

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет конструювання та дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**В.о. завідувача кафедри
технічного сервісу та інженерного
менеджменту імені
М. П. Момотенка**

_____ **Руслан ШАТРОВ**

«_____» _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «Розробка конструкції наземного колісного агродрону для
закритих тепличних приміщень»** _____

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Гарант освітньої програми

_____ **д.т.н., професор**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ **Володимир БУЛГАКОВ**
(підпис) (ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

_____ **д.т.н., професор** _____ **Роговський Іван Леонідович**

Виконав

_____ **Новгородцев Єгор Олегович**

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

технічного сервісу та інженерного менеджменту
імені М. П. Момотенка

Іван РОГОВСЬКИЙ

(підпис)

(ПІБ)

« ____ » _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Новгородцев Єгору Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи «Розробка конструкції наземного колісного агродрону для закритих тепличних приміщень»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «15» квітня 2026 р. № 1043
«С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 20 травня 2026 року
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до дипломного проекту бакалавра Матеріали первинного бухгалтерського обліку, нормативно-методичні матеріали, науково-технічна література

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Характеристика господарства
2. Аналіз існуючих методів та засобів конструкції колісної шасі наземного агродрону для закритих тепличних приміщень
3. Розрахунок основних параметрів обслуговуючої майстерні
4. Конструктивна частина
5. Економічне обґрунтування проекту
6. Охорони праці

Перелік графічних документів: **Електронна презентація на 14 слайдів**

Дата видачі завдання «06» січня 2026 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

(підпис)

Роговський І.Л.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Новгородцев Є.О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка містить 71 сторінки та 52 рисунків.

Бакалаврський проєкт присвячений розробці конструкції колісного шасі наземного агродрону для закритих тепличних приміщень під час збирання врожаю. Актуальність роботи обумовлена необхідністю впровадження сучасних роботизованих систем у сільськогосподарське виробництво для підвищення ефективності контролю технологічних процесів та зменшення втрат урожаю.

У роботі проведено аналіз сучасних конструкцій наземних роботизованих платформ і агродронів, досліджено умови їх експлуатації в польових умовах та визначено основні вимоги до мобільної платформи для моніторингу втрат збіжжя. Виконано обґрунтування конструктивної схеми колісного шасі, розроблено компонування основних вузлів та агрегатів, а також проведено розрахунок основних параметрів ходової частини.

У конструкторській частині проєкту розроблено конструкцію рами, колісного рушія та елементів кріплення обладнання моніторингу. Виконано перевірочні розрахунки на міцність і жорсткість основних елементів конструкції, розроблено складальне креслення колісного шасі та деталювання окремих вузлів.

Проведено техніко-економічне обґрунтування запропонованої конструкції, яке підтвердило доцільність її використання для автоматизованого контролю втрат зерна після проходу зернозбиральних комбайнів. Розроблено заходи з охорони праці та безпечної експлуатації мобільної роботизованої платформи.

Результати роботи можуть бути використані під час створення вітчизняних мобільних роботизованих систем для потреб точного землеробства, автоматизованого моніторингу посівів та оцінювання якості виконання збиральних робіт.

Ключові слова: наземний агродрон, колісне шасі, мобільна роботизована платформа, моніторинг втрат збіжжя, точне землеробство, галузеве машинобудування, проєктування машин, ходова частина, рама, конструювання.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА	8
1.1 Загальна характеристика мобільної робототехніки	8
1.1.1 Історія розвитку мобільних роботів	8
1.1.2 Класифікація мобільних роботів	10
1.1.3 Особливості колісних платформ	12
1.2 Актуальність завдань автономного руху	13
1.2.1 Галузі застосування	14
1.2.2 Значення здатності до виявлення та уникнення перешкод	16
1.3 Методи та підходи до навігації мобільних роботів	17
1.3.1 Кінематика колісних платформ	17
1.3.2 Основні принципи навігації	19
1.3.3 Огляд сенсорів	19
1.4 Алгоритми уникнення перешкод	22
1.4.1 Метод штучного потенціального поля	23
1.4.2 Алгоритми пошуку шляху	24
1.4.3 Порівняння ефективності	25
1.5 Аналіз існуючих розробок	25
1.5.1 Приклади комерційних роботів з автономною навігацією	25
1.5.3 Переваги і недоліки існуючих систем	28
1.6 Задачі до виконання у бакалаврському проєкті	30
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ВИКОНАВЧОЇ ЧАСТИНИ МОБІЛЬНОГО КОЛІСНОГО РОБОТА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВТРАТ ЗБІЖЖЯ	33
2.1 Обґрунтування конструкції виконавчої частини	33
2.2 Структурна схема керування мобільного колісного робота	37
2.3 Вибір елементної бази для прототипу мобільного робота	37
2.3.1 Вибір сервопривода	41
2.3.2 Вибір плати керування	44
2.3.4 Вибір двигунів	44
2.3.5 Вибір системи живлення	47

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	51
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	56
4.1 Загальні положення	56
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів	57
4.3 Заходи щодо забезпечення безпеки праці	58
4.4 Пожежна безпека	60
4.5 Вимоги безпеки під час експлуатації мобільного робота	59
4.6 Висновки до розділу 4	62
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	63
5.1 Техніко-економічні показники проєкту	63
5.2 Визначення витрат на виготовлення конструкції	66
5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження	64
5.4 Висновки до розділу 5	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69

ВСТУП

Сучасний розвиток агропромислового комплексу України характеризується активним впровадженням технологій точного землеробства, автоматизованих систем керування та роботизованих технічних засобів. Одним із пріоритетних напрямів цифровізації сільського господарства є використання автономних мобільних платформ для моніторингу стану посівів, контролю технологічних процесів та оцінювання ефективності роботи збиральної техніки.

Важливим показником якості виконання збиральних робіт є рівень втрат зерна під час збирання врожаю. Несвоєчасне виявлення підвищених втрат призводить до значних економічних збитків сільськогосподарських підприємств. Традиційні методи контролю втрат збіжжя базуються переважно на ручних вимірюваннях, що потребують значних затрат часу та трудових ресурсів, а також не забезпечують оперативного отримання інформації про якість роботи зернозбиральних комбайнів.

Одним із перспективних шляхів вирішення зазначеної проблеми є застосування наземних агродронів – автономних роботизованих платформ, здатних здійснювати моніторинг поверхні поля, збір інформації про втрати зерна, передачу даних оператору та інтеграцію з інформаційними системами точного землеробства. Ефективність роботи таких систем значною мірою залежить від конструкції мобільної платформи, її прохідності, стійкості, маневреності та надійності функціонування в складних польових умовах.

Особливого значення набуває розробка конструкції колісного шасі наземного агродрону, оскільки саме ходова частина забезпечує рух мобільної платформи по стерні, рослинних рештках та нерівностях ґрунту. Раціональне проєктування рами, колісного рушія та приводу дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики агродрону, знизити енергоспоживання та забезпечити стабільність його роботи під час виконання технологічних завдань. У зв'язку з цим тема бакалаврського проєкту, присвячена розробці конструкції колісного шасі наземного агродрону для моніторингу втрат

збіжжя, є актуальною та має важливе практичне значення для розвитку сучасного сільськогосподарського машинобудування.

Метою роботи є розробка конструкції колісного шасі наземного агродрону для моніторингу втрат збіжжя шляхом обґрунтування його конструктивних параметрів та технічних характеристик, що забезпечують ефективне функціонування мобільної платформи в умовах сільськогосподарського виробництва.

Об'єктом дослідження є конструкція та процес функціонування колісного шасі наземного агродрону.

Предметом дослідження є конструктивні параметри рами, ходової частини, колісного рушія та приводу мобільної роботизованої платформи для моніторингу втрат збіжжя.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних конструкцій наземних роботизованих платформ для аграрного сектору;
- дослідити умови експлуатації агродрону в польових умовах;
- обґрунтувати конструктивну схему колісного шасі;
- виконати розрахунок основних параметрів ходової частини;
- розробити конструкцію рами та основних вузлів мобільної платформи;
- виконати перевіірочні розрахунки на міцність і жорсткість елементів конструкції;
- розробити комплект конструкторської документації;
- провести техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень;
- розробити заходи з охорони праці та безпечної експлуатації агродрону.

Практичне значення роботи полягає у створенні конструкції мобільної роботизованої платформи для автоматизованого моніторингу втрат зерна, яка може бути використана в системах точного землеробства для підвищення ефективності контролю збиральних робіт та зменшення втрат урожаю.

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

1.1 Загальна характеристика мобільної робототехніки

1.1.1 Історія розвитку мобільних роботів

Мобільний робот – це автоматизований машинний пристрій, який самостійно виконує поставлені задачі. Ця роботизована система об'єднує в собі датчики, компоненти віддаленого керування та автономні мобільні модулі. Такий пристрій може виконувати функції людей в суворих та небезпечних (наприклад, радіація) середовищах. Порівняно зі стандартними роботами він має більшу мобільність і гнучкість для роботи в зонах недоступних для людини [1].

Історія мобільних роботів починається з розробки першого автономного мобільного робота на ім'я Shakey (рис.1.1, [2]), здатного сприймати і впливати на своє оточення. Він був створений наприкінці 1960-х років під керівництвом двох винахідників Чарльза Розена та Нільса Нільсенна у Стенфордському дослідницькому інституті (SRI). Основна ціль була дослідженням і застосування штучного інтелекту для забезпечення самостійного аналізу, планування та керування роботизованими комплексами в умовах складних і змінних середовищах [1-2].



Рисунок 1.1 – Мобільний робот Shakey з Чарльзом Розеном

Важливий внесок у розвиток мобільних роботів зробив американський математик Норберт Вінер, оскільки ним була розроблена наука кібернетика. Ця галузь знань відіграє важливу роль у розвитку інтелектуальних роботів. Американський інженер-електрик Клод Елвуд Шеннон став засновником теорії інформації. У 1950 році він створив механічну мишу здатну пересуватись в лабіринті, яка керувалась схемою електромеханічного реле.

«Миша Шеннона» (зображена на рис. 1.2, [2]) вважається першопрохідцем у галузі штучних навчальних систем [2].

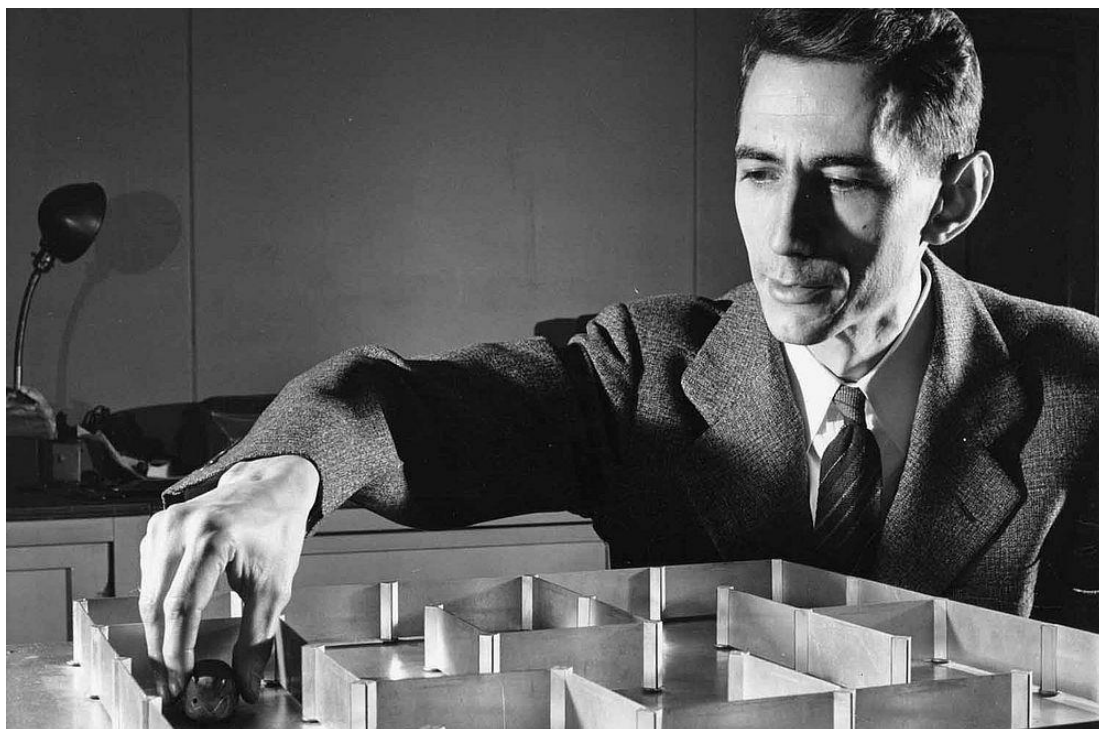


Рисунок 1.2 – «Миша Шеннона»

Розвиток програмування, електроніки, штучного інтелекту та комп'ютерних технологій сприяє створенню все більш досконалих мобільних роботів у галузі робототехніки. На сьогоднішній день автономні роботи знаходять застосування у побуті та промисловості. На зараз найдосконалішим та найрозумнішим вважається людиноподібний робот

«Амеса» (рис.1.3), який був розроблений компанією Engineered Arts. Цей робот оснащений передовими технологіями завдяки яким він може розпізнавати людей за обличчям за допомогою високоточних камер. Також

«Амеса» вміє підтримувати розмову, аналізуючи мову співрозмовника в реальному часі. Особливо вражає його здатність природньо проявляти емоції з використанням рук та імітації виразу обличчя [2-3].

