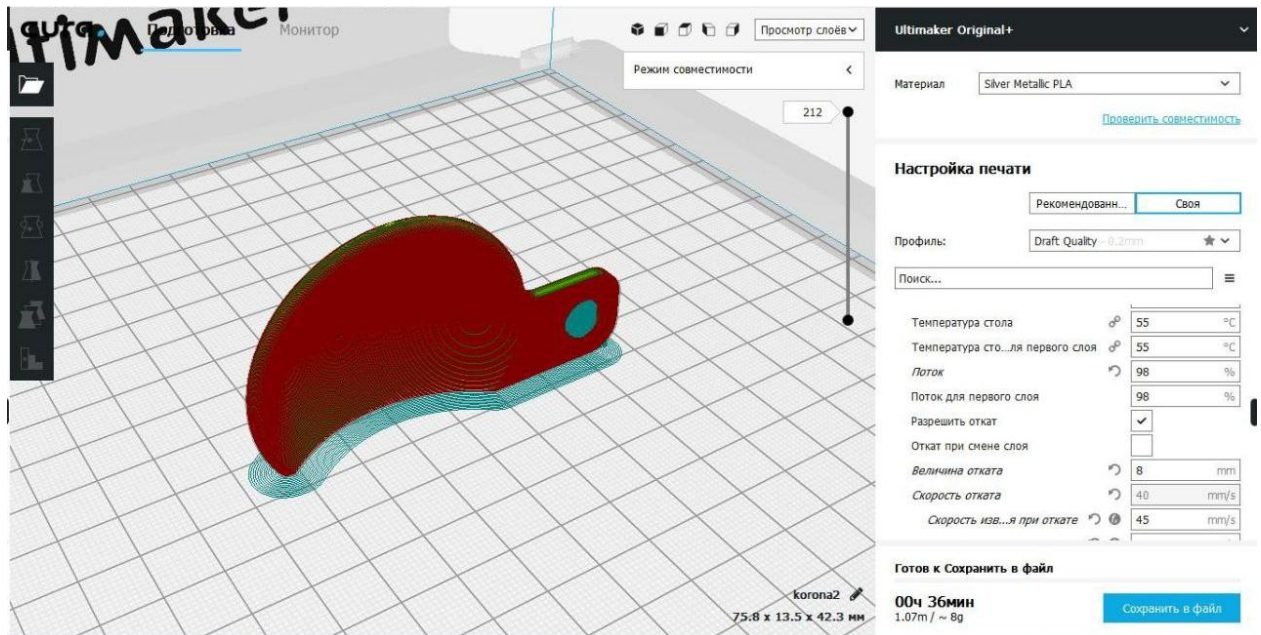


Рисунок 3.20 - Інтерфейс програмного середовища підготовки керуючої програми виготовлення деталі “Кріплення форсунки”

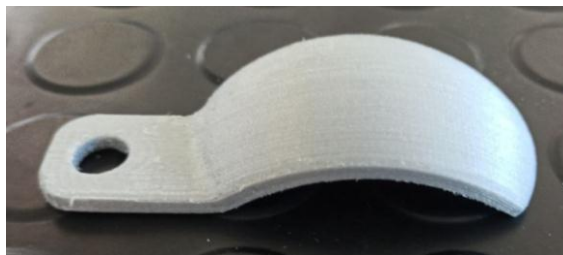


Рисунок 3.21 - Результат виготовлення деталі “Кріплення форсунки”

3.5. Інтерфейс середовища управління сільськогосподарським роботом FLIBot 2.0

Для дистанційного управління роботом було обрано використовувати систему розробки та використання мобільних графічних інтерфейсів для керування контролерами зі смартфона або планшета RemoteXY.

До складу системи входять:

- редактор мобільних графічних інтерфейсів для контролерів, розміщений на веб-сайті remotexy.com
- мобільний додаток RemoteXY, що дозволяє підключатися до контролера та відображати графічні інтерфейси. Завантажити програму.

Відмітні особливості: конфігурація графічного інтерфейсу зберігається у контролері; при підключенні немає жодної взаємодії з сторонніми серверами для того, щоб завантажити графічно інтерфейс; конфігурація графічного інтерфейсу завантажується на мобільний додаток з контролера. На рис. 3.22 наведено інтерфейс керування роботом FLIBot 2.0.

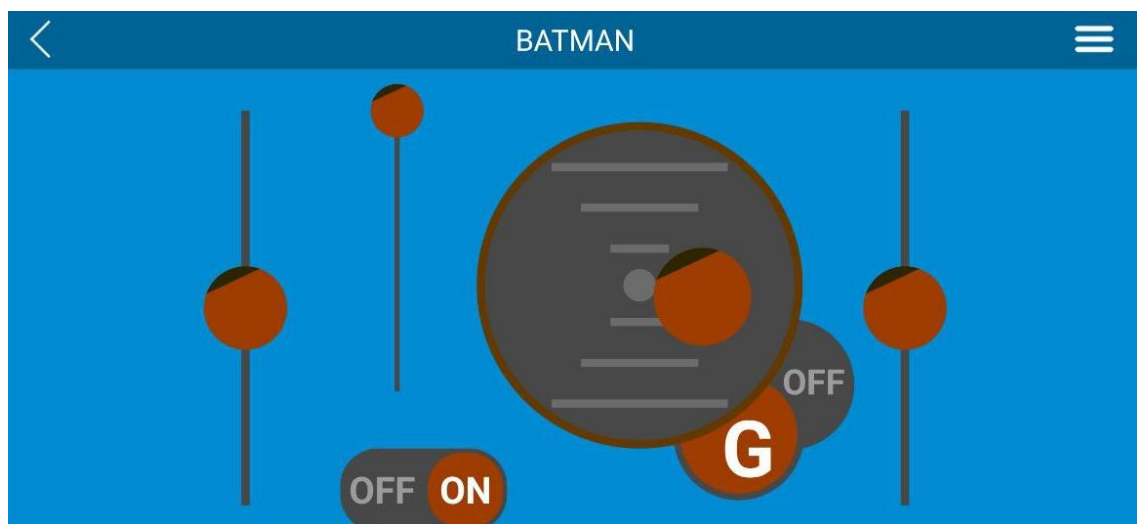


Рисунок 3.22 - Інтерфейс додатка RemoteXY

Функціональні особливості кожної кнопки на екрані є такими. Для початку роботи необхідно перевести тумблер OFF/ON в положення ON. Ця дія запустить керуючу програму на роботі для можливості подальшого його керування. Наступними елементами є важелі розташовані з правого та лівого боків. Вони відповідають за роботу правого та лівого двигунів, тобто обертають відповідне колесо. В залежності від положення важелів один відносно одного можна повертати робота або здійснювати прямолінійний рух. На рисунку 3.22 видно, що важелі знаходяться в центральному положенні. Це означає, що в залежності від сторони до якої буде нахилений важіль, буде здійснюватися обертання відповідного колеса вперед або назад.

Для плавного керування можна застосувати джойстик розташований посередині екрану. Для збільшення або зменшення його чутливості необхідно пересунути важіль, який знаходиться ліворуч від джойстика на певну відстань знизу до верху. В залежності від зміни положення робота буде швидше або повільніше реагувати на зміну положення джойстика.

Якщо оператору робота зручніше керувати за рахунок нахилання телефону або планшета, тоді необхідно перевести положення кнопки G в положення ON. Виконавши цю дію оператор зможе перейти в новий режим керування, при цьому регулювання чутливості робота залишається незмінним.

3.6. Алгоритмічне забезпечення функціонування сільськогосподарського робота FLIBot 2.0

Дії робота FLIBot 2.0 визначаються його взаємодією з іншими елементами системи “FLIBot Systems”. Цикл автономної роботи робота по виконанню типового завдання (див. розд. 1.5) може бути реалізований наступним алгоритмом (рис. 3.23).