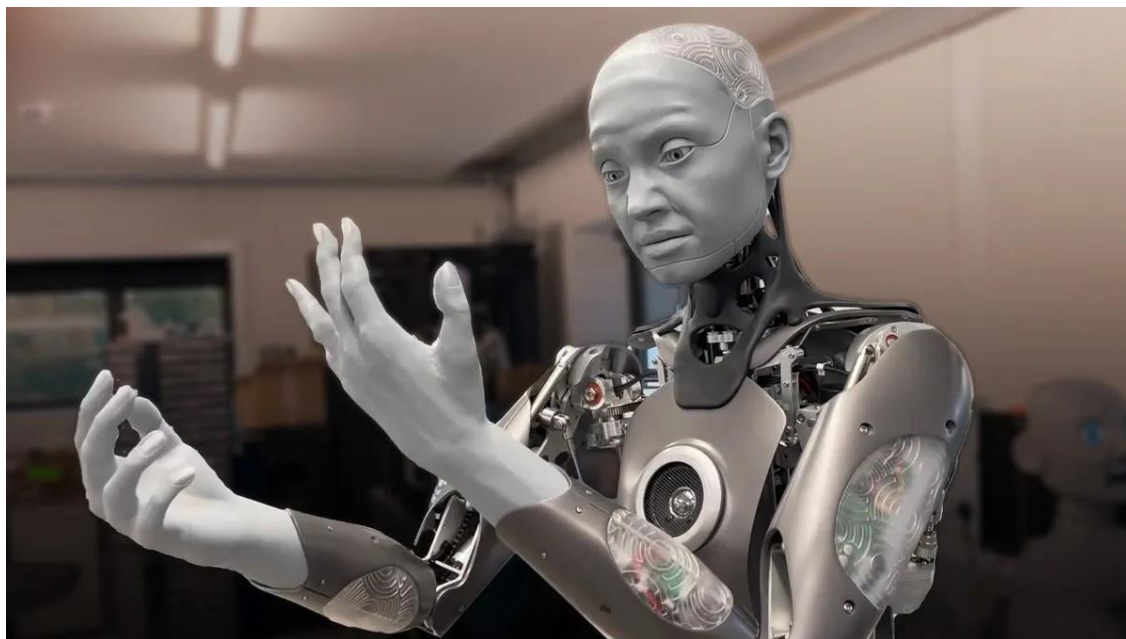


Рисунок 1.3 – Гуманоїдний робот «Амеса» [3]

1.1.2 Класифікація мобільних роботів

Використовуються різні мобільні роботи, залежно від типу поставленої задачі та з урахуванням всіх недоліків і переваг. Між собою вони відрізняються за середовищем функціонування, способом пересування та конструктивними особливостями [1]. В таблиці 1.1 наведена класифікація за середовищем функціонування.

Таблиця 1.1 – Класифікація мобільних роботів за середовищем функціонування

Середовище функціонування	Опис
Наземні	Колісні, гусеничні, крокуючі
Водні	Надводні та підводні
Повітряні	Керовані або автономні дрони

За способом пересування робототехнічні пристрої поділяються на [4]:

- Колісні (рис. 1.4, а) – мають просту конструкцію та підходять для пересування по рівних поверхнях.
- Гусеничні (рис. 1.4, б) – менш енергоефективні, але забезпечують чудову прохідність у складних умовах.
- Крокуючі (рис. 1.4, в) – імітують рух живих істот, відзначаються складністю конструкції та управління, однак можуть долати складні перешкоди.



а)



б)



в)

Рисунок 1.4 – Види наземних роботів: а) колісні; б) гусеничні; в) крокуючі
[5-7].

- Літаючі (рис. 1.5) – керовані або автономні дрони, які чудово підходять для завдань спостереження або доставки.



Рисунок 1.5 – Літаючі автономні дрони [7].

- Плаваючі (рис. 1.6) – роботи які виконують задачі різного типу на воді.



Рисунок 1.6 – плаваючий безпілотною для занять водними видами спорту, фотографією, рибалкою, науковими дослідженнями [8].

1.1.3 Особливості колісних платформ

Найпопулярніший метод пересування у мобільних роботах – це колісні платформи. Колеса бувають будь-якого розміру залежно від задачі використання, вони можуть сягати від кількох сантиметрів і до 30 або більше.

Існують декілька типів платформ, найпоширеніші з них триколісні та чотириколісні. Перші з них мають два основних колеса з приводами, які забезпечують рух пристрою та на іншому кінці поворотний ролик. Такі мобільні роботи змінюють свій напрямок шляхом зміни швидкості обертання коліс. Рульове керування суттєво ускладнює реалізацію роботи через необхідність використання додаткових компонентів, що також призводить до зростання загальної вартості. Іноді зустрічається двоколісна платформа, що вимагає гіроскопічну стабілізацію для утримання рівноваги, однак реалізація такого рішення є також складною [9].

Використання чотирьох або більше коліс з окремими приводами для кожного з них мають деякі переваги. Така конструкція забезпечує кращий контроль над рухом, зменшує ризик пробуксовування та краще адаптується до змін рельєфу і здатна долати більші перешкоди. Зменшення ковзання досягається за допомогою рівномірного розподілу навантаження на кожен привід. У порівнянні з гусеничними або іншими механізмами, ці платформи вирізняються простим дизайном, меншою масою та більшою енергоефективністю [10]. Отже багатоколісні мобільні роботи є оптимальним вибором для задач, що вимагають стабільності та точного контролю руху.

1.2 Актуальність завдань автономного руху

Автономні мобільні роботи сьогодні відіграють важливу роль в сучасному світі. Вони можуть самі вирішувати що робити і підлаштовуються під ситуацію, наприклад, якщо відбулись зміни в оточенні то їм не потрібне корегування від людини. Це значно зменшує кількість помилок та підвищує продуктивність.

Використання таких роботів допомагає зменшити витрати на їх керування та обслуговування, що безумовно є плюсом на великих підприємствах. Скажімо, вони можуть возити вантажі або виконувати просту роботу без нагляду оператора. Також автономні комплекси спроможні працювати із штучним інтелектом, який дає їм змогу «навчатись», що

призводить до їх покращенню. Це відкриває нові можливості для їхнього застосування в логістиці, медицині, сільському господарстві, промисловості та військовій справі.

1.2.1 Галузі застосування

Сьогодні мобільні роботи все частіше використовують у різних сферах, бо вони можуть працювати самостійно, легко підлаштовуються під умови й здатні виконувати багато різних завдань. Тут розглянемо, де саме їх застосовують і чим вони корисні для сучасних технологій.

У логістиці роботи стали застосовуватись все частіше. Їх використовують на складах і в транспорті, вони допомагають автоматизувати рутинну роботу, яку раніше виконували люди. Наприклад, платформи-роботи перевозять вантажі, сортують товари або проводять інвентаризацію. Такі системи можуть працювати без зупинок — і вдень, і вночі, що дуже зручно для великих логістичних центрів. До того ж, вони підвищують безпеку на робочому місці: замість людей роботи виконують важку або небезпечну роботу, зменшуючи навантаження на персонал [11]. На рис. 1.7 зображено приклад роботи, що виконує завдання перевезення товарів у складському приміщенні[12].



Рисунок 1.7 – Приклад роботи, що виконує завдання перевезення товарів у складському приміщенні

Передова медицина все тісніше зв'язується з новітніми технологіями. Використання інноваційних пристроїв та комп'ютерів стало звичним у сфері

охорони здоров'я. Розвиток медичної робототехніки одне з найважливіших досягнень у цій галузі. Роботизовані системи можуть допомагати у реабілітації пацієнтів, виконувати різні діагностичні процедури, здійснювати доставку медикаментів та проводити складні операції з високою точністю.

Новітні медичні установи активно впроваджують роботів-медсестер та медбратів і пристрої телеприсутності для дистанційного контакту з лікарем. Японські медичні центри вже тривалий час використовують санітарних роботів компанії Panasonic (див. рис. 1.8). Такі роботизовані комплекси на колісних платформах здатні вимірювати пульс, температуру, контролювати час прийому медикаментів, підтримувати зв'язок з лікарем та своєчасно сповіщати про проблемні ситуації і що в такому разі робити [13].



Рисунок 1.8 – Робот санітар компанії Panasonic

Мобільні роботи вже стали важливою частиною сучасної армії. Їх використовують для зменшення ризиків для військових, підвищення точності під час бойових дій і збору розвідданих. Такі машини можуть працювати там, де людині було б небезпечно або важко пройти — вони допомагають знаходити вибухівку, перевіряти територію й виконувати інші небезпечні завдання.

Особливо корисними є роботизовані наземні платформи. Вони можуть перевозити обладнання, вивозити поранених із зони бою, а іноді навіть

відкривати вогонь, якщо є загроза. Такі роботи оснащують камерами, тепловізорами, сенсорами руху — це дозволяє їм бачити вночі, виявляти ворога й передавати важливу інформацію без участі людини [14]. На рис. 1.9 зображено український робот для евакуації людей «Ratel H» [14].



Рисунок 1.9 – Український робот для евакуації людей «Ratel H»

1.2.2 Значення здатності до виявлення та уникнення перешкод

У мобільній робототехніці дуже важливо, щоб роботи самі бачили перешкоди на своєму шляху і могли їх обійти. Це дозволяє їм безпечно рухатися, підлаштовуватись під зміну умов і продовжувати виконувати свої завдання без зупинок чи зіткнень.

Механізми виявлення перешкод базуються на використанні різноманітних сенсорів – інфрачервоних, ультразвукових, камер, лідарів. Інформація, що надходить від датчиків може корегувати траєкторію робота для оминання перешкод. Обчислений маршрут переміщення інтелектуального пристрою залежить як від даних, отриманих із датчиків, так і від заданої цільової позиції та поточного розташування відносно кінцевої точки призначення [15].

Робот, який може обходити об'єкти в динамічному або статичному русі стає більш універсальним і придатним для виконання різних задач. Додатково,

подібні можливості зменшують необхідність в постійному контролі з боку людини [15].

Таким чином, наявність ефективної системи виявлення та уникнення перешкод одночасно підвищує рівень автономності і забезпечує стабільну та безпечну експлуатацію роботизованих систем. Наразі ця технічна особливість стає стандартною вимогою для мобільних роботів, працюючих в складних та змінних середовищах.

1.3 Методи та підходи до навігації мобільних роботів

1.3.1 Кінематика колісних платформ

Кінематики мобільних роботів визначає зв'язок між обертанням коліс та переміщенням всієї платформи у просторі. Серед численних мобільних конструкцій найбільш поширеним і простим варіантом виступає диференціальний колісний робот, який має два незалежно керованих провідних колеса, та додаткову точку опори у вигляді ролика (рис. 1.10, [16]) [16].

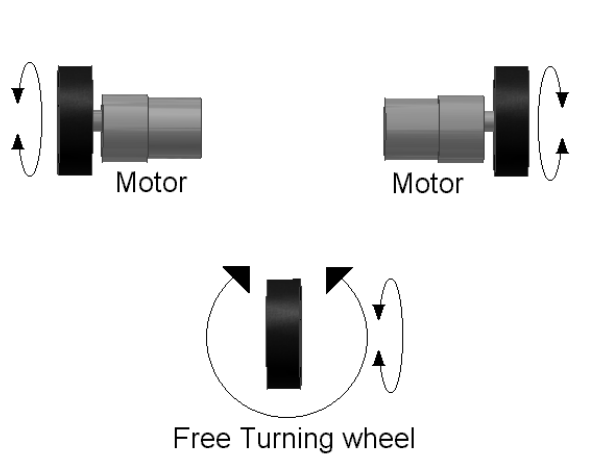


Рисунок 1.10 – Триколісний робот з диференціальним керуванням.

Завдяки зміні напрямку обертання коліс така система може повертатися на місці, а не лише рухатись вперед чи назад. Якщо обидва колеса обертаються в одному напрямку з однаковою швидкістю, робот рухається прямо. Коли

колеса обертаються в протилежних напрямках, то робот обертається навколо центральної осі.

На рисунку 1.11 зображено схему кінематики мобільного колісного робота з диференціальним приводом [16]. Модель описується на базі двох основних систем координат: глобальній системі $(x; y)$, котра фіксує положення робота у просторі, та локальній системі координат $(x_Q; y_Q)$, центр якої розташований у точці Q , що відповідає середині відстані між провідними колесами [17].

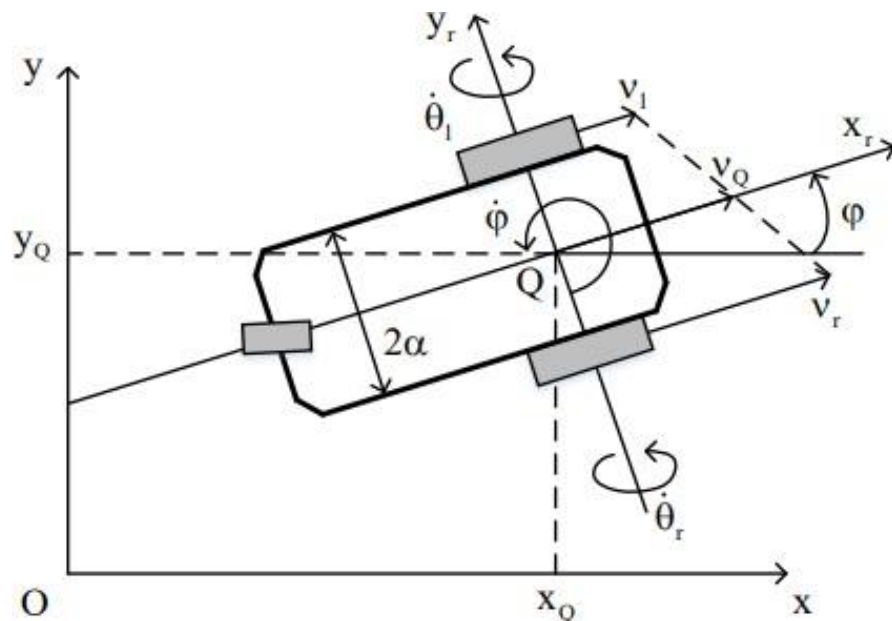


Рисунок 1.11 – Кінематична схема мобільного колісного робота з диференціальним приводом.

Орієнтація робота у глобальній системі координат задається кутом φ – це напрям осі x_Q відносно осі x . Колеса розташовані симетрично від центра Q , на відстані $2a$ одне від одного. Кожне колесо має свою лінійну швидкість: для лівого – v_l , а для правого – v_r . Слід зазначити, що кожне колесо також може мати власну кутову швидкість обертання навколо своєї осі, позначену як θ_l та

θ_r відповідно. Рух робота визначається комбінацією цих швидкостей і в загальному випадку він описує дугу на площині [17].

Кінематика відіграє вирішальну роль у створенні систем управління роботів, адже саме вона забезпечує точне прогнозування траєкторій руху та ефективну інтеграцію алгоритмів навігації.