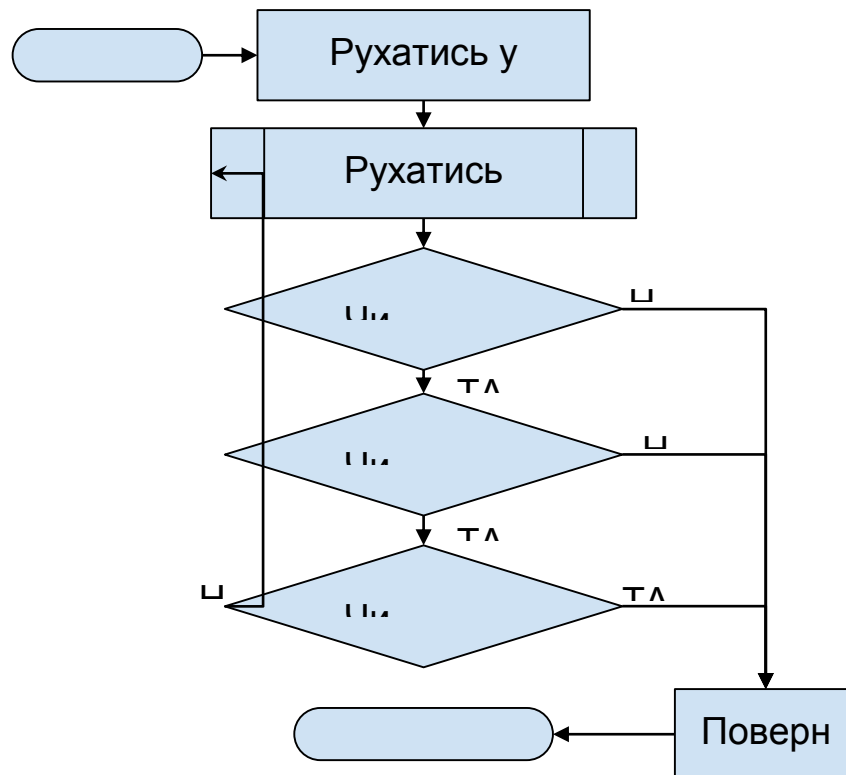


Рисунок 3.23 - Алгоритм виконання завдання роботом FLIBot 2.0

Типове завдання виконуване роботом FLIBot 2.0 і видане центральною базою полягає в тому, що робот автономно повинен переміститись на початок і-го рядка (база задає координати в локальній СК) і приступити до наступного етапу - рух вздовж рядка. Зміст цієї процедури буде розглянутий нижче. По досягненню кінця рядка повинна пройти низку перевірок для того щоб переконатися, що для руху вздовж наступного рядка вистачить енергії, вистачить рідини (гербіцидів) і що попередньо сформоване базою завдання ще не до кінця виконане. Якщо є сумніви в успішності - слідує команда повернення на базу для поповнення запасу енергії, рідини, або для завершення роботи на заданій ділянці. У всіх інших випадках продовжується виконання завдання шляхом проходження наступного рядка.

Алгоритм реалізації процедури “Рухатись вздовж рядка” наведений на рис. 3.24. Він базується на алгоритмі, представленому на рис. 1.29 проте є його модернізацією. Його суть полягає у циклічному з частотою не менше 5 разів за секунду повторенні таких дій: отримати зображення з камер спостереження; передати пакет зображень на базу; очікувати відповідь від бази стосовно

виявлення на зображенні бур'яну; у випадку позитивної відповіді (бур'ян є) визначити координати точки розташування з урахуванням зміщення робота; розрахувати точку упередження для наведення виконавчого органу; дати команду на електричний клапан (для форсунки) або на лазер. База в свою чергу виконує завдання перетворення опрацювання зображення, його сегментації, виділення контурів, класифікація та формування мапи розташування бур'янів (координати і зони).

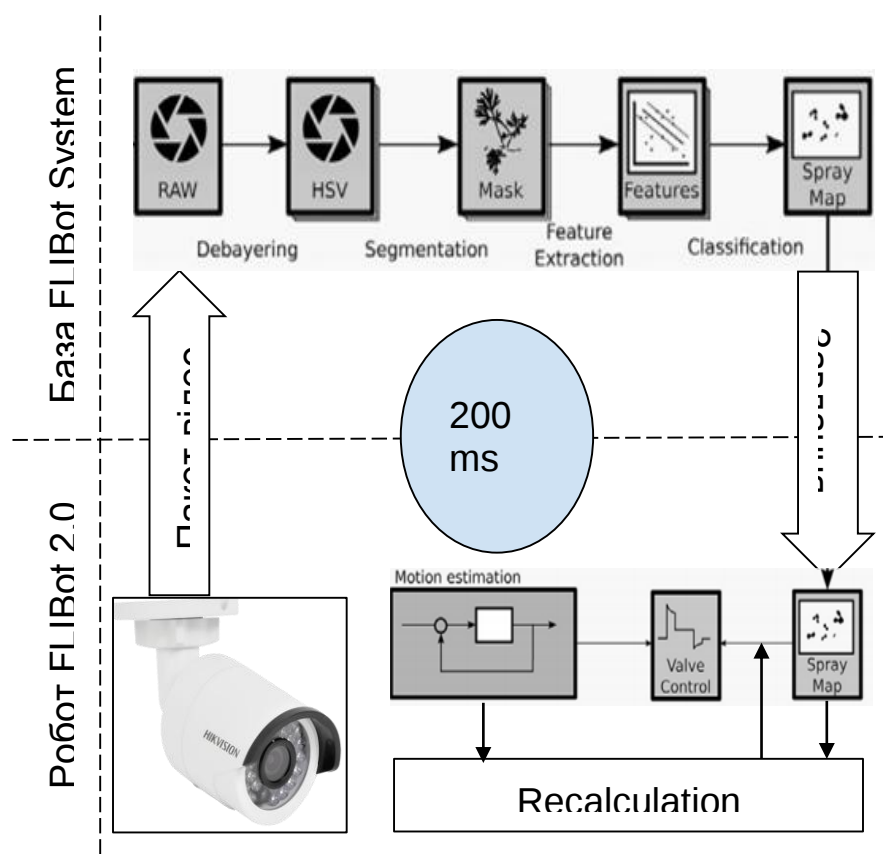


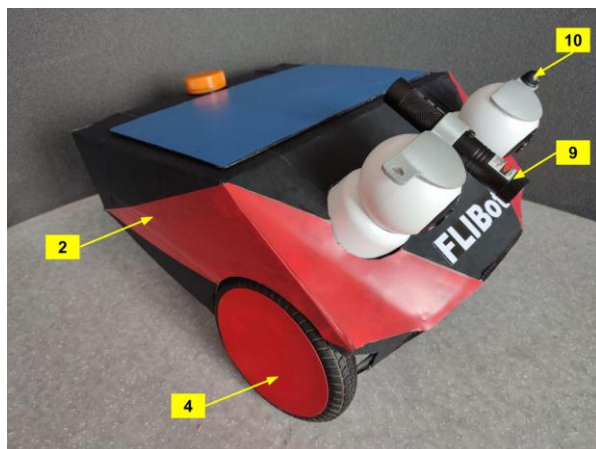
Рисунок 3.24 - Цикл взаємодії платформи автономного робота FLIBot 2.0 з центральною базою (процедура “Рух вздовж рядка”)

Наведені алгоритми є основою побудови системи управління роботом та його взаємодії з базою, які в сукупності вирішують завдання автономного знищення бур'янів.

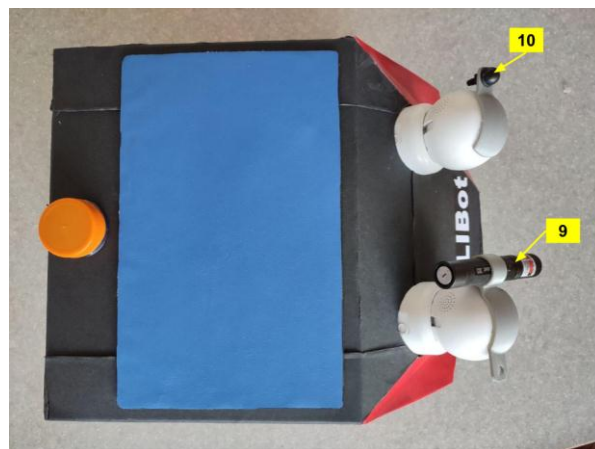
3.7. Дослідний зразок сільськогосподарського робота FLIBot 2.0

В лабораторії FabLab KPI на кафедрі конструювання машин створено дослідний зразок сільськогосподарського робота FLIBot 2.0. На рис. 3.25

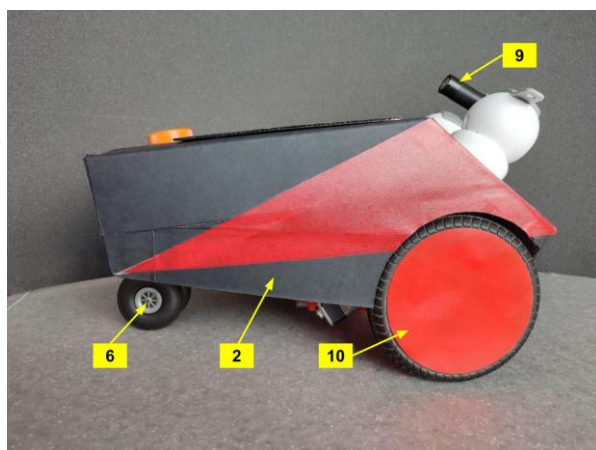
наведено загальний вид робота, а на рис. 3.26 - загальний вид без елементів обвісу.