1.3.2 Основні принципи навігації

В автономних мобільних роботах навігація грає найголовнішу роль, так як вона забезпечує відстеження та регулювання переміщення об'єкта з початкової точки в кінцеву. В роботизованих комплексах навігаційна система невід'ємна складова програмного забезпечення, що надає просторову орієнтацію. Завдяки даних, які надходять від сенсорів ця система приймає рішення щодо подальших дій, формує алгоритми для конструювання найкоротших маршрутів і для уникнення зіткнень. Зазвичай принципи навігації поділяються на три основні типи: пряме керування, слідкування за територією та поведінкове управління. При прямому керуванні робот реагує на сигнали від сенсорів без складного планування. У другому випадку він рухається по заздалегідь визначеному маршруту, а в третьому – обирає маршрут руху на основі умов середовища, завдяки чому може адаптуватись до змін. Ефективна система навігація це та, яка здатна пристосовуватись до зміни умов функціонування. Вміння об'єднувати різні підходи дуже характерна для сучасної навігації: коли локальні рішення (уникнення перешкод) поєднуються з глобальним плануванням маршруту до визначеної точки. Окрім всього вище сказаного активно впроваджується штучний інтелект в системи керування рухом. Це дає можливість реалізувати самонавчальні системи навігації, які будуть самостійно адаптуватись з накопиченням досвіду при взаємодії з новими умовами експлуатації [18].

1.3.3 Огляд сенсорів

Сенсори (датчики) [19] – це технологічні пристрої, якими робот бачить зовнішній світ. Роботи використовують сенсори для вимірювання та розуміння геометричних і фізичних величин об'єктів, що їх оточують. Для виявлення перешкод можна відокремити чотири типи датчиків: ультразвукові,

інфрачервоні та камери [19].

Ультразвуковий датчик випромінює високочастотні звукові хвилі, які відбиваються від об'єкта і приймаються датчиком. Вимірюючи час цього процесу робиться висновок щодо відстані до об'єкта. Частота цих звукових хвиль вище верхньої межі людського слуху тому вони безпечні і не викликають дискомфорт. Ультразвукові сенсори відрізняються своєю надійністю в умовах різного освітлення. Вони залишаються нечутливими до таких факторів як: дим, пил, властивості матеріалів. Особливо ефективні вимірювачі при контактуванні з прозорими об'єктами, в той час коли оптичні технології можуть працювати некоректно. Однак є один недолік пов'язаний з використанням ультразвуку, дуже м'які матеріали можуть поглинати його і елемент зчитування інформації буде показувати неправильні значення [20]. На рис. 1.12 зображено принцип роботи ультразвукового датчика HC-SRO4 [21].

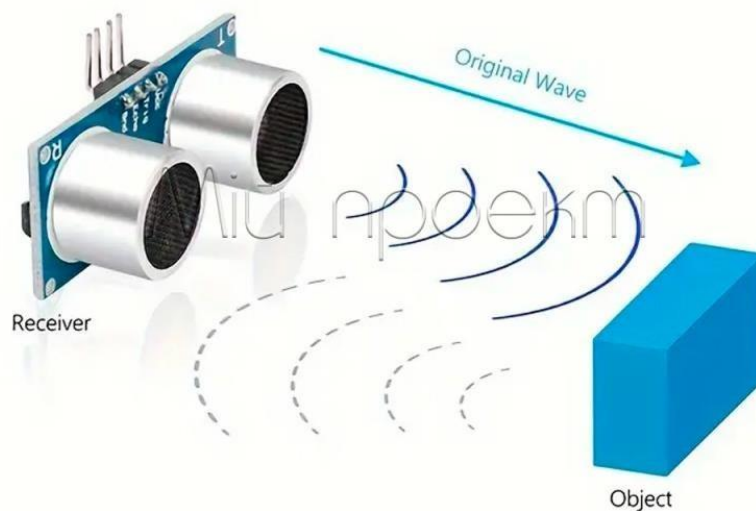


Рисунок 1.12 – Принцип роботи ультразвукового датчика HC-SRO4

Інфрачервоний датчик заснований на використанні теплового випромінювання, яким наділені всі об'єкти. Варто зазначити, що сам сенсор не виділяє теплове випромінювання, а реагує на його зміну в зоні своїх дій [22]. Принцип роботи інфрачервоного датчика зображено на рис. 1.13.

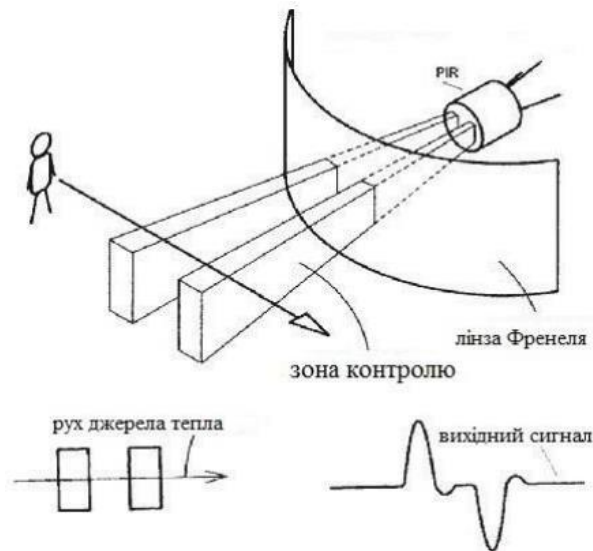


Рисунок 1.13 – Принцип роботи інфрачервоного датчика [23]

Конструкція датчика включає пару чутливих елементів, які фіксують рівень ІЧ-випромінювання. Перед кожним з них розміщена лінза Френеля, яка фокусує спрямовані на датчик інфрачервоні хвилі. Зазвичай конструкція сенсора створена так, що навколишній світ розділений між двома лінзами, кожна з яких спрямовує теплове випромінювання на власний чутливий елемент. Працює це наступним чином: при звичайних умовах рівень випромінювання, що надходить на обидві частини пристрою рівнозначний, але коли з'являється об'єкт, то він спочатку фіксується однією частиною датчика, створюючи різницю між показниками двох чутливих елементів. На підставі цієї різниці датчик «бачить» наближення об'єкта [23].

Вибір цифрової відеокамери має великий вплив на структури всієї системи навігації. У сфері мобільної робототехніки значного поширення набули стереокамери (див. рис. 1.14), оснащені двома об'єктивами, розташованими на певній відстані один від одного для створення двох зображень одночасно. За допомогою різниці між знімками встановлюється відстань до об'єкта [24].



Рисунок 1.14 – Приклад стереокамери [25]

При розробці навігаційних систем на основі візуальних даних варто враховувати потенційні похибки, які можуть виникнути через оптичне спотворення зображення чи некоректне зчитування світлових сигналів матрицею цифрової камери. Щоб уникнути цих похибок застосовуються цифрові фільтри здатні суттєво зменшити або повністю усунути помилку, обумовлену специфікою роботи цифрової камери [24].

1.4 Алгоритми уникнення перешкод

Один з найпростіших методів уникнення перешкод у мобільній робототехніці – це просте реагування на сигнали від сенсорів. Такі алгоритми включають: зупинка у разі виявлення перешкоди, зміна напрямку руху та відступ назад. Принцип дії таких систем обумовлюється використанням сенсорів відстані (наприклад ультразвуковий), які постійно сканують простір навколо. У разі виявлення об'єкта на мінімальній визначеній відстані, мікроконтролер починає виконувати заздалегідь задану реакцію. Наприклад, коли попереду з'являється перешкода, робот зупиняється, проводить аналіз в яку сторону йому потрібно повернути, здає назад та відновлює рух у безпечному напрямку. Така нескладна логіка створює просту, але надійну систему уникнення зіткнень.

1.4.1 Метод штучного потенціального поля

Метод потенціального поля полягає у створенні поля з точкою призначення і перешкодами. Робот вважається частинкою і рухається в цьому полі до точки призначення, яке створює потенціал притягування, в той час як перешкоди створюють потенціал відштовхування (рис.1.15). Його ще називають полем векторних сил [26].

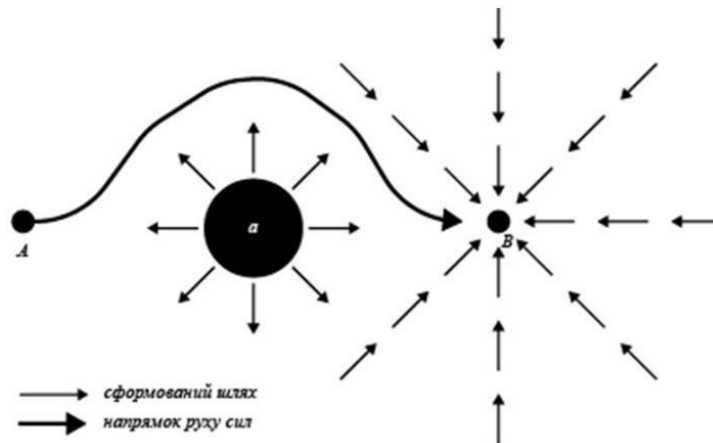


Рисунок 1.15 – Формування шляху мобільного робота через штучне потенціальне поле. A – робот; B – точка призначення; a – перешкода [27]

Головною перевагою цього методу є простота у виконанні, а серед недоліків вирізняється незручність у застосування для динамічних середовищ та існування локальних мінімумів потенціалів, що може спричинити неможливість досягнення кінцевого призначення. Тоді був запропонований метод в якому робот розраховує сили, які впливають на його рух не лише з огляду щодо його положення, але й з урахуванням його швидкості. Це дає змогу краще реагувати на зміну умов руху. Для того щоб уникнути ситуації коли робот застрягає біля перешкоди, система вимикає силу відштовхування, якщо точка призначення знаходиться між роботом і перешкодою. У такому випадку робот продовжує рух до цілі ігноруючи перешкоду [27].

1.4.2 Алгоритми пошуку шляху

Ще один тип алгоритмів, який широко використовується в робототехніці – це алгоритми пошуку шляху [28]. Вони призначені для вирішення задач по знаходженню найкоротшої дороги від однієї точки до іншої у визначеному просторі. Тут буде розглянуто три основних методів планування маршруту: Dijkstra, A*, D*.

Алгоритм Dijkstra названий на честь нідерландського науковця у галузі комп'ютерних наук Едсгера Вібе Дейкстра [29]. Ідея цього алгоритму полягає в знаходженні найкоротшого шляху в графі (середовище в якому рухається роботизована система), в якому значення кожного з ребер (відстань між об'єктами в графі) має різні значення. Головна перевага в тому, що він працює у визначених умовах та здатен покращувати точки маршруту при виявленні кращого шляху до них. Проте основним недоліком цього методу є неврахування напрямку до кінцевої точки призначення [30].

Алгоритм A* вважається найкращим для пошуку найкращих шляхів в графі. Він увібрав у себе з алгоритму Дейкстри врахування довжини попереднього шляху та використання та сукупність методів пошуку розв'язку задачі. A* вибирає вузли, які найімовірніше ведуть до найкоротшого маршруту, що проходить через поточний об'єкт. Він також уникає ділянок, де пересування складніше через велику відстань і може справлятися з проблемами, коли є ризик зациклення [31].

Алгоритм D* розроблений як удосконалення A* для ситуацій, коли інформація про графу змінюється або відкривається поступово. Його основна перевага полягає в здатності адаптувати маршрут під час руху робота. На відміну від A*, який запускається всього один раз і знаходить найкоротший шлях на основі початкової інформації, D* перераховує маршрут в реальному часі одразу як з'являються нові перешкоди. Таким чином, ефективний маршрут до точки призначення оновлюється без необхідності повного обчислення шляху з нуля [32].

1.4.3 Порівняння ефективності

Використовуючи інформацію з попередніх підрозділів можна скласти таблицю порівняння ефективності алгоритмів оминання перешкод (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Порівняння ефективності алгоритмів оминання перешкод

Метод	Просте реагування	Потенціальне поле	Dijkstra, A*, D*.
Реакція на зміну середовища	Висока	Середня	Висока (для D*)
Обчислювальна складність	Низька	Середня	Висока
Точність	Низька	Середня	Висока
Гнучкість	Низька	Середня	Висока
Потреба в сенсорах/карті	Мінімальна (сенсори)	Потрібна карта або локалізація	Обов'язкова карта

1.5 Аналіз існуючих розробок

1.5 Аналіз існуючих розробок

Стрімкий розвиток цифрових технологій та концепції точного землеробства сприяє активному впровадженню роботизованих систем у сільськогосподарське виробництво. Одним із перспективних напрямів є використання автономних наземних платформ для моніторингу стану посівів, контролю технологічних операцій та збору інформації про якість виконання польових робіт. Особливий інтерес становлять мобільні роботизовані системи, здатні здійснювати автоматизований контроль втрат збіжжя після проходу зернозбиральних комбайнів.

На сучасному етапі розвитку аграрної робототехніки провідні виробники пропонують широкий спектр автономних платформ різного призначення. Серед найбільш відомих можна виділити роботизовані системи компаній Naïo Technologies, AgXeed, Agointelli, FarmDroid, EarthSense та інших. Дані платформи використовуються для міжрядного обробітку,

моніторингу посівів, внесення засобів захисту рослин та виконання інших технологічних операцій.

Аналіз конструкцій існуючих наземних агродронів показує, що більшість із них побудовані за модульним принципом і складаються з рами, ходової частини, системи приводу, енергетичного модуля, навігаційного обладнання та комплексу датчиків. Найпоширенішими є колісні та гусеничні схеми ходової частини.

Колісні платформи характеризуються простотою конструкції, невеликою масою, високою швидкістю пересування та меншими енергетичними витратами. Водночас їхня прохідність значною мірою залежить від стану поверхні поля та конструктивних параметрів ходової частини.

Гусеничні платформи мають кращі показники прохідності та менший питомий тиск на ґрунт, однак відзначаються більшою складністю конструкції, підвищеною масою та вартістю виготовлення.

Для виконання завдань моніторингу втрат збіжжя найбільш доцільним є використання колісної схеми, оскільки вона забезпечує достатню прохідність при порівняно невеликій масі конструкції та низькому енергоспоживанні.