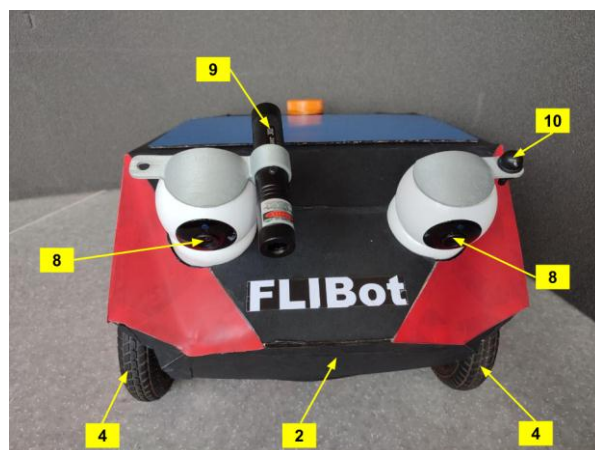
а)



б)



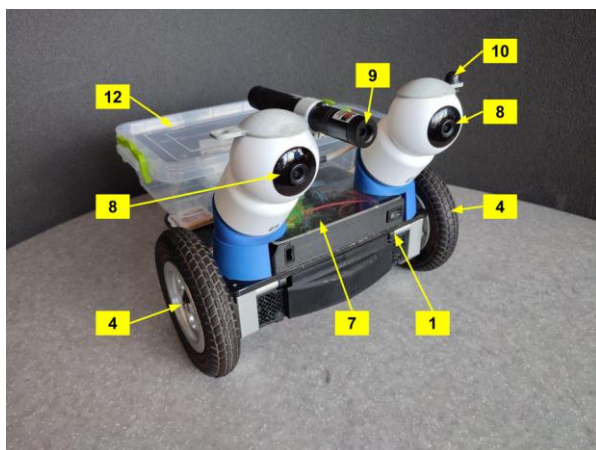
в)



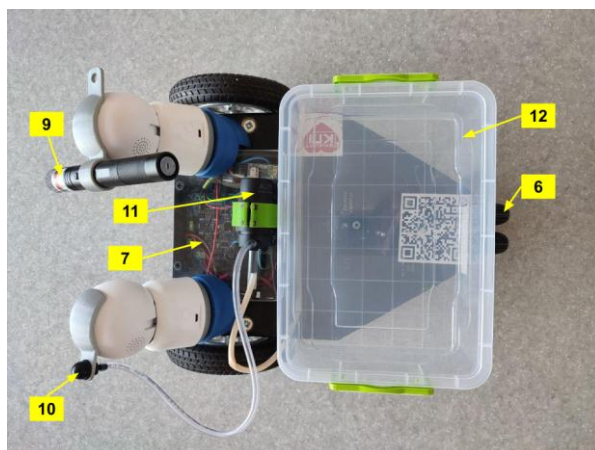
г)

Рисунок 3.25 - Дослідний зразок сільськогосподарського робота FLIBot 2.0:

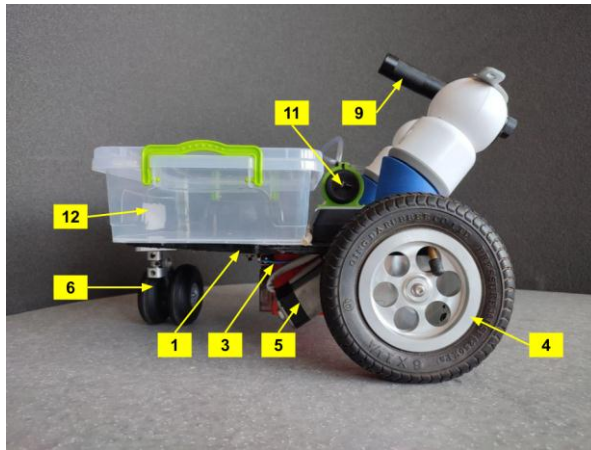
а - вид під кутом; б - вид зверху; в - вид збоку; г - вид спереду



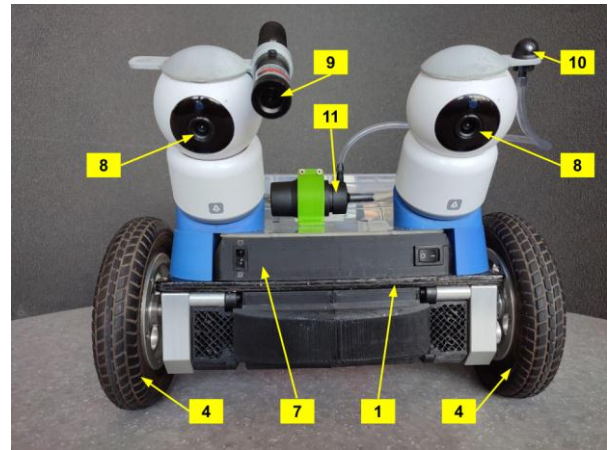
а)



б)



б)



г)

Рисунок 3.26 - Дослідний зразок сільськогосподарського робота FLiBot 2.0 (без елементів обвісу):

а - вид під кутом; б - вид зверху; в - вид збоку; г - вид спереду

На цих рисунках номерами позначені: 1 - несуча платформа; 2 - обвіс; 3 - акумулятор; 4 - приводні колеса; 5 - привід колеса з редуктором; 6 - опорне колесо; 7 - блок управління; 8 - камери спостереження; 9 - лазерний винищувач; 10 - форсунка обприскувача; 11 - помпа обприскувача; 12 - бак для рідини.

Далі крупним планом показані інтегровані з відеокамерами системи випалювання (рис. 3.27,а) та системи обприскування (рис. 3.27,б).



а)



б)

Рисунок 3.27 - Система випалювання (а) та система обприскування (б)

Висновки по розділу

В даному розділі наведено результати проєктування автономного сільськогосподарського робота в цілому та його функціонально важливих вузлів. Зокрема представлено проєкт рухомої платформи, проєкт інтегрованих систем “спостереження - випалювання” та “спостереження - обприскування”. На робот і на окремі модулі розроблено конструкторську документацію, яка в повному обсязі наведена у Дод. А, а для основних деталей - по тексту розділу.

Наведено результати застосування передових технологій створення прототипів, зокрема, - адитивних технологій. Всі необхідні оригінальні деталі спроектовано з використанням Autodesk Inventor. Керуючі програми підготовлено з використанням програмного забезпечення Cura. Виготовлені деталі з використанням 3D-принтера Ultimaker у приміщенні FabLab KPI на кафедрі конструювання машин.

Сконструйовано інтерфейс взаємодії людини з роботом. На даному етапі обрано програмне забезпечення RemoteXY, віль версія якого дозволяє реалізувати таку взаємодію зі смартфона. Розроблено алгоритмічне забезпечення автономного руху робота при виконання типового завдання із контролем його працездатності, а також процедуру автономного руху вздовж рядка зі спостереженням за полем, передаванням інформації на сервер, опрацювання інформації на сервері з виявленням бур'янів та реалізації команд виконавчим органам на знищення бур'яну енергетичним або хімічним способом впливу.

Виготовлено і протестовано дослідний зразок автономного сільськогосподарського робота для знищення бур'янів FLIBot 2.0.

РОЗДІЛ 4. ІННОВАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО РОБОТА FLIBOT 2.0

Для визначення ступеня інноваційності проєкту сільськогосподарського робота FLIBot 2.0 слід визначитись із його потенціалом як об'єкта права інтелектуальної власності та розглянути його з точки зору потенційного стартап-проєкту. Для вирішення першого завдання слід провести патентний пошук аналогічних рішень та визначити відмінні риси даного проєкту від аналогів. Це дасть можливість оформити матеріали захисту тієї частини інтелектуальної власності, яка відрізняє даний проєкт від аналогів. Для вирішення другого завдання слід проаналізувати характеристики проєкту, визначити його технологічну здійсненність, проаналізувати потенційний ринок та потенційних клієнтів, визначити фактори загроз і можливостей проєкту, та провести ступеневий аналіз конкуренції на ринку. Розгляду цих питань і буде присвячений даний розділ

4.1 FLIBot System як об'єкт права інтелектуальної власності

4.1.1 Патентний пошук у сфері агро роботів

Патентний пошук у сфері агро роботів здійснено за підтримки Центру підтримки технологій та інновацій (TISC) при Департаменті інновацій і трансферу технологій КПП ім. Ігоря Сікорського (<https://science.kpi.ua/news/tsentr-pidtrimki-tehnologij-ta-innovatsij-tisc/>).

Патентний пошук здійснювався з використанням бази Espacenet Patent Search (<https://worldwide.espacenet.com/patent/>), яка за запитом "agricultural robot" та з параметром "Query language: en / de / fr" надала перелік з 463-х патентів за останні 25 років. Аналіз розподілу цієї кількості по роках (рис. 4.1) вказує на стрімке зростання активності у цій сфері за останні 5 років. Це підтверджує актуальність задачі створення агро роботів у світі й необхідність

патентування власних технічних рішень які відрізняються від аналогів. Вся сформована база патентів за цією тематикою наведена у Додатку А.

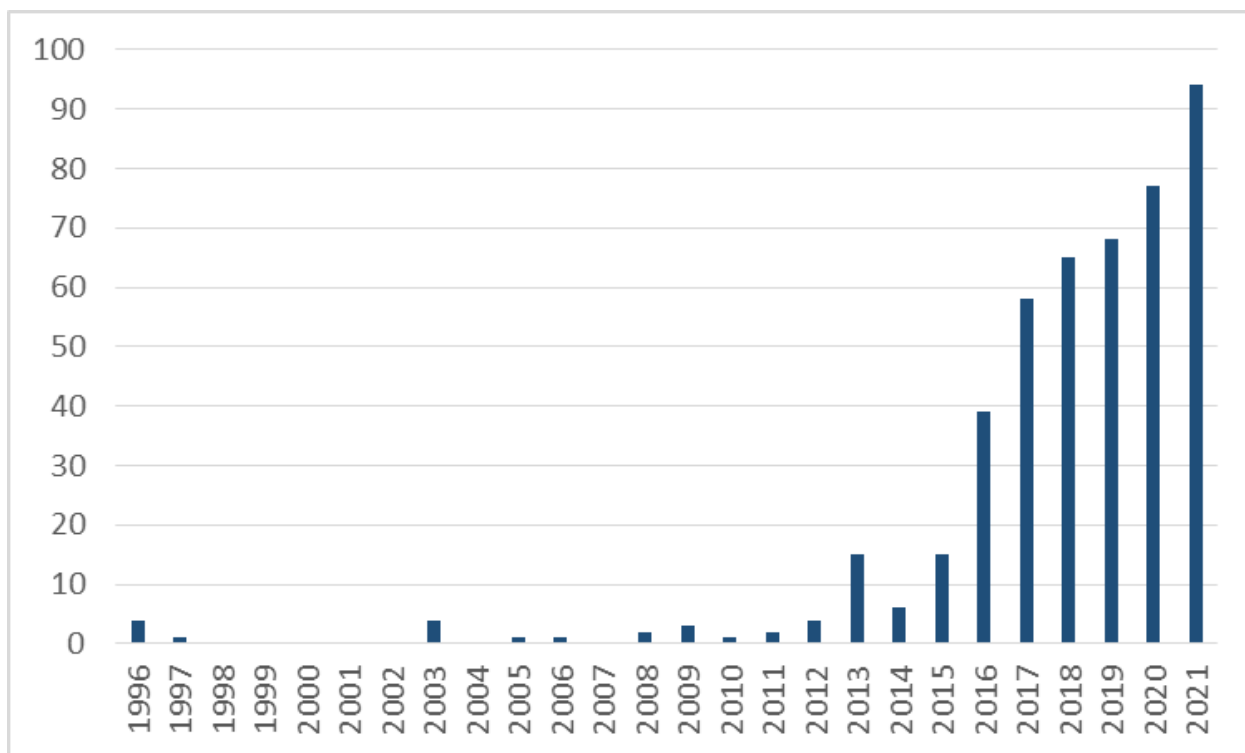


Рисунок 4.1 - Динаміка патентування агро роботів в світі

Серед найближчого технічного рішення стосовно всієї системи автономної боротьби з бур'янами на базі роботів, то найближчим до нашої концепції є “GB2583787A Autonomous farming devices, systems and methods” [37]. Основні пункти, що захищені патентом наведені далі.

П.1. Спосіб ведення сільського господарства з використанням автономних сільськогосподарських роботів, які працюють для моніторингу та догляду за фермерською ділянкою, метод включає: моніторинг ділянки ферми за допомогою принаймні одного автономного робота моніторингу, автономного моніторингового робота, який переміщує земельну ділянку та генерує, з набору датчиків робот моніторингу, щонайменше, один набір даних ділянки ферми; обробка щонайменше одного набору даних ділянки ферми для генерування інструкцій з експлуатації для робота, що доглядає, окремо від робота моніторингу; і виконання інструкцій з експлуатації доглядаючого робота таким чином, щоб робот-доглядник перетинав ділянку ферми та

виконував на ній завдання догляду, включаючи принаймні одне з: посіву насіння, прополки та застосування таких обробок сільськогосподарських культур, як добрива, фунгіциди, гербіциди або пестициди.

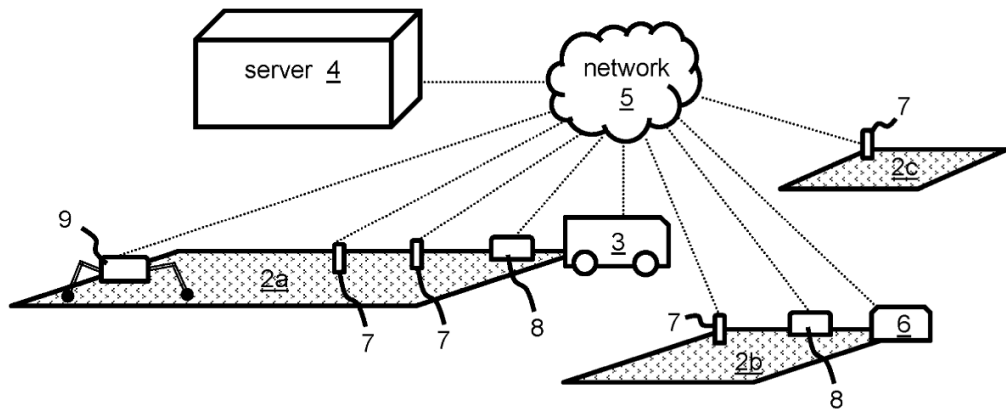


Figure 1

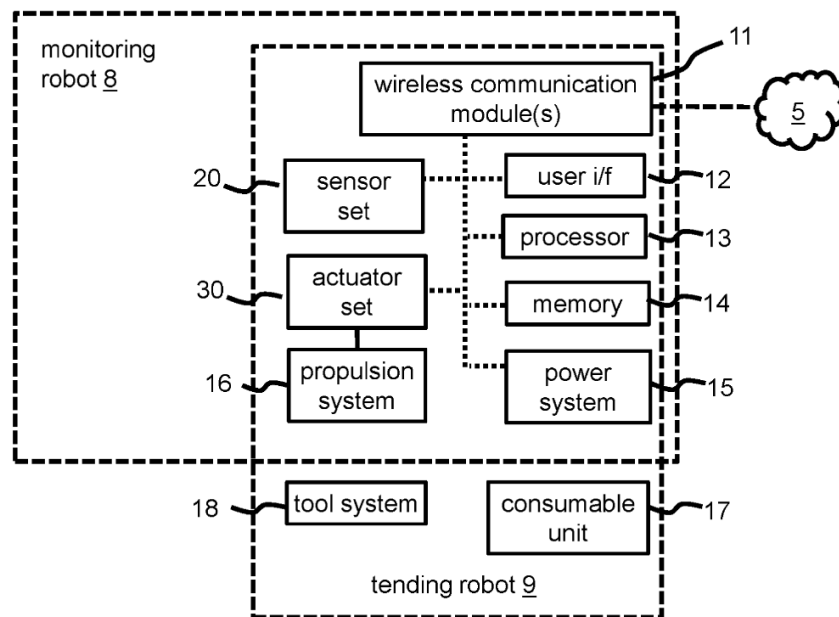


Figure 2

Рисунок 4.1 - Ілюстрації до патенту GB2583787A Autonomous farming devices, systems and methods [37].

П.2. Спосіб ведення сільського господарства за п. 1, який додатково містить: розміщення станції обслуговування на присадибній ділянці, причому станція обслуговування влаштована для забезпечення автоматичного обслуговування сільськогосподарських роботів, наприклад, поповнення їх

джерел енергії, передача даних, заправка витратних матеріалів, перемикання інструментів і/ або перемикання конфігурацій завдань; обчислення ліміту операцій для сільськогосподарського робота, після якого цей сільськогосподарський робот потребує обслуговування на станції обслуговування, щоб продовжити ефективне виконання своїх операцій моніторингу та/або догляду; визначення місцезнаходження станції обслуговування та цього фермерського робота; визначення маршруту для цього фермерського робота, який повертає його до розташування станції обслуговування до перевищення ліміту операцій; ведення цього фермерського робота по території ферми відповідно до визначеного маршруту до станції обслуговування для обслуговування; і автоматично обслуговувати цього фермерського робота на станції обслуговування.