Проведений аналіз показав, що більшість існуючих роботизованих платформ орієнтовані на виконання агротехнічних операцій і не призначені безпосередньо для визначення втрат зерна після проходу збиральної техніки. Крім того, значна частина закордонних розробок має високу вартість та потребує адаптації до умов експлуатації вітчизняних господарств.

Основними недоліками існуючих конструкцій є:

- висока вартість обладнання;
- складність конструкції систем керування;
- недостатня адаптованість до роботи на стерні після збирання зернових культур;
- обмежена автономність;
- відсутність спеціалізованих засобів моніторингу втрат зерна;
- складність технічного обслуговування та ремонту.

Аналіз сучасних розробок дозволив сформулювати основні вимоги до конструкції колісного шасі наземного агродрону для моніторингу втрат збіжжя:

- забезпечення стійкого руху по стерні та нерівностях поля;
- висока маневреність у міжряддях та на розворотних смугах;
- низький питомий тиск на ґрунт;
- можливість встановлення систем комп'ютерного зору та датчиків

контролю втрат;

- простота конструкції та обслуговування;
- висока надійність роботи в польових умовах;
- модульність конструкції для можливості модернізації.

Таким чином, аналіз існуючих розробок свідчить про доцільність створення спеціалізованого наземного агродрону з колісним шасі, конструкція якого буде адаптована до умов моніторингу втрат збіжжя та забезпечуватиме високу ефективність роботи в системах точного землеробства. Саме це стало підставою для вибору напряму подальших досліджень і розроблення конструкції мобільної роботизованої платформи в межах даного бакалаврського проекту.

1.5.1 Проекти з відкритим кодом (Open Source Hardware)

Серед ключових відкритих рішень можна зазначити проект ArduPilot, зокрема його напрямки ArduRover [33]. В онлайн сховищі проекту GitHub ArduPilot наявні програмне забезпечення, схеми обладнання та документація. Це дозволяє навіть початківцям створити власного автономного мобільного робота. Проект підтримує різноманітні алгоритми переміщення, включаючи просте оминання перешкод і рух за заданим маршрутом [33].

Також платформа ROS (Robot Operating System), яку підтримує Open Source Robotics Foundation, здобула значної популярності. Вона забезпечує модульність, гнучкість та можливість об'єднання з різноманітними сенсорами та алгоритмами навігації. На їх офіційному сайті представлені готові численні рішення для автономного руху, які знаходять застосування як в комерційних виробках, так і в наукових дослідженнях [34].

1.5.2 Приклади комерційних роботів з автономною навігацією

Комерційною розробкою, що заслуговує на увагу, є мобільна платформа Spot від фірми Boston Dynamics [35]. Цей робот обладнаний численними сенсорами та камерами, що дозволяє йому самостійно орієнтуватись в складному оточенні. Spot вже застосовується у сферах інспекцій, охорони, рятувальних операцій та дослідів [35].

Іншим зразком є автономні логістичні роботи компанії Amazon, зокрема Amazon Scout [36]. Ці роботи успішно пересуваються у складських приміщеннях, оптимізуючи процес доставки та логістики. Вони використовують передові алгоритми планування маршрутів, взаємодії з іншими об'єктами і пристосування до змін у середовищі [36].

Разом з тим слід відмітити платформу NVIDIA Jetson, котра ефективно виконує складні обчислення для мобільних роботів та підтримує алгоритми глибокого навчання в реальному часі. На її базі створено NVIDIA Isaac – набір інструментів для розробки автономних роботів зі застосуванням штучного інтелекту. До її складу входять бібліотеки для сприйняття, планування маршруту, а також симуляційне середовище Isaac Sim, що дозволяє моделювати дії роботів в складних умовах. Платформа знаходить широке застосування у промисловості та у різних наукових дослідженнях [37].

1.5.3 Переваги і недоліки існуючих систем

Останніми роками спостерігається активний розвиток автономних роботизованих систем для сільського господарства. Сучасні наземні агродрони оснащуються системами супутникової навігації, комп'ютерного

зору, датчиками позиціонування та штучним інтелектом, що дозволяє їм виконувати технологічні операції без безпосередньої участі оператора.

Одним із найбільш відомих виробників автономних аграрних роботів є французька компанія Naïo Technologies. Робот Oz призначений для виконання робіт з механічного видалення бур'янів на овочевих культурах. Навігація здійснюється за допомогою GPS-приймача, відеокамер та системи автоматичного керування рухом. Робот здатний автономно пересуватися по полю та виконувати технологічні операції з високою точністю.

Іншим прикладом є робот Ted компанії Naïo Technologies, який використовується у виноградарстві. Машина оснащена системою автономної навігації, лазерними датчиками та комплексом комп'ютерного зору для розпізнавання рослин і навколишніх об'єктів.

Значного поширення набуває роботизована платформа AgBot компанії AgXeed (Нідерланди). Машина являє собою автономний трактор, який може виконувати широкий спектр польових робіт. Для навігації використовуються RTK-GPS, інерціальні датчики, лідари та камери. Система керування забезпечує рух за заданими маршрутами з високою точністю позиціонування.

Перспективною розробкою є робот FarmDroid FD20 (Данія), який використовує сонячну енергію для живлення. Робот виконує посів і міжрядний обробіток культур у повністю автоматичному режимі. Система навігації базується на RTK-GPS з точністю до 2 см.

Компанія EarthSense (США) розробила автономну платформу TerraSentia для моніторингу посівів. Робот обладнаний відеокамерами, датчиками відстані та навігаційною системою, що дозволяє виконувати збір інформації про стан рослин та параметри врожайності.

В аграрному секторі також використовуються роботизовані платформи компаній John Deere, CNH Industrial, Kubota та інших виробників. Більшість сучасних машин оснащуються елементами автономного керування, системами супутникової навігації та засобами дистанційного моніторингу.

Основні технічні характеристики сучасних автономних роботизованих платформ наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Приклади комерційних роботів з автономною навігацією

Модель	Виробник	Тип рушія	Навігація	Основне призначення
Oz	Naïo Technologies	Колісний	GPS, камери	Прополювання овочевих культур
Ted	Naïo Technologies	Колісний	GPS, лідар, камери	Робота у виноградниках
AgBot	AgXeed	Гусеничний/колісний	RTK-GPS, лідар	Польові роботи
FarmDroid FD20	FarmDroid	Колісний	RTK-GPS	Посів та міжрядний обробіток
TerraSentia	EarthSense	Колісний	GPS, камери	Моніторинг посівів
Autonomous Tractor	John Deere	Колісний	GPS, камери, ІІІ	Автономне виконання польових робіт

Проведений аналіз показує, що сучасні комерційні роботи використовують переважно колісні шасі, супутникову навігацію RTK-GPS, системи комп'ютерного зору та алгоритми автономного керування. Разом із тим більшість існуючих розробок не орієнтовані на моніторинг втрат збіжжя після проходу зернозбиральних комбайнів.

Тому актуальним напрямом розвитку аграрної робототехніки є створення спеціалізованої мобільної платформи з колісним шасі для автоматизованого контролю втрат зерна, яка поєднуватиме високу прохідність, автономність руху та можливість інтеграції сучасних засобів комп'ютерного зору і систем аналізу даних.

1.6 Задачі до виконання у дипломному проекті

Для досягнення поставленої мети щодо розробки конструкції колісного шасі наземного агродрону для моніторингу втрат збіжжя необхідно вирішити комплекс науково-технічних та інженерних завдань.

Основними задачами дипломного проекту є:

1. Провести аналіз сучасного стану розвитку роботизованих систем для сільського господарства та дослідити існуючі конструкції наземних агродронів і мобільних роботизованих платформ.
2. Проаналізувати сучасні методи моніторингу втрат збіжжя під час збирання врожаю та визначити перспективні напрямки їх удосконалення.
3. Дослідити умови експлуатації наземного агродрону в польових умовах, зокрема особливості руху по стерні, нерівностях ґрунту та рослинних залишках.
4. Обґрунтувати конструктивну схему мобільної платформи та виконати вибір типу колісного рушія, рами і системи приводу.
5. Розробити конструкцію колісного шасі наземного агродрону з урахуванням вимог до прохідності, маневреності, стійкості та енергоефективності.
6. Виконати розрахунок основних геометричних параметрів шасі:
 - о колісної бази;
 - о колії;
 - о дорожнього просвіту;
 - о радіуса повороту;
 - о навантаження на колеса.
7. Провести розрахунок міцності та жорсткості несучої рами і найбільш навантажених елементів конструкції.
8. Обґрунтувати вибір силового приводу, джерела живлення та системи керування мобільною платформою.
9. Розробити конструкцію вузлів кріплення датчиків, камер та обладнання для моніторингу втрат збіжжя.
10. Створити тривимірну модель конструкції колісного шасі з використанням сучасних CAD-систем.
11. Розробити комплект конструкторської документації відповідно до вимог ЄСКД та ДСТУ:
 - складальне креслення шасі;
 - деталювання рами;
 - деталювання поворотного вузла;

- деталювання колісного модуля;
- специфікацію складальних одиниць.

12.Провести техніко-економічне обґрунтування запропонованої конструкції та оцінити ефективність її впровадження в умовах аграрного виробництва.

13.Розробити заходи з охорони праці та безпечної експлуатації наземного агродрону.

Виконання зазначених завдань дозволить створити конструкцію сучасної мобільної роботизованої платформи для автоматизованого моніторингу втрат збіжжя та підвищення ефективності технологічного контролю процесів збирання врожаю.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА ВИКОНАВЧОЇ ЧАСТИНИ МОБІЛЬНОГО КОЛІСНОГО РОБОТА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВТРАТ ЗБІЖЖЯ

2.1 Обґрунтування конструкції виконавчої частини

Одним із ключових елементів мобільного колісного робота для моніторингу втрат збіжжя є його виконавча частина, яка забезпечує переміщення платформи по поверхні поля, стабільне функціонування систем контролю та виконання технологічних завдань у складних польових умовах.

Особливістю роботи робота є рух по стерні після проходу зернозбирального комбайна, де поверхня характеризується нерівностями, наявністю рослинних залишків, колій від сільськогосподарської техніки та змінною несучою здатністю ґрунту. У таких умовах до ходової системи висуваються підвищені вимоги щодо прохідності, стійкості, маневреності та надійності.

Аналіз існуючих роботизованих платформ показав, що для виконання задач моніторингу втрат зерна найбільш доцільним є застосування колісної схеми шасі. Порівняно з гусеничними рушіями колісна конструкція має меншу масу, простіше виготовляється, характеризується нижчими витратами енергії та забезпечує достатню прохідність на сільськогосподарських угіддях.

З урахуванням умов експлуатації для проєктованого мобільного робота прийнято чотириколісну схему з незалежним приводом коліс. Така конструкція забезпечує рівномірний розподіл навантаження, покращує прохідність та дозволяє реалізувати диференціальне керування рухом.

До складу виконавчої частини входять:

- несуча рама;
- колісні модулі;
- електроприводи;
- вузли підвіски;
- поворотний механізм;
- система кріплення датчиків і допоміжного обладнання;

- акумуляторний блок;
- елементи захисту обладнання.

Основою конструкції є просторова рама, виготовлена із сталевих профільних труб прямокутного перерізу. Така конструкція забезпечує достатню жорсткість при відносно невеликій масі та дозволяє встановлювати всі функціональні модулі мобільної платформи.

Колісні модулі обладнані пневматичними шинами підвищеної прохідності, які забезпечують зменшення питомого тиску на ґрунт та покращують плавність руху по нерівній поверхні поля. Застосування коліс великого діаметра дозволяє ефективно долати стерню, рослинні залишки та дрібні перешкоди.

Для приводу використано електродвигуни постійного струму з мотор-редукторами. Таке рішення забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, можливість плавного регулювання швидкості руху та простоту інтеграції з системою автоматичного керування.

Особлива увага приділена забезпеченню стійкості платформи під час руху. Для цього обґрунтовано раціональні значення колісної бази, колії та дорожнього просвіту. Збільшена колія підвищує поперечну стійкість робота, а достатній кліренс забезпечує безперешкодний рух по стерні та нерівностях поля.

У верхній частині рами передбачено місця встановлення навігаційного обладнання, відеокамер, LiDAR-сканера та датчиків контролю втрат зерна. Таке компонування забезпечує необхідну оглядовість і точність збору інформації під час виконання моніторингу.

Для захисту електронного обладнання від пилу, вологи та механічних пошкоджень конструкцією передбачені захисні кожухи та герметичні корпуси. Це дозволяє експлуатувати робота в умовах підвищеної запиленості та несприятливих погодних умов.

Запропонована конструкція виконавчої частини мобільного колісного робота відповідає сучасним вимогам галузевого машинобудування, забезпечує надійну роботу систем моніторингу втрат збіжжя та створює передумови для

подальшого впровадження роботизованих технологій у сільськогосподарське виробництво.

Таким чином, розроблена виконавча частина забезпечує необхідні показники прохідності, маневреності, стійкості та енергоефективності мобільного робота, що є визначальними факторами для його ефективного використання під час моніторингу втрат зерна в умовах реального виробництва.

2.1 Структурна схема керування мобільного колісного робота

Система керування мобільного колісного робота призначена для забезпечення автономного переміщення платформи по поверхні поля, збору інформації про втрати збіжжя, обробки отриманих даних та передачі результатів оператору. Вона об'єднує навігаційні, виконавчі, вимірювальні та обчислювальні підсистеми в єдиний програмно-апаратний комплекс.

Структурна схема системи керування



Опис роботи системи

Основним елементом системи керування є бортовий комп'ютер, який здійснює приймання інформації від датчиків, аналізує отримані дані та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів.

Для визначення координат робота використовується система супутникової навігації RTK-GPS, що забезпечує точність позиціонування до 2–3 см. Навігаційна інформація надходить до бортового комп'ютера, де формується маршрут руху мобільної платформи.

Контроль навколишнього середовища виконується за допомогою комплексу сенсорів:

- відеокамери високої роздільної здатності;
- LiDAR-сканера;
- датчиків контролю втрат зерна;
- інерціального модуля IMU.

Відеокамера забезпечує отримання зображення поверхні поля та виявлення зерен, що залишилися після проходу зернозбирального комбайна. LiDAR використовується для побудови карти місцевості та виявлення перешкод на маршруті руху.

Модуль обробки інформації виконує аналіз отриманих даних із використанням алгоритмів комп'ютерного зору та штучного інтелекту. Після обробки інформації формується команда на зміну швидкості або напрямку руху робота.

Контролер керування рухом передає сигнали на мотор-редуктори колісних модулів. Завдяки незалежному приводу коліс забезпечується висока маневреність і можливість руху по складних траєкторіях.

Передача результатів моніторингу здійснюється через бездротовий канал зв'язку (Wi-Fi або LTE) на робочу станцію оператора або до хмарної бази даних.

Основні переваги запропонованої системи керування

- висока точність позиціонування;
- автономний режим роботи;
- можливість моніторингу втрат збіжжя в реальному часі;
- автоматичне виявлення перешкод;
- дистанційний контроль роботи мобільної платформи;
- інтеграція із системами точного землеробства;

- можливість подальшого впровадження елементів штучного інтелекту.

Запропонована структура системи керування забезпечує ефективне функціонування мобільного колісного робота та дозволяє виконувати автоматизований моніторинг втрат збіжжя з високою точністю та продуктивністю.

2.2 Вибір елементної бази для прототипу мобільного робота

2.2.1 Вибір сервопривода

Сервопривід – це пристрій, який забезпечує позиціонування, швидкість або кутове положення якого-небудь об'єкта. Його робота полягає в отриманні сигналу з контролера і корегування своїх дій відносно фактичного положення, іншими словами зворотній зв'язок. Сервопривід складається з редуктора, вихідного валу, електромотора, датчика зворотного зв'язку і плати керування [38]. На рис. 2.2 зображено будову типового сервопривода [39].



Рисунок 2.2 – Будова типового сервопривода.

Порівняння нижче наведених сервоприводів буде здійснюватися за вагою, розміром, швидкістю обертання, пусковим моментом, робочою напругою та вартістю.

Tower Pro MG90S (рис. 2.3, [40]) – є популярним вибором серед сервоприводів для робототехнічних завдань. Він легкий і якісний вагою в всього 13.4 грамів. MG90S має повністю металеві шестерні і металевий вихідний вал, що забезпечує довговічність і надійність. Його робоча напруга 4.6-6V, має швидкість 60° за 0.1 секунди (при 4.6 V) та пусковий момент 1.8-2.2 кг/см (при 4.6 V). Також легко керується за допомогою Arduino, AVR, PIC та інших мікроконтролерів [40].



Рисунок 2.3 – Сервопривід Tower Pro MG90S

Tower Pro SG90 (рис. 2.4, [41]) – бюджетний варіант відносно Tower Pro MG90S, оскільки не має металевих шестерней і вихідного валу. Його вага 9 грамів і тому він ідеально підходить для невеликих проєктів. При робочій напрузі 4.6-6V забезпечує пусковий момент 1.2-1.4 кг/см і обертається зі швидкістю 60° за 0.12 секунди. Як і Tower Pro MG90S легко керується за допомогою Arduino, AVR, PIC та інших мікроконтролерів [41].



Рисунок 2.4 – Сервопривід Tower Pro SG90

Tower Pro MG996R (рис. 2.5, [42]) – має високу потужність і надійність, тому чудово підходить для застосування у робототехніці та системах автоматизації. Він оснащений металевим вихідним валом мотора та металевими внутрішніми шестернями редуктора. Сервопривід працює в діапазоні напруги 4.8-7.2В, розвиває пусковий момент до 10 кг/см (при 6В) та має швидкість обертання 60° за 0.2 секунди (при 6В). Його маса становить 60 грамів [42].



Рисунок 2.5 – Сервопривід Tower Pro MG996R

Tower Pro SG-5010 (рис. 2.6, [43]) – це надійний і потужний сервопривід, який поєднує хорошу якість та доступну ціну. Завдяки пусковому моменту 8-11 кг/см він може використовуватись в проектах, де потрібна серйозна тяга. Його робоча напруга 4.6-8В і швидкість обертання 60° за 0.11-0.14 секунди. У нього міцний корпус і вага всього 55 грамів [43].



Рисунок 2.6 – Сервопривід Tower Pro SG-5010

У таблиці 2.1 складено порівняльну характеристику цих сервоприводів.

Таблиця 2.1 Порівняльна характеристика

Показник	MG996R	DS3218	JX PDI-6221MG	AGFRC A80BHMW
Тип	Аналоговий	Цифровий	Цифровий	Цифровий
Напруга живлення, В	4,8–7,2	4,8–8,4	6–8,4	6–8,4
Крутний момент, кг·см	11	21,5	20	40
Швидкість повороту, с/60°	0,17	0,16	0,13	0,10
Матеріал редуктора	Метал	Метал	Метал	Сталь
Маса, г	55	60	68	95
Ступінь захисту	IP54	IP54	IP66	IP67
Точність позиціонування	Середня	Висока	Висока	Дуже висока
Орієнтовна вартість	Низька	Середня	Середня	Висока
Рекомендоване застосування	Легкі роботи	Роботи середньої маси	Полеві роботи	Важкі агророботи

Аналіз сервоприводів

MG996R

- найдешевший варіант;
- використовується у навчальних і демонстраційних роботах;
- недостатній ресурс для роботи в польових умовах;
- не рекомендується для реального агродрону.

DS3218

- оптимальне співвідношення ціни та характеристик;
- крутний момент понад 20 кг·см;
- підходить для повороту коліс мобільної платформи масою до 40–50 кг.

JX PDI-6221MG

- підвищена точність позиціонування;
- захист від пилу та вологи;

- добре підходить для автономних польових робіт.

AGFRC A80BHMW

- професійний сервопривід;
- високий крутний момент;
- повний захист IP67;
- рекомендований для експлуатації в умовах агропромислового виробництва.

Для бакалаврського проекту «Розробка конструкції колісного шасі наземного агродрону для моніторингу втрат збіжжя» найбільш доцільним є застосування сервопривода JX PDI-6221MG або AGFRC A80BHMW, оскільки вони забезпечують:

- достатній крутний момент для повороту коліс;
- високу точність керування;
- стійкість до пилу та вологи;
- надійну роботу в польових умовах.

Для техніко-економічного обґрунтування в дипломному проекті можна прийняти JX PDI-6221MG як базовий варіант, оскільки він забезпечує необхідні технічні характеристики при помірній вартості.

Вибір плати керування

2.3.2 Вибір плати керування

Для керування мобільним колісним роботом необхідно обрати плату керування, яка забезпечує обробку сигналів від датчиків, формування команд для виконавчих механізмів, керування електродвигунами та обмін даними з оператором.

До плати керування висуваються такі вимоги:

- достатня кількість входів і виходів;
- підтримка PWM-сигналів для керування сервоприводами;
- можливість підключення датчиків, GPS-модуля, камери та LiDAR;
- низьке енергоспоживання;

- компактні розміри;
- сумісність із програмним забезпеченням для автономного керування;
- надійність роботи в польових умовах.

Порівняльна характеристика плат керування

Показник	Arduino Mega 2560	Raspberry Pi 4	ESP32	STM32
Тип плати	Мікроконтролер	Одноплатний комп'ютер	Мікроконтролер	Мікроконтролер
Кількість входів/виходів	Висока	Середня	Середня	Висока
PWM-виходи	Є	Обмежено	Є	Є
Підтримка камер	Ні	Так	Обмежено	Ні
Підтримка Wi-Fi	Ні	Так	Так	Ні
Обробка зображень	Ні	Так	Обмежено	Ні
Складність програмування	Низька	Середня	Середня	Висока
Придатність для агродрону	Середня	Висока	Висока	Висока

Обґрунтування вибору

Для мобільного колісного робота доцільно використати комбіновану систему керування:

- **Raspberry Pi 4** — як основний бортовий комп'ютер;
- **Arduino Mega 2560 або STM32** — як контролер виконавчих механізмів.

Raspberry Pi 4 забезпечує обробку інформації від відеокамери, LiDAR, GPS-модуля та датчиків втрат зерна. Вона може виконувати алгоритми комп'ютерного зору, зберігати результати моніторингу та передавати дані оператору.

Arduino Mega 2560 або STM32 доцільно використовувати для керування

мотор-редукторами, сервоприводами, датчиками положення та іншими виконавчими елементами. Такий підхід підвищує надійність системи, оскільки обчислювальні задачі та керування приводами розділені між окремими модулями.

Прийняте рішення

У проєкті приймається плата **Raspberry Pi 4** як основний бортовий комп'ютер мобільного робота, а для керування виконавчими механізмами — плата **Arduino Mega 2560**.

Таке рішення забезпечує:

- автономне керування рухом;
- підключення відеокамери та датчиків;
- обробку інформації про втрати збіжжя;
- керування електродвигунами та сервоприводами;
- передачу даних оператору через Wi-Fi;
- можливість подальшої модернізації системи.

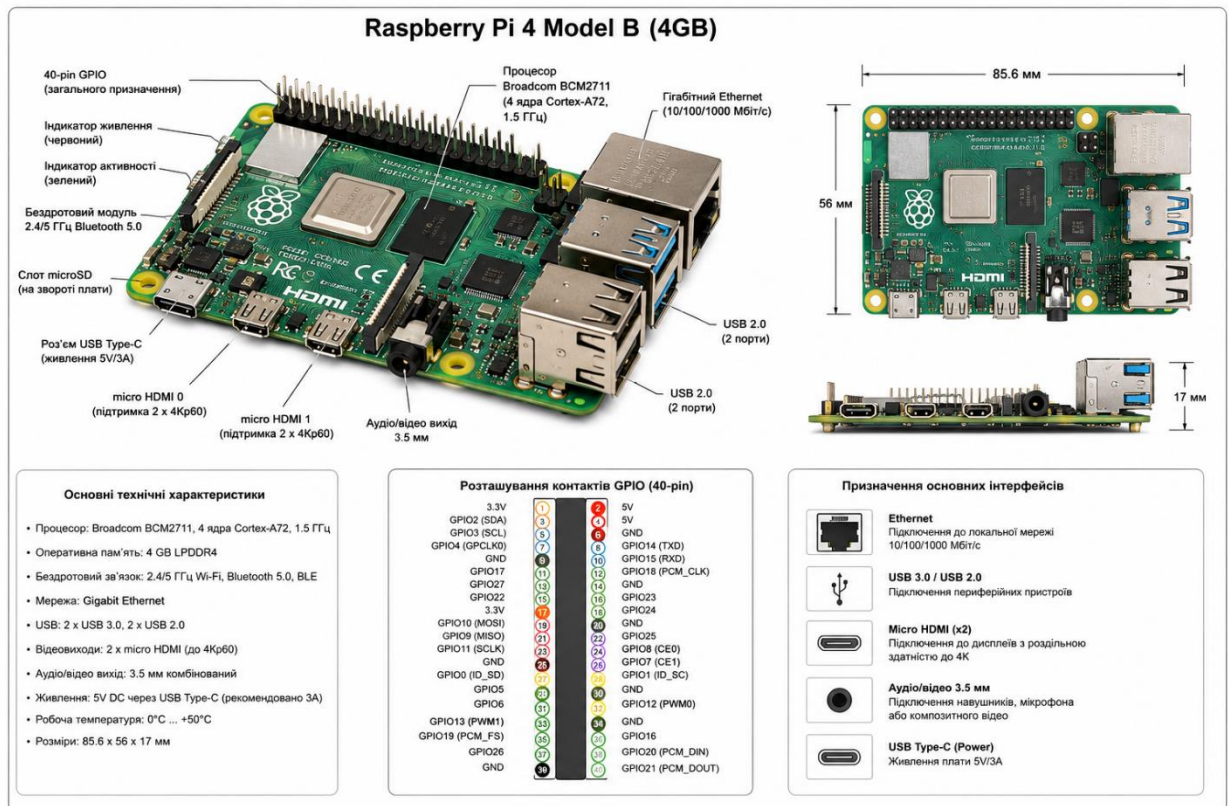


Рисунок 2.7 – Плата керування **Raspberry Pi 4** [45]

2.3.4 Вибір датчика відстані

Для забезпечення навігації в мобільному роботі важливим є його здатність визначати відстань до об'єктів. Для цього було обрано ультразвуковий датчик відстані HC-SR04. Він добре підходить для вимірювання відстані до об'єктів, легкий у використанні та легко підключається до Arduino.

HC-SR04 (рис. 2.12) дозволяє вимірювати відстань в діапазоні від 2 до 450 сантиметрів з максимальною точністю датчика 0.3 мм. Така точність підходить для роботи в приміщенні, щоб бачити перешкоди. Також його дуже просто підключати, бо він має всього 4 виводи: VCC (живлення), GND (заземлення), Trig (для запуску вимірювання) та Echo (для прийому сигналу) [46].



Рисунок 2.12 – Датчик ультразвуковий HC-SR04 [46]

Цей датчик працює наступним чином: спочатку надсилає звуковий сигнал, який відбивається від об'єкта і повертається назад і сенсор вимірює за який час сигнал повернувся. HC-SR04 невеликий і споживає небагато енергії, що дуже зручно для мобільного робота.

2.3.5 Вибір двигунів

Одним із найважливіших етапів проектування мобільного колісного робота є вибір тягових двигунів, які повинні забезпечувати необхідну

швидкість руху, прохідність, маневреність та енергоефективність платформи в польових умовах.

Мобільний робот призначений для моніторингу втрат збіжжя на поверхні поля після проходу зернозбирального комбайна. Тому до тягових двигунів висуваються такі вимоги:

- забезпечення руху по стерні та нерівностях ґрунту;
- можливість роботи в автономному режимі;
- низьке енергоспоживання;
- плавне регулювання швидкості;
- високий пусковий момент;
- сумісність із системою автоматичного керування;
- висока надійність та довговічність.

Для мобільних роботизованих платформ найбільшого поширення набули електродвигуни постійного струму з редукторами (мотор-редуктори), безколекторні двигуни BLDC та крокові двигуни.