П.3. Спосіб ведення сільського господарства за п. 2, в якому станція обслуговування містить станцію заміни батарей, на якій розряджена батарея фермерського робота може бути замінена на заряджену під час автоматичного обслуговування фермерського робота на станції обслуговування; 6. Спосіб ведення господарства за будь-яким попереднім пунктом, в якому інструкції з експлуатації містять маршрутні точки завдання, кожна з яких визначає завдання догляду, яке має виконуватися у пов'язаному місці, причому робот-доглядник отримує та виконує інструкції з експлуатації, таким чином перетинаючи ділянку ферми для виконання завдань догляду в їх відповідні вказані місцезнаходження.

Патент містить загалом 18 пунктів захисту.

Найближчим до запропонованого нами технічного рішення робота є “Agricultural robot system and method”, захищений патентами Австралії та Сполучених Штатів Америки - AU2005314708A1, US2011137456A1. Патент захищає цілу низку технічних рішень, з яких до нашого найближчим є проєкт “Scout” (рис. 4.2).

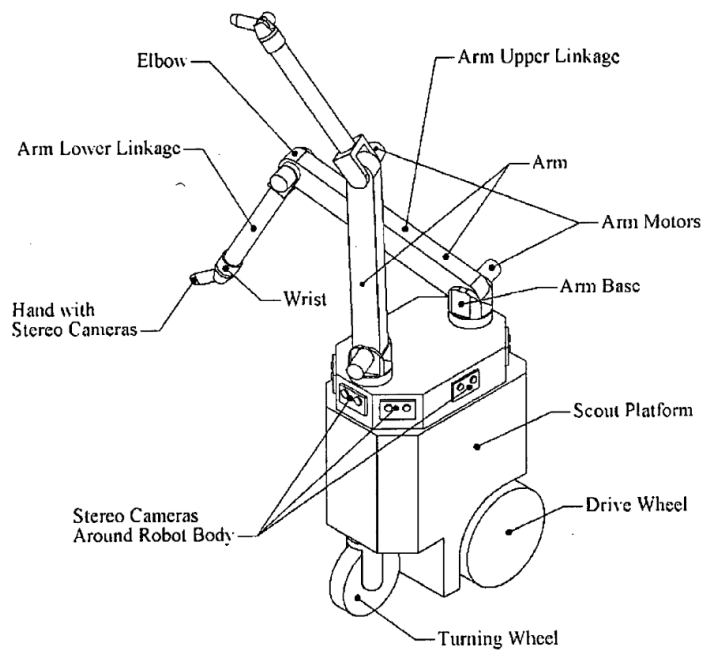


Рисунок 4.2 - Проєкт автономного робота “Scout” згідно патенту [38]

Основними збіжними пунктами винаходу є такі.

1. Спосіб використання системи сільськогосподарських роботів, що включає: вхід на поле роботом-розвідником; наближення до рослини із зазначеним роботом-розвідником; реєстрація координат зазначеного робота-розвідника зазначеним роботом-розвідником; відображення щонайменше одного розташування сільськогосподарського елемента зазначеним роботом-розвідником для створення карти; і, продовжуючи зазначене наближення, згадане каротаж і зазначене відображення до тих пір, поки не буде нанесено на карту бажану кількість рослин у зазначеному полі.

2. Спосіб за п. 1, який додатково містить: створення плану дій, що містить дію, яка використовує принаймні одне розташування згаданого сільськогосподарського елемента.

3. Спосіб за п. 1, який додатково містить: збір екологічної інформації від згаданих сільськогосподарських елементів.

4. Спосіб за п. 1, який додатково містить: передачу інформації від згаданого робота-розвідника до робочого робота для створення плану дій із зазначеної карти; переміщення зазначеного робочого робота поблизу зазначеного заводу; працювати з призначеним об'єктом, пов'язаним із зазначеним заводом, зазначеним робочим роботом; і, продовжуючи зазначене переміщення та зазначену роботу, доки не будуть експлуатовані всі установки на зазначеному полі.

5. Спосіб за п. 4, в якому зазначена передача інформації від згаданого робота-розвідника до робота-вибірника додатково містить передачу зазначеної інформації від зазначеного робота-розвідника на сервер зазначеному робочому роботу.

Взагалі патент містить 18 пунктів, що захищають інтелектуальну власність.

Ще одним корисним і близьким технічним рішенням є Патент США “US11285612B2 Coordinating agricultural robots” [39] (рис. 4.3). Реалізації, розкриті тут, спрямовані на координацію напівавтономних роботів для виконання сільськогосподарських завдань з мінімальним втручанням людини. Ці методи делегують якомога більшу частину роботи роботам, при цьому людина-оператор втручається лише в тому випадку, якщо та/або коли робот не в змозі безпечно виконувати конкретне сільськогосподарське завдання з пороговою впевненістю. Методи, описані тут, дозволяють відносно невеликій кількості людей-операторів (наприклад, лише одному) керувати порівняно великим парком роботів, оскільки, наприклад, людина-оператор може вручну керувати роботом лише тоді, коли робот досягає точки, в якій він не можна продовжувати без створення неприйнятної ризику для рослини.

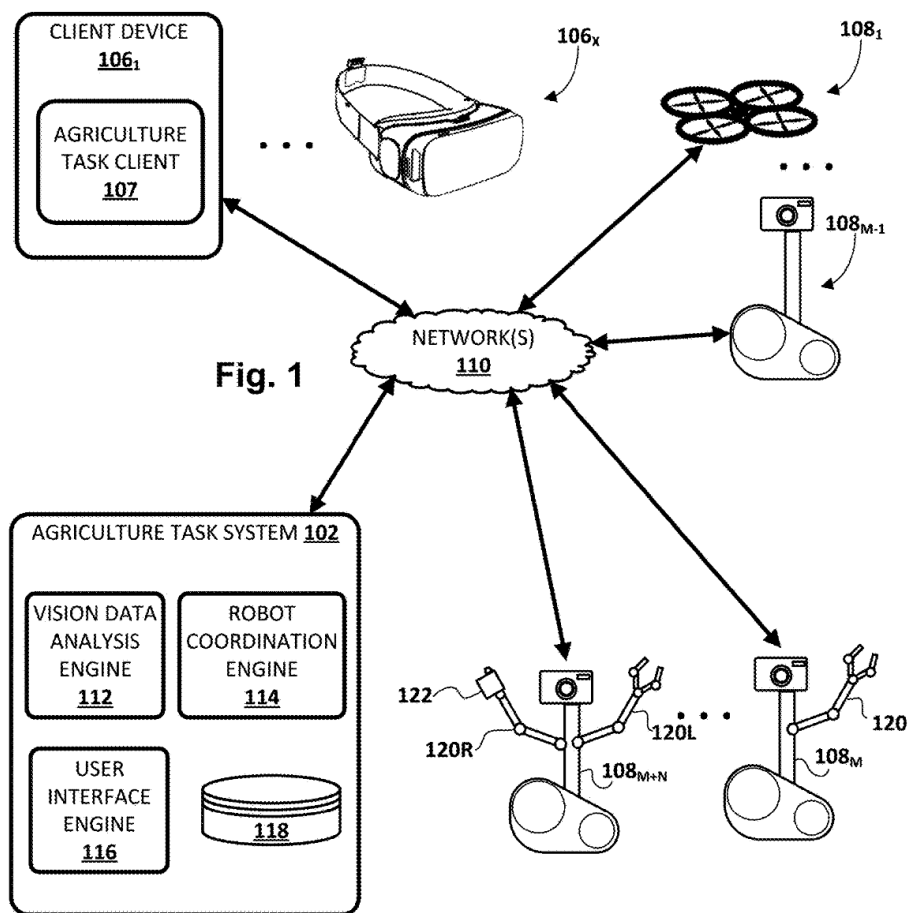


Рисунок 4.3 - Координація сільськогосподарських роботів [39]

Ключовий пункт патенту визначає спосіб, реалізований з використанням одного або більше процесорів, що включає: розгортання множини роботів для виконання відповідної множини сільськогосподарських завдань, при цьому кожна сільськогосподарська задача з множини сільськогосподарських завдань пов'язана з відповідною рослиною множини рослин, де кожна рослина з безлічі рослин раніше була визначена як мета для однієї з сільськогосподарських завдань; визначення того, що даний робот із множини роботів автономно досяг окремої рослини з множини рослин, яка пов'язана з відповідним сільськогосподарським завданням із множини сільськогосподарських завдань, яке було призначено даному роботі; у відповідь на визначення, передача керування даним роботом інтерфейсу ручного керування, який забезпечується на одному або кількох вихідних компонентах обчислювального пристрою в мережевому зв'язку з даним роботом, при цьому інтерфейс ручного керування функціонує для ручного

керування кінцем ефектор даного робота для виконання відповідного сільськогосподарського завдання; отримання введених даних користувача в інтерфейсі ручного керування; і управління кінцевим ефектором даного робота відповідно до введених даних користувача, отриманих на інтерфейсі ручного керування.