Порівняльна характеристика можливих двигунів

Показник	Кроковий двигун	Двигун постійного струму з редуктором	BLDC двигун
ККД, %	60–75	75–85	85–95
Пусковий момент	Середній	Високий	Високий
Регулювання швидкості	Просте	Просте	Складніше
Надійність	Висока	Висока	Дуже висока
Вартість	Середня	Низька	Вища
Придатність для мобільного робота	Середня	Висока	Дуже висока

Проведений аналіз показує, що для мобільного колісного робота найбільш доцільним є використання двигунів постійного струму з планетарним редуктором або безколекторних BLDC двигунів.

Вибір мотор-редуктора

Для проєктованої платформи прийнято чотири незалежні мотор-редуктори постійного струму типу **37GB-520**.

Основні технічні характеристики двигуна:

Параметр	Значення
Тип двигуна	DC мотор-редуктор
Напруга живлення	12 В
Номінальна потужність	50 Вт
Частота обертання вихідного вала	200 об/хв
Крутний момент	8 Н·м
Струм навантаження	до 5 А
Маса	0,75 кг

Загальна встановлена потужність приводу становить:

$$P_{\text{заг}} = 4 \cdot 50 = 200; \text{Вт}$$

де:

4 - кількість двигунів;

50 Вт - потужність одного двигуна.

Переваги вибраного двигуна

Використання мотор-редукторів 37GB-520 забезпечує:

- достатній запас тягового зусилля;
- можливість руху по нерівній поверхні;
- простоту інтеграції з Arduino Mega та Raspberry Pi 4;
- незалежне керування кожним колесом;
- невисоку вартість конструкції;
- високу ремонтпридатність.

У результаті проведеного аналізу для мобільного колісного робота прийнято чотири двигуни постійного струму з планетарними редукторами типу 37GB-520 потужністю 50 Вт кожний. Запропонований привід забезпечує необхідні тягові характеристики, енергоефективність та надійну роботу мобільної платформи під час моніторингу втрат збіжжя в умовах сільськогосподарського виробництва.

Коефіцієнт передачі редуктора становить 48:1, а число обертів за хвилину сягає до 200. Обрані мотори чудово підходять для роботів, які мають рухатись вперед-назад та повертати за рахунок різниці швидкості між колесами. Це дозволяє створити просту модель робота з диференціальним керуванням [47].



Рисунок 2.13 – Мотор з редуктором та колесом [47]

Для керування мотор-колесами в цьому проекті було використано драйвер L298N Mini (рис. 2.14, [48]), який легко дозволяє керувати напрямком і швидкістю обертання двигунів постійного струму.



Рисунок 2.14 – Драйвер L298N Mini

L298N Mini дозволяє одночасно керувати двома двигунами постійного струму. Модуль має виходи для підключення двигунів, а також входи для подачі керуючих сигналів з мікроконтролера. Через ці входи можна задавати напрям обертання, а також змінювати швидкість. Його діапазон робочих напруг 5-30В і максимальний струм 2А. Драйвер доволі компактний і просто розміщується на невеликих платформах. Також на ньому є гвинтові клеми для підключення моторів і джерела живлення. Усе це робить L298N Mini простим і надійним рішенням для керування двигунами в мобільному роботі [48].

2.3.6 Вибір живлення

Для забезпечення автономної роботи мобільного колісного робота

необхідно вибрати джерело живлення, яке забезпечить стабільне функціонування тягових двигунів, системи керування, навігаційного обладнання, датчиків та засобів бездротового зв'язку.

При виборі джерела живлення враховувалися такі вимоги:

- автономна робота не менше 4–6 годин;
- можливість живлення тягових електродвигунів;
- сумісність із Raspberry Pi 4 та Arduino Mega;
- невелика маса та габарити;
- висока енергетична щільність;
- надійність та довговічність;
- можливість багаторазового заряджання.

Для живлення мобільних роботизованих платформ найчастіше використовують:

- свинцево-кислотні акумулятори;
- літій-іонні (Li-Ion);
- літій-полімерні (Li-Po);
- літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄).

Порівняльна характеристика акумуляторів

Показник	Свинцево-кислотний	Li-Ion	Li-Po	LiFePO ₄
Питома енергоємність, Вт·год/кг	30–50	150–250	180–280	90–160
Кількість циклів заряд-розряд	300–500	800–1200	500–1000	3000–6000
Маса	Велика	Мала	Мала	Середня
Безпечність	Висока	Середня	Низька	Дуже висока
Вартість	Низька	Середня	Висока	Середня
Придатність для польових роботів	Низька	Висока	Висока	Дуже висока

Проведений аналіз показав, що для мобільного робота найбільш доцільним є використання акумуляторної батареї типу LiFePO₄, яка поєднує високу надійність, безпечність та значний ресурс роботи.

Вибір акумуляторної батареї

Для живлення робота приймається акумулятор:

LiFePO₄ 24 В, 40 А·год

Основні технічні характеристики:

Параметр	Значення
Тип акумулятора	LiFePO ₄
Номінальна напруга	24 В
Ємність	40 А·год
Запас енергії	960 Вт·год
Максимальний струм розряду	50 А
Кількість циклів	понад 3000
Маса	8–10 кг
Наявність BMS	Так

Енергетична ємність акумулятора визначається за формулою:

$$W = U \cdot C$$

де:

(U) - напруга акумулятора, В;

(C) - ємність акумулятора, А·год.

Для прийнятого акумулятора:

$$W = 24 \cdot 40 = 960; \text{Вт} \cdot \text{год}$$

Розрахунок часу автономної роботи

Загальна потужність споживачів становить:

Споживач	Потужність, Вт
4 мотор-редуктори	200
Raspberry Pi 4	10
Arduino Mega	2
RTK-GPS	5
LiDAR	12
Відеокамера	5
Wi-Fi/LTE модуль	6
Інші споживачі	10
Разом	250 Вт

Час автономної роботи:

$$t = \frac{W}{P}$$

де:

W=960 Вт·год;

P=250 Вт.

Тоді:

$$t = \frac{960}{250} = 3.84; \text{ год}$$

Отже, робот здатний працювати без підзарядки приблизно 3,8–4 години. У реальних умовах, коли двигуни працюють не на повній потужності, автономність може досягати 5–6 годин.

Вибір системи живлення

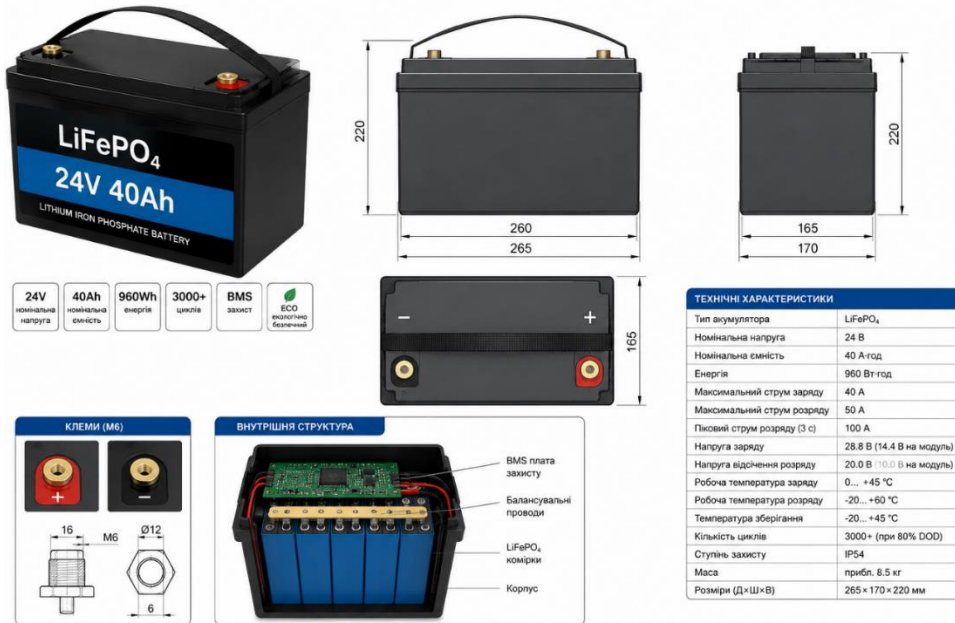


Рисунок 2.15 – Акумуляторна батарея типу LiFePO₄ 24 В, 40 А·год

Для розподілу електроенергії передбачається використання:

- акумулятора LiFePO₄ 24 В;
- BMS-системи захисту;
- DC/DC перетворювача 24→12 В;
- DC/DC перетворювача 24→5 В;
- блоку розподілу живлення.

Для живлення мобільного колісного робота прийнято акумуляторну батарею типу LiFePO₄ 24 В, 40 А·год із системою керування BMS. Обрана система живлення забезпечує необхідний запас енергії, безпечну експлуатацію, тривалий ресурс роботи та автономність мобільної платформи протягом 4–6 годин, що повністю відповідає умовам виконання моніторингу втрат збіжжя в польових умовах.

3 КОНСТРУКЦІЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Мобільний колісний робот призначений для автоматизованого моніторингу втрат збіжжя після проходу зернозбирального комбайна. Конструкція робота розроблена з урахуванням вимог до прохідності, маневреності, енергоефективності та можливості автономної роботи в польових умовах.

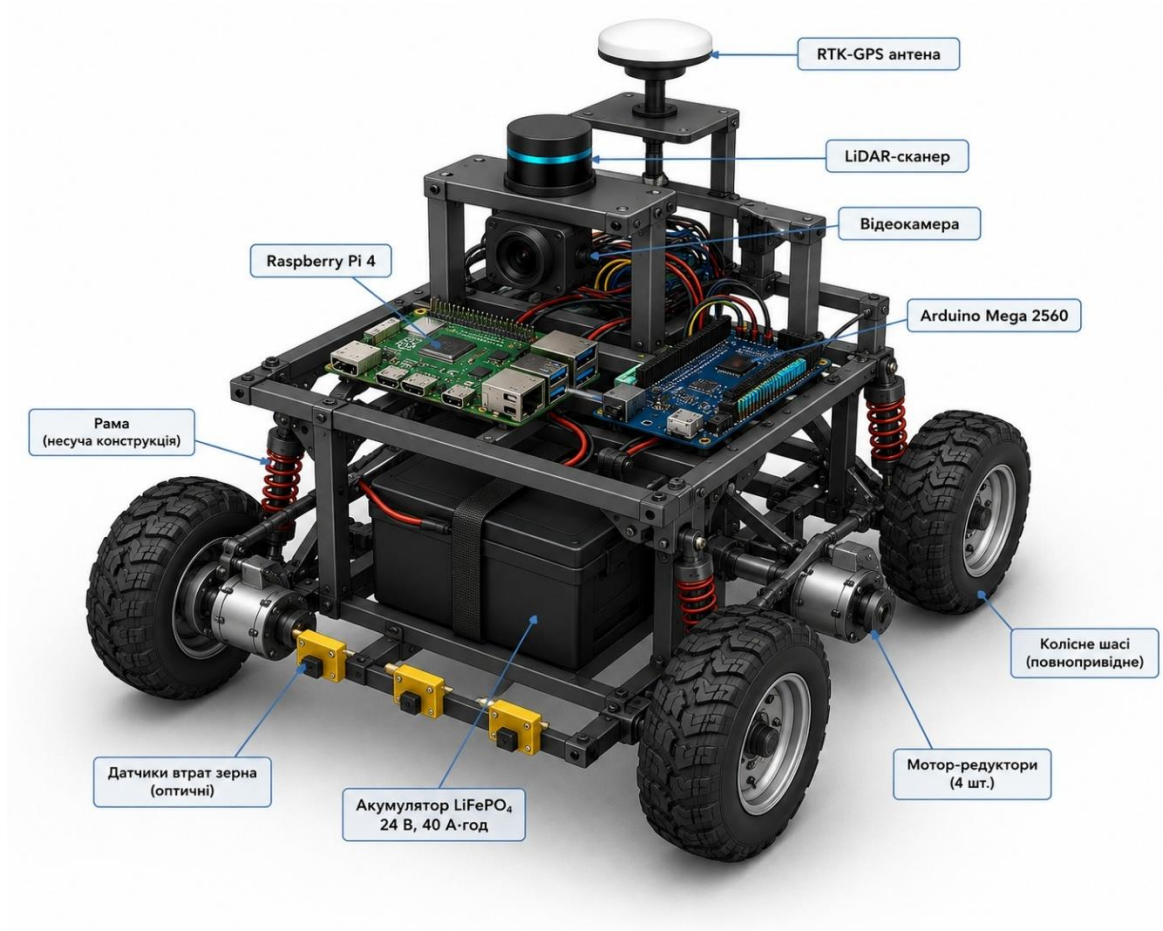


Рис.3.1. 3D ровер з сенсорами та електронікою

Основою конструкції є чотириколісна роботизована платформа, яка складається з несучої рами, ходової частини, системи приводу, джерела живлення, системи керування та комплексу вимірювального обладнання. Загальний вигляд конструкції наведено на складальному кресленні.

При розробці конструкції враховувалися такі основні вимоги:

- робота на стерні після проходу зернозбирального комбайна;
- подолання нерівностей поверхні поля;

- можливість автономного руху за заданим маршрутом;
- встановлення навігаційного та вимірювального обладнання;
- мінімальний тиск на ґрунт;
- простота технічного обслуговування.

Конструкція рами

Несучим елементом мобільного робота є просторова зварна рама, виготовлена із сталевих профільних труб прямокутного перерізу. Рама виконує функції базового елемента для встановлення всіх вузлів та агрегатів машини.

Конструкція рами забезпечує:

- необхідну міцність і жорсткість;
- мінімальну масу конструкції;
- зручність монтажу обладнання;
- можливість модернізації платформи.

У центральній частині рами розміщується акумуляторна батарея, що забезпечує рівномірний розподіл маси та зниження положення центра ваги.

Ходова частина

Для забезпечення руху по поверхні поля використовується чотириколісне шасі.

До складу ходової частини входять:

- передні керовані колеса;
- задні ведучі колеса;
- поворотні вузли;
- підшипникові опори;
- елементи амортизації.

Колеса обладнані пневматичними шинами підвищеної прохідності, які забезпечують ефективний рух по стерні та рослинних залишках.

Для підвищення стійкості прийнято збільшену колію та низьке розташування центра мас конструкції.