Ще одним цікавим і близьким до пропонованого нами рішення є патен “AU2021101399A4 An agricultural smart robot device” [40] (рис. 4.4).

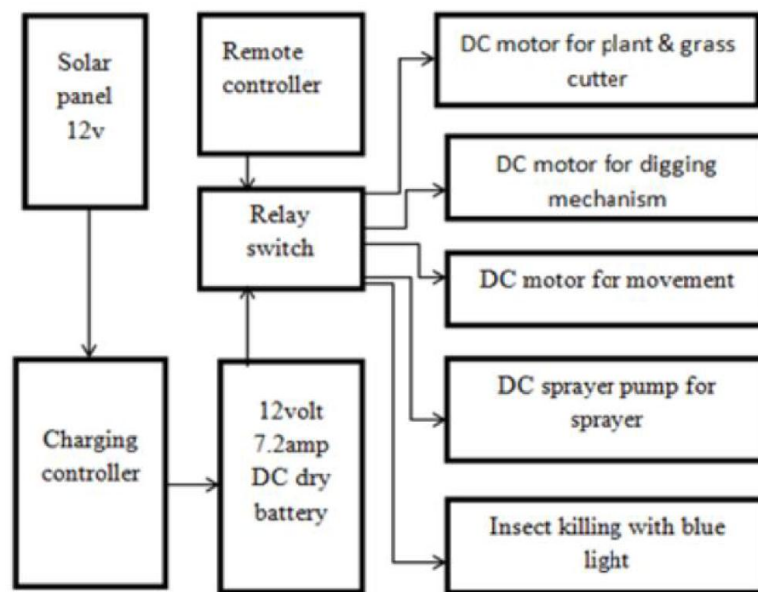


Рисунок 4.4 - Сільськогосподарський розумний робот-пристрій [40]

Згідно патенту [40] захищено сільськогосподарський розумний робот-пристрій, що містить: а) хоча б одну камеру; б) щонайменше одну мобільну платформу, поєднану зі згаданою щонайменше однією камерою; с) згадана щонайменше одна центральна платформа, сконфігурована для роботи на сільськогосподарському полі з використанням згаданої щонайменше однієї камери для отримання даних, пов'язаних з сільськогосподарськими елементами на згаданому сільськогосподарському полі, де зазначені дані мають геоприв'язку відповідно до розташування на згаданому сільськогосподарському полі і де згадана принаймні одна мобільна і центральна платформа налаштована на керування оператором через згадане сільськогосподарське поле або де згадана щонайменше одна центральна

платформа налаштована на автономну навігацію по згаданому сільськогосподарському полі; d) систему, що містить безліч сільськогосподарських роботів згідно з будь-яким з попередніх пунктів, причому безліч сільськогосподарських роботів містить принаймні першого сільськогосподарського робота і другого сільськогосподарського робота, в якій працює звуковий аналізатор, що міститься в першому сільськогосподарському роботі для керування першим сільськогосподарським роботом, що реагує на сигнал акустичного зв'язку, отриманий від другого сільськогосподарського робота, при цьому сигнал акустичного зв'язку містить інформацію про розташування об'єктів у частині місця вирощування, зібрану другим сільськогосподарським роботом; e) маніпулятор робота, що містить перший кінець і другий кінець, перший кінець фізично з'єднаний з модулем акустичного датчика, а другий кінець фізично з'єднаний з автономною мобільною платформою.

Наведена сукупність сучасних патентів є основою для підготовки власної заявки на патент, суть якої викладена далі.

4.1.2 Елементи заявки на патент на проєкт FLIBot System

Формула винаходу.

1. Автономна автоматизована система знищення бур'янів, що містить щонайменше один робот, станцію доставки та обслуговування роботів з набором витратних матеріалів та можливістю поповнення джерел енергії, щонайменше один сервер, щонайменше одну системою спостереження, щонайменше одну систему обробки даних, щонайменше одну систему позиціонування, щонайменше одну систему обміну даними між складовими автономної автоматизованої системи, **яка відрізняється тим, що** додатково містить систему локального координування, виконану у вигляді щонайменше трьох мобільних радіомаяків, а система спостереження реалізована через підсистему глобального спостереження та підсистему локального

спостереження, причому система глобального спостереження виконана на базі щонайменше одного аеродрону, з можливістю моніторингу і транспортування, а система локального спостереження виконана на базі кожного із роботів у вигляді пристрою для отримання оптичних образів об'єктів (див. рис. 1.32).

2. Робот, що містить мобільну платформу, систему обміну даними, систему керування, систему автономного живлення, щонайменше один пристрій для отримання оптичних образів об'єктів, щонайменше один виконавчий орган знищення бур'янів, **який відрізняється тим, що виконавчий орган знищення бур'янів інтегрований з пристроєм для отримання оптичних образів об'єктів і реалізований у вигляді засобу енергетичного та/або хімічного, та/або механічного ураження** (див. рис. 3.26).

4.2 FLIBot System як стартап-проект

Головною ідеєю стартап-проекту є розробка та створення платформи сільськогосподарського робота, яка буде використовуватись для хімічної або енергетичної обробки сільськогосподарських угідь з метою знищення бур'янів, а також для діагностики сільськогосподарських культур в період їх вирощування. Головною перевагою для користувачів даною технікою буде її економічна вигідність, так як вона дозволить значною мірою скоротити людський ресурс та досягти більш раціонального використання хімічних сумішей для догляду за вирощуваними рослинами. Крім цього платформа буде здатна значною мірою зменшити негативний вплив на оброблювані ґрунти, що в свою чергу дозволить підвищити їх родючість, а отже і збільшити продуктивність сільського господарства.

4.2.1 Визначення характеристик ідеї проекту

Щоб отримати ясне бачення конкурентоспроможності даного стартап-проекту необхідно визначити його сильні та слабкі сторони в порівнянні з

існуючими конкурентами. Доцільним буде виконати техніко-економічну порівняльну характеристику проєкту. Так у порівнянні з представленими в першому розділі, наша платформа є значно дешевшою у виготовленні за рахунок зменшення кількості рухомих елементів та, відповідні, приводів, спрощення системи керування ними. Також здешевлення відбуватиметься за рахунок розподілення функцій між елементами системи. Так завдання моніторингу покладені на робота, який знаходиться найближче до спостережуваного об'єкта, а завдання розпізнавання бур'янів покладене на центральний сервер. Тим самим система керування самого робота може бути побудована на простій елементній базі.

Для зручності експлуатації робота, він оснащений легко змінними акумулятором, розміщеним під несучою платформою. Таке рішення дозволяє суттєво скоротити час на обслуговування, а тим самим збільшити ефективність використання FLIBot 2.0 в польових умовах, а також знижує розташування центру мас робота, що позитивно впливає на його показники поздовжньої та поперечної стійкості. Сильною стороною є помірні вимоги до ємності акумуляторів та баку для хімічних речовин, що зменшує загальну масу апарату, енерговитрати на його переміщення, навантаження на ґрунт. Проте це потребує частішого обслуговування на базі, а періоди, коли робот рухається з бази до точки початку або повертається на базу - це непродуктивні втрати часу. Виходячи з цього в проєкті забезпечена зручна система швидкої заміни необхідних складових платформи.

4.2.2 Технологічна здійсненність проєкту

1. Електричний привод робота реалізується поєднанням електродвигуна з редуктором, що є технологічно і технічно багаторазово перевіреним, а й отже - надійним і доступним.

2. Керування поворотом робота здійснюється за рахунок різниці швидкості обертання передніх коліс. Така система забезпечується контролерами, які можна легко знайти на ринку.

3. Програмне забезпечення моніторингу забезпечується широким набором камер, а його передача на центральний сервер - наявністю вбудованих Wi-Fi модулів. Технологія промислового інтернету речей має вже багато практичних застосувань довела свою працездатність.

Проаналізувавши необхідні та наявні технології для реалізації ідеї проєкту, можна вважати цей проєкт придатним до реалізації.

4.2.3 Характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

Ринок сільськогосподарських роботів на даний час має всі ознаки інноваційності. Наразі жоден з відомих проєктів не випускається серійно і не застосовується масово. Саме тому наш проєкт має перспективи активно завойовувати ринок, особливо зважаючи на його динаміку, помітне стрімке зростання попиту на таку продукцію. Реалізація даного проєкту має незначну частину технічних обмежень в його реалізації. Найскладнішими є питання розпізнавання бур'янів в різних погодних умовах і на різних стадіях росту. Вирішення цієї задачі потребує ресурсів на навчання нейронних мереж з їх розпізнавання. Важливо, що на даний час виготовлення робота та його дослідна експлуатація не має специфічних вимог до стандартизації та сертифікації.

Визначити точно середню норму рентабельності на даному етапі вкрай важко, адже проєкт ще не реалізований. Даний критерій може бути визначений, коли поширення роботів-тракторів на ринку набуде суттєвих обсягів.

4.2.4 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

Основними споживачами продукції слід вважати фермерські підприємства та агропромислові комплекси. Поведінка цільових груп клієнтів буде різною. Головними відмінностями будуть різниця у кількості закупівель, термінах експлуатації виробів та в умовах їх експлуатації та обслуговування.

Можна передбачити, що головними умовами до продукції стануть:

- низька вартість;
- тривалий термін експлуатації;
- багатофункціональність стосовно бур'янів та корисних культур;
- надійність як процесу знищення бур'янів, так і техніки;
- взаємозамінність деталей та ремонтпридатність;
- Сервісна підтримка та наявність запчастин на ринку.

4.2.5 Фактори загроз проєкту

Основною загрозою проєкту є незрілість технології через недостатню з точки зору клієнта ефективність знищення бур'янів. На даному етапі така ефективні не є вищою за традиційні технології, проте є значно екологічною. В той же час споживачі очікуватимуть вищих у порівнянні з традиційними технологіями показників ефективності. Тобто маємо ситуацію завищених очікувань. Знизити вплив цього фактору можна за рахунок інформаційної кампанії, для популяризації точного та екологічно чистого землеробства.

Ще однією загрозою є велика конкуренція на ринку сільськогосподарської техніки. Як правило потужні фірми виробники володіють великою кількістю сучасних технологій, які дозволяють їм конкурувати з іншими виробниками. Для нівелювати цей фактора необхідно створити техніку з низькою вартістю та робити акцент на сильних сторонах нових технологій, перспектив їх поширення аж до безлюдного сільського господарства (тут мова тільки про людей безпосередньо у полі).

Активну підтримку може вказати держава через нормативні акти, які стимулюватимуть вироблення екологічно чистої продукції, підвищення ефективності застосування зеленої енергії, збереження ресурсу сільгоспугідь.

4.2.6 Фактори можливостей проєкту

Сьогоднішній стан стрімкого зростання цін на вуглеводородне паливо, пов'язаний із агресією рф до України, суттєво підштовхує весь світ до

застосування альтернативних джерел енергії. Тенденція вживати екологічно чисті продукти швидкими темпами зростає по всьому світу. Ціна таких харчів теж висока, за рахунок ускладнення процесу їх вирощування. Використання роботів значно спрощує даний процес. Це підштовхне землеробів до ширшого застосування роботизованої техніки, що в свою чергу збільшить продажі компанії. Збільшення прибутку компанії дозволить вкладати більше коштів у виробництво роботів-обприскувачів та на створення нових технологічних рішень та альтернативних методів боротьби з бур'янами. Перехід на систему точного землеробства спровокує ріст попиту на високоточну сільськогосподарську техніку. Цей фактор також дає змогу збільшувати обсяги виробництва та розширення лінії роботів.

4.2.7 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Зважаючи олігополію в галузі, для набуття конкурентоспроможності компанії необхідно визначити свою нішу, в якій компанія зможе розвиватися. В режимі міжнародної внутрішньогалузевої конкурентної боротьби необхідно розвивати власну рекламну кампанію та постійно підтримувати її на високому рівні. Вона має бути спрямована безпосередньо на аграріїв. Компанію має цікавити товарно-видова конкуренція. Головною нашою перевагою ефективне рішення побудоване на базі технології рою та розподілення функцій. Для створення власної торгової марки необхідно накопичити широкий спектр зрілих технологій, аби бути здатними забезпечити всі потреби споживача. На даному етапі варто обійтися не марочною позицією для нарощення інтелектуального та виробничого потенціалу компанії.

Висновки по розділу

На основі патентного пошуку сформульовано відмінності від аналогів і прототипів та підготовлено матеріали заявки на винахід. Об'єкт дослідження проаналізовано щодо придатності як стартап-проект, готуються матеріали для подачі проекту на Фестиваль інноваційних проектів Sikorsky Challenge 2023.

ВИСНОВКИ

Аналіз сучасного стану роботизації завдань боротьби з бур'янами дозволив виявити перспективні технічні рішення й концепції та на основі цього сформулювати власне бачення перспективного проєкту автономного сільськогосподарського робота FLIBot 2.0.

Для реалізації концепції виконане пошукове ескізування, яке дозволило обрати привабливе зовні та технічно ефективне по суті технічне рішення платформи у вигляді триколісної платформи, два передніх колеса якої є приводними та мають датчики зворотного зв'язку, що дозволяє реалізувати точне управління із гарними показниками маневреності.

Підібрані схеми та наведено математичні залежності, необхідні для забезпечення функціонування системи наведення на об'єкт, що враховує варіант його знищення - випалювання або обприскування хімічною рідиною.

В даному розділі наведено результати проєктування автономного сільськогосподарського робота в цілому та його функціонально важливих вузлів. Зокрема представлено проєкт рухомої платформи, проєкт інтегрованих систем “спостереження - випалювання” та “спостереження - обприскування”. На робот і на окремі модулі розроблено конструкторську документацію, яка в повному обсязі наведена у Дод. А, а для основних деталей - по тексту розділу.

Для вирішення задачі створення дослідного зразка застосовані передові адитивні технології. Всі необхідні оригінальні деталі спроектовано з використанням Autodesk Inventor. Керуючі програми підготовлено з використанням програмного забезпечення Cura. Виготовлені деталі з використанням 3D-принтера Ultimaker у приміщенні FabLab KPI на кафедрі конструювання машин.

Сконструйовано інтерфейс взаємодії людини з роботом. На даному етапі обрано програмне забезпечення RemoteXY, віль версія якого дозволяє реалізувати таку взаємодію зі смартфона. Розроблено алгоритмічне забезпечення автономного руху робота при виконання типового завдання із контролем його працездатності, а також процедуру автономного руху вздовж рядка зі спостереженням за полем, передаванням інформації на сервер, опрацювання інформації на сервері з виявленням бур'янів та реалізації команд виконавчим органам на знищення бур'яну енергетичним або хімічним способом впливу.

Виготовлено і протестовано дослідний зразок автономного сільськогосподарського робота для знищення бур'янів FLIBot 2.0. На основі патентного пошуку сформульовано відмінності від аналогів і прототипів та підготовлено матеріали заявки на винахід. Об'єкт дослідження проаналізовано щодо придатності як стартап-проект, готуються матеріали для подачі проекту на Фестиваль інноваційних проєктів Sikorsky Challenge 2023.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Guangnan Chen. Advances in Agricultural Machinery and Technologies. CRC Press, 2018. 489 p. (ISBN 978-1-4987-5412-5)
2. Anja-Tatjana Braun, Eduardo Colangelo, Thilo Steckel. Farming in the Era of Industrie 4.0. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP. Volume 72, 2018, Pages 979-984
(<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.176>)
3. A. Hafeez, M. A. Husain, S. P. Singh et al., Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review, Information Processing in Agriculture, 2022 (<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.02.002>)
4. Dan Zhang and Bin Wei. Robotics and Mechatronics for Agriculture. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018, 223 p.
5. Marco Ceccarelli, Emin Faruk Kececi. Designs and Prototypes of Mobile Robots. ASME Press, 2015. 202 p.
6. Shiva Gorjian, Hossein Ebadi, Max Trommsdorff, H. Sharon, Matthias Demant, Stephan Schindel. The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. Journal of Cleaner Production, Volume 292, 10 April 2021, 126030
(<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126030>)
7. Amin Ghobadpour, Loïc Boulonb, Hossein Mousazadeha, Ahmad Sharifi Malvajerdi, Shahin Raviee. State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems. Special Issue on Emerging and Renewable Energy: Generation and Automation. Energy Procedia 162 (2019), pp. 4–13.