Система приводу

Переміщення мобільного робота забезпечується чотирма мотор-редукторами постійного струму.

Основні параметри приводу:

- напруга живлення – 24 В;
- потужність одного двигуна – 50 Вт;
- кількість двигунів – 4 шт.;
- загальна потужність приводу – 200 Вт.

Застосування незалежного приводу коліс дозволяє реалізувати високу маневреність та точність руху мобільної платформи.

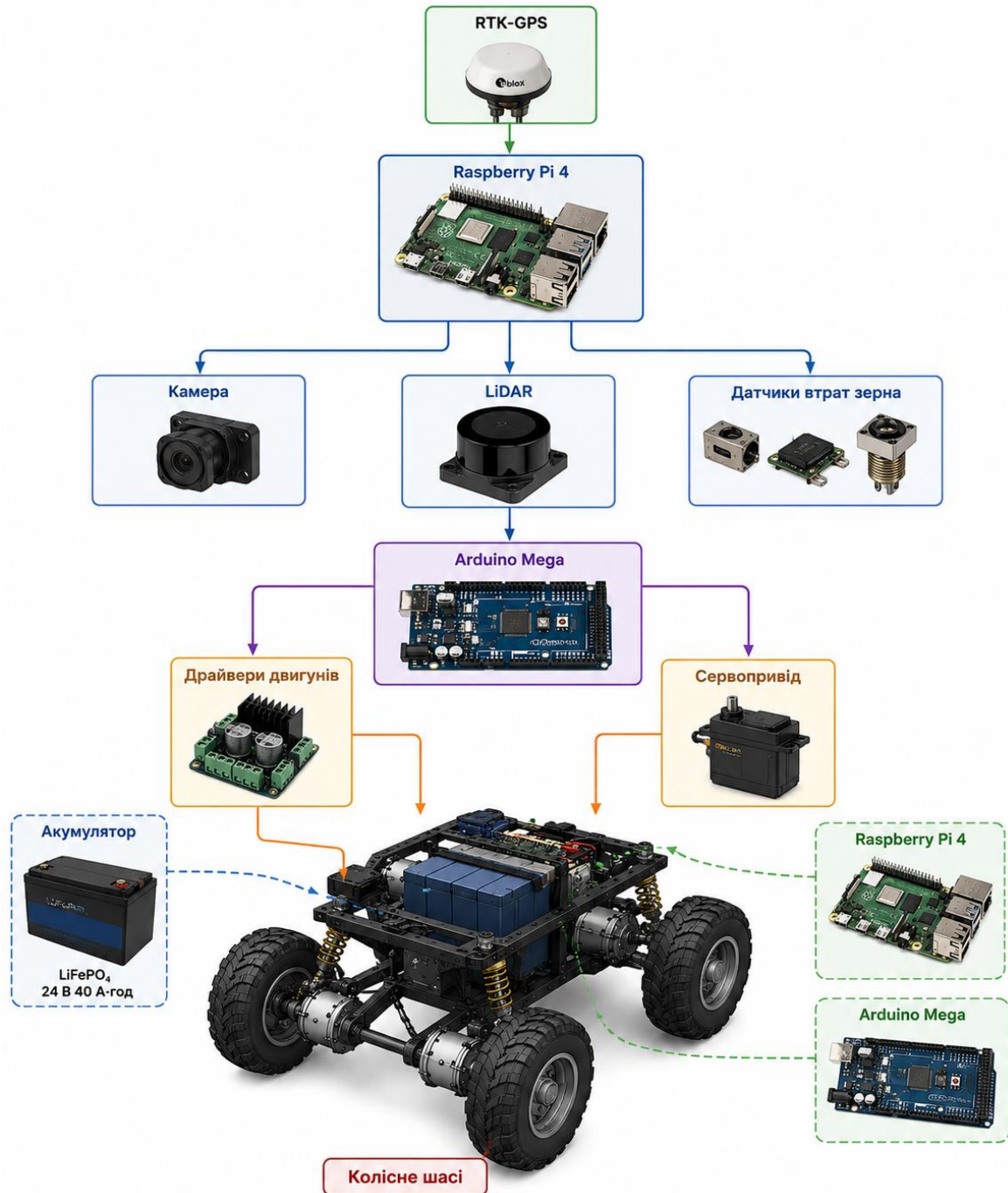


Рис. 3.1. Схема архітектури роботизованої системи

Система керування

Керування роботом здійснюється за допомогою бортового комп'ютера Raspberry Pi 4 та контролера Arduino Mega 2560.

Система керування забезпечує:

- автономний рух робота;
- обробку інформації від датчиків;
- керування електродвигунами;
- передачу даних оператору;
- реалізацію алгоритмів комп'ютерного зору.

Для навігації використовується RTK-GPS модуль, який забезпечує точність позиціонування до 2–3 см.

Система живлення

Джерелом енергії є акумуляторна батарея типу LiFePO₄.

Основні характеристики батареї:

- напруга – 24 В;
- ємність – 40 А·год;
- запас енергії – 960 Вт·год;
- ресурс – понад 3000 циклів заряджання.

Використання літій-залізо-фосфатного акумулятора забезпечує високу безпеку експлуатації та тривалий термін служби.

Система моніторингу втрат збіжжя

Для виконання основного функціонального призначення робот оснащується:

- цифровою відеокамерою;
- LiDAR-сканером;
- RTK-GPS модулем;
- датчиками контролю втрат зерна;
- модулем бездротового зв'язку.

Інформація від сенсорів надходить до бортового комп'ютера, де виконується її аналіз та формуються карти втрат збіжжя.

Принцип роботи мобільного робота

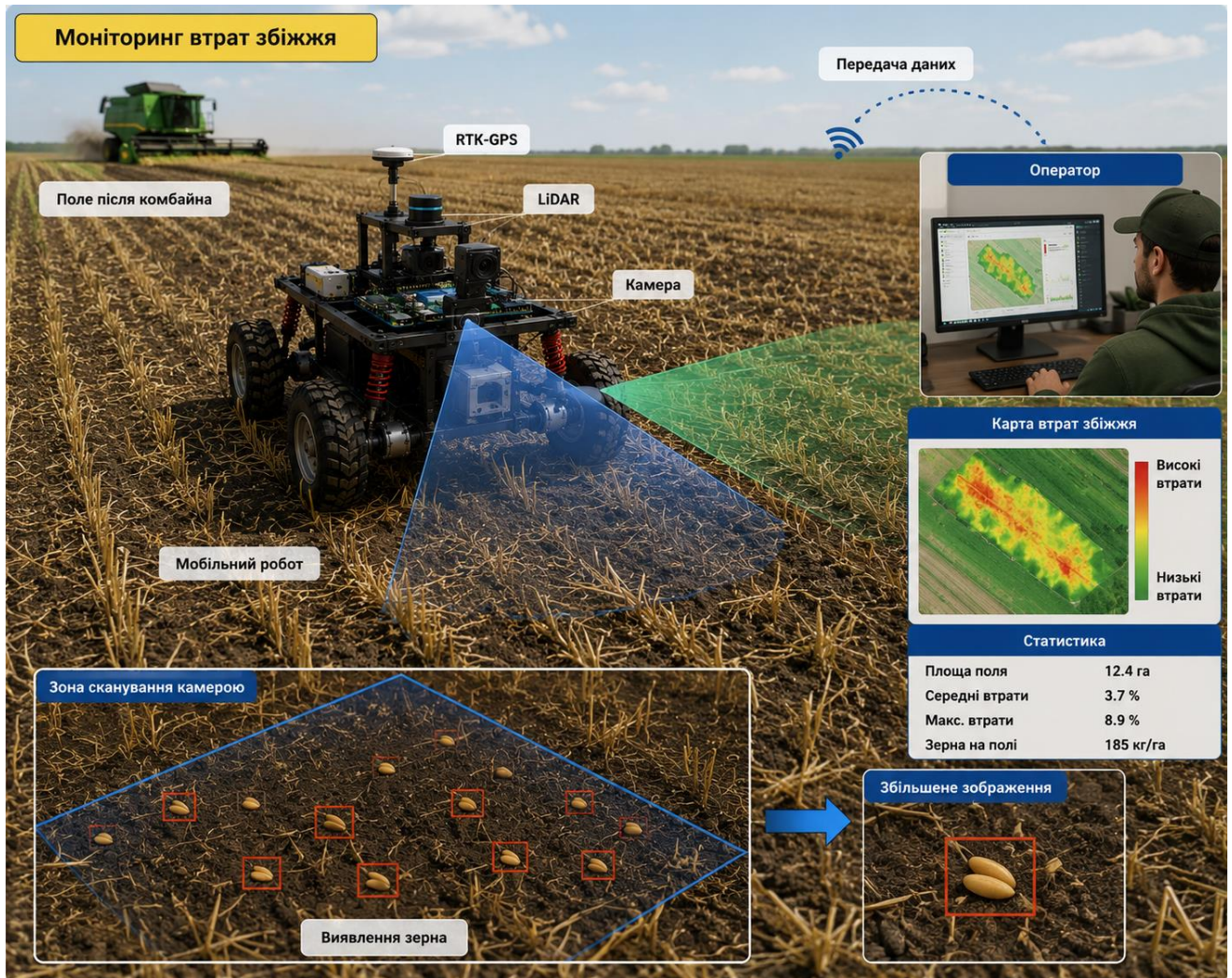


Рис.3.3 Робот під час моніторингу втрат збіжжя

Після проходження зернозбирального комбайна робот рухається по заданому маршруту вздовж обробленої ділянки поля. За допомогою відеокамер і датчиків система визначає наявність зерна на поверхні ґрунту, оцінює рівень втрат та формує цифрову карту розподілу втрат збіжжя.

Отримана інформація передається оператору через бездротовий канал зв'язку та може використовуватися для коригування режимів роботи зернозбирального комбайна.

Таким чином, розроблена конструкція мобільного робота забезпечує ефективне виконання завдань моніторингу втрат збіжжя, характеризується простотою конструкції, високою маневреністю та можливістю інтеграції в сучасні системи точного землеробства.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення

Охорона праці є невід'ємною складовою процесу проектування, виготовлення, випробування та експлуатації мобільного колісного робота для моніторингу втрат збіжжя. Основною метою заходів з охорони праці є забезпечення безпечних умов праці персоналу, запобігання виробничому травматизму, професійним захворюванням та аварійним ситуаціям під час роботи з роботизованою технікою.

Мобільний колісний робот призначений для роботи в польових умовах після проходу зернозбирального комбайна та виконує функції автоматизованого контролю втрат зерна. Під час його експлуатації працівники можуть зазнавати впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, пов'язаних з роботою електричного обладнання, рухомих механізмів, акумуляторних систем живлення, а також несприятливих факторів навколишнього середовища.

Організація безпечної роботи мобільного робота повинна відповідати вимогам:

- Закону України «Про охорону праці»;
- Закону України «Про пожежну безпеку»;
- Закону України «Про дорожній рух» (у частині використання мобільної техніки);
- ДСТУ та нормативних документів з електробезпеки;
- Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів;
- Правил пожежної безпеки в Україні.

Під час виконання робіт необхідно забезпечити безпечну взаємодію оператора з роботизованою системою, виключити можливість контакту людини з рухомими частинами приводу та передбачити надійний захист електричних компонентів від зовнішніх впливів.

Особлива увага повинна приділятися безпеці роботи з літій-залізо-фосфатною акумуляторною батареєю (LiFePO₄), яка є джерелом живлення мобільної платформи. Для цього в конструкції передбачаються система

керування акумулятором (BMS), захист від короткого замикання, перевантаження та глибокого розряду.

Конструкція мобільного робота повинна забезпечувати:

- механічну міцність несучих елементів;
- надійне кріплення вузлів і агрегатів;
- електробезпеку під час експлуатації;
- захист електронного обладнання від пилу та вологи;
- можливість аварійної зупинки;
- безпечне проведення технічного обслуговування та ремонту.

Для забезпечення безпечних умов праці оператор повинен пройти відповідне навчання та інструктаж з охорони праці, знати принцип роботи обладнання, порядок дій у разі виникнення аварійних ситуацій та правила користування первинними засобами пожежогасіння.

Таким чином, виконання вимог охорони праці під час експлуатації мобільного колісного робота дозволяє забезпечити безпеку персоналу, підвищити надійність роботи обладнання та створити умови для ефективного використання роботизованих технологій у сільськогосподарському виробництві.

законодавства України з охорони праці та електробезпеки.

4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час експлуатації мобільного робота можуть виникати такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

Механічні фактори

- рухомі колеса та приводи;
- обертові вали мотор-редукторів;
- можливість наїзду робота на працівника;
- гострі кромки металевих конструкцій;
- падіння обладнання під час монтажу.

Електричні фактори

- ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції;

- короткі замикання в електричних колах;
- перегрівання акумуляторної батареї;
- виникнення електричної дуги під час обслуговування.

Фізичні фактори

- шум від роботи приводів;
- вібрації конструкції;
- підвищена температура електронних компонентів;
- пил у польових умовах.

Метеорологічні фактори

- вплив прямих сонячних променів;
- підвищена температура навколишнього середовища;
- атмосферні опади;
- сильний вітер.

4.3 Заходи щодо забезпечення безпеки праці

Для забезпечення безпечної експлуатації мобільного робота передбачаються такі заходи:

Конструктивні заходи

- встановлення захисних кожухів на рухомі частини;
- огороження обертових елементів приводу;
- застосування герметичних корпусів електронних блоків;
- заокруглення гострих кромek деталей;
- використання аварійної кнопки зупинки.

Заходи електробезпеки

- застосування низьковольтної системи живлення 24 В;
- використання автоматичних запобіжників;
- встановлення BMS-системи захисту акумулятора;
- подвійна ізоляція електропроводки;
- захист електронних компонентів від вологи та пилу.

Організаційні заходи

- проведення інструктажів з охорони праці;

- допуск до роботи лише підготовленого персоналу;
- дотримання інструкцій з експлуатації;
- регулярний контроль технічного стану обладнання.

4.4 Пожежна безпека

Основними причинами виникнення пожежі можуть бути:

- коротке замикання електропроводки;
- несправність акумуляторної батареї;
- перегрів електронних компонентів;
- пошкодження ізоляції кабелів.