8. Timo Oksanen, Juha Backman. Guidance system for agricultural tractor with four wheel steering. Aalto University, Finland. 6 p.
9. F. Buemi, M. Massa, G. Sandini, G. Costi. The Agrobot project. Adv. Space Res. 1996, Vol. 18, No. 1/2, pp. 185-189
10. C.G. Sørensen, R.N. Jørgensen, J. Maagaard, K.K. Bertelsen, L. Dalgaard, M. Nørremark. Conceptual and user-centric design guidelines for a plant nursing robot, Biosystems Engineering, Volume 105, Issue 1, 2010, Pages 119-129, ISSN 1537-5110,
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.10.002>.
11. Nathan D. Wallace, He Kong, Andrew J. Hill, Salah Sukkarieh. Motion Cost Characterisation of an Omnidirectional WMR on Uneven Terrains. IFAC PapersOnLine 52-22 (2019) 31–36
12. Lars Grimstad, Pål Johan From. Thorvald II - a Modular and Re-configurable Agricultural Robot. IFAC-PapersOnLine. Volume 50, Issue 1, July 2017, Pages 4588-4593 (<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1005>)
13. Hussain Nor Azmi, Sami Salama Hussien Hajjaj, Kisheen Rao Gsangaya et al., Design and fabrication of an agricultural robot for crop seeding, Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.191>
14. Mark Levin, Amir Degani. A conceptual framework and optimization for a task-based modular harvesting manipulator. Computers and Electronics in Agriculture. Volume 166, November 2019, 104987 (<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104987>)
15. Bart M. van Marrewijk, Bastiaan A. Vroegindeweij, Jordi Gené-Mola, Angelo Mencarelli, Jochen Hemming, Nikolaus Mayer, Maximilian Wenger, Gert Kootstra, Evaluation of a boxwood topiary trimming robot, Biosystems Engineering, Volume 214, 2022, Pages 11-27, ISSN 1537-5110, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.12.001>.

16. Sathiesh Kumar V, Gogul I, Deepan Raj M, Pragadesh S.K, Sarathkumar Sebastin J. Smart Autonomous Gardening Rover with Plant Recognition using Neural Networks. *Procedia Computer Science* 93 (2016) 975 – 981
17. Massimo Guiggiani. *The Science of Vehicle Dynamics: Handling, Braking, and Ride of Road and Race Cars*. Springer, 2014. 364 p.
(<https://doi.org/10.1007/978-94-017-8533-4>)
18. Patrick Kaltjob. *Mechatronic Systems and Process Automation: Model-Driven Approach and Practical Design Guidelines*. CRC Press, 2018. 468 p. (ISBN 978-0-8153-7079-6)
19. Juha Backman, Timo Oksanen, Arto Visala. Applicability of the ISO 11783 network in a distributed combined guidance system for agricultural machines. *Biosystems Engineering*. Volume 114, Issue 3, March 2013, Pages 306-317
20. Erkan Kayacan, Erdal Kayacan, Herman Ramon, Wouter Saeys. Towards agrobots: Identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 115, July 2015, Pages 78-87 (<https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.012>)
21. Wyatt McAllister, Denis Osipychiev, Adam Davis, Girish Chowdhary. Agbots: Weeding a field with a team of autonomous robots. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 163, August 2019, 104827
(<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.036>)
22. Giulio Reina, Annalisa Milella, Rocco Galati. Terrain assessment for precision agriculture using vehicle dynamic modelling. *Biosystems Engineering*. Volume 162, October 2017, Pages 124-139
(<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.025>)

23. Peter Corke. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB. 2nd ed. 2017. 697 p. (<https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7>)
24. John Billingsley, Peter Brett. Mechatronics and Machine Vision in Practice 3. Springer, 2018. - 270 p. (<https://doi.org/10.1007/978-3-319-76947-9>)
25. David Hall, Feras Dayoub, Tristan Perez, Chris McCool. A rapidly deployable classification system using visual data for the application of precision weed management. Computers and Electronics in Agriculture. Volume 148, May 2018, Pages 107-120 (<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.023>)
26. Wolfram Strothmann, Arno Ruckelshausen, Joachim Hertzberg, Christian Scholz, Frederik Langsenkamp, Plant classification with In-Field-Labeling for crop/weed discrimination using spectral features and 3D surface features from a multi-wavelength laser line profile system, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 134, 2017, Pages 79-93, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.003>.
27. Karl D. Hansen, Francisco Garcia-Ruiz, Wajahat Kazmi, Morten Bisgaard, Anders la Cour-Harbo, Jesper Rasmussen, Hans Jørgen Andersen. An Autonomous Robotic System for Mapping Weeds in Fields. 2013 IFAC Intelligent Autonomous Vehicles Symposium. The International Federation of Automatic Control. June 26-28, 2013. Gold Coast, Australia, p. 217-224
28. Trygve Utstumo, Frode Urdal, Anders Brevik, Jarle Dørum, Jan Netland, Øyvind Overskeid, Therese W. Berge, Jan Tommy Gravdahl, Robotic in-row weed control in vegetables, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 154, 2018, Pages 36-45, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.043>.

29. Ron Berenstein, Yael Edan. Human-Robot Cooperative Precision Spraying: Collaboration Levels and Optimization Function. 10th IFAC Symposium on Robot Control, September 5-7, 2012. Dubrovnik, Croatia
30. MATLAB for Engineers – Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics. Edited by Karel Perutka. Croatia. InTech, 2011, 519 p. (ISBN 978-953-307-914-1)
31. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношайка, М.Я. Островерхов. – К.: КПІ ім. Ігоря – Електронні текстові дані (1 файл: 2,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 198 с.
32. https://agalasale.in.ua/p1110726688-moschnyj-lazer-dlya.html?source=merchant_center&gclid=Cj0KCQjwpcOTBhCZARIsAEAYLuUw_zhsAThNqGGqkS4vC4E1ulYgigftwPqTlsbt2VyKW6gO_w-jfikaAlSlEALw_wcB
33. Siciliano, B., Khatib, O. (2016). Robotics and the Handbook. In: Siciliano, B., Khatib, O. (eds) Springer Handbook of Robotics. Springer Handbooks. Springer, Cham. 2259 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_1
34. Mordechai Ben-Ari, Francesco Mondada. Elements of Robotics. Springer, 2018. - 311 p. (<https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1>)
35. Martin Švejda, Arnold Jáger, Engineering based robot optimization methodology, IFAC-PapersOnLine, Volume 52, Issue 27, 2019, Pages 305-310, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.678>

36. Штеренлихт Д. Гидравлика (учебник для вузов). М.: Энергоатомиздат, 1984. - 640 с.
37. Autonomous farming devices, systems and methods : patent GB2583787A.
38. Agricultural robot system and method : patent US2011137456A1.
39. Coordinating agricultural robots : patent US11285612B2.
40. An agricultural smart robot device : patent AU2021101399A4.

Додаткові інформаційні ресурси

1. <https://www.deere.co.uk/en/agriculture/future-of-farming/>
2. <https://www.caseih.com/apac/en-sea/innovations/autonomous-farming>
3. https://www.researchgate.net/figure/Agricultural-field-robot-BoniRob-with-all-sensors-The-JAI-camera-is-mounted-inside-the_fig1_318656550
4. <https://www.naio-technologies.com/>
5. <https://sagarobotics.com/>
6. <https://www.naio-technologies.com/en/oz/>
7. <https://dailytechinfo.org/robots/7568-bonirob-selskohozyaystvennyy-robot-kompanii-bosch-kotoryy-boretsya-s-sornyakami-zabivaya-ih-nazad-v-zemlyu.html>
8. <https://confluence.acfr.usyd.edu.au/display/AGPub/Our+Robots>
https://arduino-geek.pp.ua/product/esp32-cam-ov2640-wifi-bluetooth/?gclid=CjwKCAiAgbiQBhAHEiwAuQ6Bkre-jt2M50r2N3GoborU3uiQzBWAaWN22MuTKdXxj9bOpJshSGswIRoCxN8QAvD_BwE
9. <https://grdc.com.au/resources-and-publications/grdc-update-papers/tab-content/grdc-update-papers/2018/02/implications-of-robotics-and-autonomous-vehicles>
10. <https://www.facebook.com/100051633701824/posts/172562131141576/>

11. <https://www.facebook.com/100051633701824/posts/176657810732008/?sfn=mo>

**ДОДАТОК А. Конструкторська документація на проєкт
“Автономний сільськогосподарський робот FLIBot 2.0”**

**ДОДАТОК Б. База патентного пошуку за запитом
"agricultural robot"**

ДОДАТОК В. Матеріали презентації