Для запобігання пожежам необхідно:

- використовувати сертифіковані акумулятори LiFePO_4 ;
- проводити регулярний контроль стану електропроводки;
- встановлювати плавкі запобіжники;
- забезпечити наявність вогнегасника порошкового типу.

4.5 Вимоги безпеки під час експлуатації мобільного робота

Безпечна експлуатація мобільного колісного робота для моніторингу втрат збіжжя забезпечується дотриманням комплексу організаційних та технічних заходів, спрямованих на запобігання травмуванню персоналу, пошкодженню обладнання та виникненню аварійних ситуацій.

До роботи з мобільним роботом допускаються особи, які пройшли відповідний інструктаж з охорони праці, ознайомлені з конструкцією обладнання та правилами його експлуатації.

Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед запуском мобільного робота необхідно:

- провести зовнішній огляд конструкції;
- перевірити надійність кріплення колісних модулів;
- перевірити справність системи керування;
- переконатися у відсутності механічних пошкоджень рами;
- перевірити стан електричних кабелів та роз'ємів;

- переконатися у справності акумуляторної батареї;
- перевірити працездатність датчиків, відеокамери, LiDAR та GPS-модуля;
- переконатися у правильності роботи аварійної кнопки зупинки;
- очистити робота від залишків бруду та рослинних решток.

Перед початком руху необхідно впевнитися, що в зоні роботи відсутні сторонні особи, тварини та перешкоди.

Вимоги безпеки під час роботи

Під час експлуатації мобільного робота необхідно:

- постійно контролювати його роботу за допомогою системи моніторингу;
- дотримуватися встановленої швидкості руху;
- забезпечувати безпечну відстань між роботом та працівниками;
- контролювати рівень заряду акумуляторної батареї;
- стежити за температурою електронних компонентів;
- негайно зупинити робота при виявленні несправностей.

Під час роботи забороняється:

- перебувати перед рухомим роботом;
- виконувати регулювання механізмів при ввімкненому живленні;
- торкатися рухомих частин приводу;
- використовувати робота із пошкодженими кабелями;
- експлуатувати систему під час сильних опадів або грози;
- залишати робота без нагляду в режимі випробувань.

Вимоги електробезпеки

Для забезпечення електробезпеки необхідно:

- використовувати лише штатну акумуляторну батарею;
- не допускати короткого замикання контактів акумулятора;
- виконувати заряджання тільки справним зарядним пристроєм;
- використовувати кабелі з непошкодженою ізоляцією;
- захищати електронні блоки від попадання вологи;
- вимикати живлення перед проведенням ремонтних робіт.

Усі електричні з'єднання повинні бути надійно закріплені та захищені від механічних пошкоджень.

Вимоги пожежної безпеки

Для запобігання виникненню пожеж необхідно:

- регулярно контролювати температуру акумулятора;
- не допускати перевантаження електропроводки;
- підтримувати чистоту електронних блоків;
- не зберігати легкозаймисті матеріали поблизу обладнання;
- забезпечити наявність порошкового або вуглекислотного

вогнегасника.

У разі виникнення задимлення або загоряння необхідно:

1. негайно вимкнути живлення.
2. Зупинити роботу обладнання.
3. Повідомити відповідальну особу.
4. Використати первинні засоби пожежогасіння.
5. При необхідності викликати пожежно-рятувальну службу.

Вимоги безпеки після завершення роботи

Після завершення роботи необхідно:

- вимкнути живлення робота;
- перевірити технічний стан вузлів та агрегатів;
- очистити конструкцію від пилу та рослинних залишків;
- перевірити кріплення елементів шасі;
- поставити акумулятор на заряджання;
- зберігати робот у сухому приміщенні, захищеному від атмосферних

впливів.

Дії в аварійних ситуаціях

У випадку втрати керування або виникнення аварійної ситуації необхідно:

- натиснути кнопку аварійної зупинки;
- відключити акумуляторну батарею;
- обмежити доступ сторонніх осіб до небезпечної зони;

- провести діагностику та усунути несправність;
- відновлювати роботу лише після повної перевірки обладнання.

Дотримання зазначених вимог забезпечує безпечну експлуатацію мобільного колісного робота, підвищує надійність його роботи та мінімізує ризик травмування персоналу під час виконання робіт з моніторингу втрат збіжжя.

4.6 Висновки до розділу

Проведений аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів показав, що основними джерелами небезпеки під час експлуатації мобільного колісного робота є рухомі механізми, електричне обладнання та несприятливі умови навколишнього середовища. Запропоновані організаційні, технічні та конструктивні заходи дозволяють забезпечити безпечні умови праці персоналу, підвищити надійність роботи роботизованої системи та мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій.

РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Техніко-економічні показники проєкту

Для оцінки ефективності розробленої конструкції мобільного колісного робота проведено аналіз його технічних та економічних показників. Використання роботизованої платформи для моніторингу втрат збіжжя дозволяє автоматизувати процес збору інформації, підвищити точність визначення втрат зерна та скоротити витрати часу на обстеження посівних площ.

Основними технічними перевагами розробленого мобільного робота є висока точність позиціонування, автономність роботи, можливість передачі даних у режимі реального часу та інтеграція із сучасними системами точного землеробства. Завдяки використанню RTK-GPS навігації забезпечується точність визначення координат до 2–3 см, що дозволяє формувати детальні карти втрат збіжжя та своєчасно коригувати налаштування зернозбиральної техніки.

Розроблена конструкція оснащена чотирма мотор-редукторами сумарною потужністю 200 Вт та акумуляторною батареєю LiFePO₄ ємністю 40 А·год, що забезпечує автономну роботу протягом 4–6 годин. За цей час робот може обстежити від 20 до 30 га посівних площ залежно від швидкості руху та режиму роботи датчиків.

Основні техніко-економічні показники мобільного робота наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні техніко-економічні показники мобільного колісного робота

Показник	Одиниця виміру	Значення
Робоча швидкість руху	км/год	3–5
Точність позиціонування RTK-GPS	см	±2
Час автономної роботи	год	4–6
Ємність акумулятора	А·год	40

Напруга живлення	В	24
Запас енергії	Вт·год	960
Кількість приводних коліс	шт.	4
Кількість відеокамер	шт.	2
Кількість LiDAR-сканерів	шт.	1
Маса робота	кг	45–50
Площа контролю за робочу зміну	га	20–30
Дальність передачі даних	м	до 1000

Економічна ефективність використання мобільного робота полягає у зниженні витрат на проведення контролю втрат зерна та підвищенні якості прийняття управлінських рішень. На відміну від ручного способу контролю, який потребує значних трудових витрат та характеризується суб'єктивністю оцінок, роботизована система забезпечує автоматизований збір даних та формування електронних карт втрат.

Орієнтовна вартість виготовлення мобільного робота становить близько 55–60 тис. грн, що включає витрати на придбання мотор-редукторів, акумуляторної батареї, електронних компонентів, датчиків, навігаційного обладнання та матеріалів для виготовлення рами.

Використання робота дозволяє:

- скоротити трудомісткість контролю втрат зерна на 70–80 %;
- підвищити точність визначення втрат на 25–30 %;
- забезпечити оперативне отримання інформації в режимі реального часу;
- знизити експлуатаційні витрати на обстеження полів;
- підвищити ефективність використання зернозбиральної техніки.

За рахунок своєчасного виявлення зон підвищених втрат зерна та оптимізації налаштувань комбайнів можливе зменшення втрат урожаю на 0,5–1,0 %, що для середнього господарства площею 1000 га забезпечує додаткове збереження кількох тонн зерна за сезон.

Таким чином, розроблений мобільний колісний робот є технічно

доцільним та економічно ефективним рішенням для моніторингу втрат збіжжя. Його впровадження сприятиме підвищенню ефективності виробництва, зниженню експлуатаційних витрат та розвитку технологій точного землеробства в аграрному секторі України.

5.2. Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення бакалаврського проєкту полягає у розробленні конструкції мобільного колісного робота для моніторингу втрат збіжжя, який може бути використаний у системах точного землеробства для автоматизованого контролю якості виконання збиральних робіт.

Запропонована конструкція роботизованої платформи забезпечує можливість оперативного визначення втрат зерна після проходу зернозбирального комбайна, формування цифрових карт втрат та передачі результатів моніторингу в режимі реального часу оператору або до інформаційної системи господарства.

Практичне впровадження розробленого мобільного робота дозволить:

- автоматизувати процес контролю втрат збіжжя під час збирання врожаю;
- підвищити точність оцінювання втрат зерна порівняно з традиційними ручними методами;
- скоротити витрати часу на проведення польових обстежень;
- зменшити трудомісткість виконання контрольних операцій;
- забезпечити оперативне виявлення зон підвищених втрат урожаю;
- підвищити ефективність налаштування та експлуатації зернозбиральних комбайнів;
- знизити економічні втрати сільськогосподарських підприємств;
- створити передумови для подальшого впровадження роботизованих технологій в аграрному виробництві.

Практичну цінність також становлять розроблені конструктивні рішення мобільної платформи, зокрема конструкція рами, колісного шасі, поворотного вузла та системи електроприводу, які можуть бути використані під час

створення спеціалізованих наземних роботів для виконання інших технологічних операцій у сільському господарстві.

Розроблені структурна та функціональна схеми керування можуть бути використані як основа для створення інтелектуальних роботизованих систем моніторингу стану посівів, контролю якості збирання врожаю та автоматизованого збору польової інформації.

Отримані результати можуть бути використані:

1. у фермерських господарствах та агрохолдингах;
2. у науково-дослідних установах аграрного профілю;
3. у проєктно-конструкторських організаціях;
4. у навчальному процесі закладів вищої освіти спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

Таким чином, результати проєкту мають практичну спрямованість та можуть бути використані для підвищення ефективності контролю втрат збіжжя, удосконалення технологій точного землеробства та розвитку сучасних роботизованих систем аграрного призначення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврському проєкті виконано комплекс теоретичних, конструкторських та інженерних досліджень, спрямованих на створення сучасної роботизованої платформи для потреб точного землеробства.

1. Проведено аналіз сучасних технологій моніторингу втрат зерна під час збирання врожаю та встановлено, що традиційні методи контролю характеризуються значною трудомісткістю, недостатньою оперативністю та високою залежністю від людського фактора. Визначено перспективність використання мобільних роботизованих систем для автоматизації процесу контролю втрат збіжжя.

2. Виконано огляд існуючих конструкцій автономних мобільних роботів та роботизованих платформ сільськогосподарського призначення. Встановлено, що найбільш ефективним рішенням для роботи в польових умовах є колісна платформа з електричним приводом, яка забезпечує високу маневреність, достатню прохідність та низьке енергоспоживання.

3. Розроблено конструкцію мобільного колісного робота, до складу якої входять несуча рама, чотириколісне шасі, система електроприводу, акумуляторна батарея, навігаційне обладнання та комплекс сенсорів для збору інформації про втрати збіжжя.

4. Обґрунтовано вибір основних вузлів та агрегатів роботизованої системи. Для реалізації функцій автономного керування прийнято використання бортового комп'ютера Raspberry Pi 4 та контролера Arduino Mega 2560. Для навігації передбачено застосування RTK-GPS та LiDAR-сканера, що забезпечують високу точність позиціонування та орієнтації робота в просторі.

5. Виконано вибір системи приводу мобільної платформи. Для руху робота прийнято чотири мотор-редуктори постійного струму із сумарною встановленою потужністю 200 Вт, які забезпечують необхідні тягові характеристики та можливість руху по стерні й нерівностях поверхні поля.

6. Проведено вибір системи живлення. Для забезпечення автономної роботи використано акумуляторну батарею типу LiFePO₄ напругою 24 В та ємністю 40 А·год. Запас енергії акумулятора становить 960 Вт·год, що

забезпечує безперервну роботу мобільної платформи протягом 4–6 годин.

7. Розроблено структурну та функціональну схеми системи керування мобільним роботом, які забезпечують взаємодію між навігаційними модулями, датчиками, виконавчими механізмами та оператором.

8. Виконано комплект графічної документації відповідно до вимог ЄСКД та ДСТУ, який включає загальний вигляд мобільного робота, складальне креслення колісного шасі, деталювання рами, колісного модуля, поворотного вузла, функціональну схему та техніко-економічні показники проєкту.

9. Розроблено заходи з охорони праці та безпечної експлуатації мобільного робота. Проведено аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів та запропоновано технічні й організаційні рішення щодо мінімізації професійних ризиків.

10. Проведена техніко-економічна оцінка підтвердила доцільність впровадження розробленої конструкції. Використання мобільного робота дозволяє підвищити точність контролю втрат зерна, скоротити трудомісткість обстеження полів на 70–80 %, забезпечити оперативне отримання даних та підвищити ефективність роботи зернозбиральної техніки.

Таким чином, поставлену мету бакалаврського проєкту досягнуто. Розроблена конструкція мобільного колісного робота відповідає сучасним вимогам галузевого машинобудування, забезпечує ефективний моніторинг втрат збіжжя та може бути використана як основа для створення перспективних роботизованих систем точного землеробства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 №2694-ХІІ (зі змінами та доповненнями).
2. Закон України «Про пожежну безпеку» від 17.12.1993 №3745-ХІІ (зі змінами та доповненнями).
3. Бойко А. І., Кравчук В. І. Надійність машин та обладнання : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2021. 328 с.
4. Булгаков В. М., Адамчук В. В., Надикто В. Т. Сільськогосподарські машини. Теоретичні основи, конструкція та розрахунок : підручник. Київ : Аграрна наука, 2020. 544 с.
5. Войтюк Д. Г., Дубровін В. О. Сільськогосподарські та меліоративні машини : підручник. Київ : Вища освіта, 2019. 544 с.
6. Гевко І. Б., Рогатинський Р. М. Проектування машин та обладнання : навчальний посібник. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2020. 304 с.
7. Григор'єв А. В., Мельник В. М. Основи робототехніки та мехатроніки : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Сікорського, 2022. 312 с.
8. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання ризику та зниження ризику. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 84 с.
9. ДСТУ ISO 18497:2021. Сільськогосподарські машини та трактори. Безпека високоавтоматизованих машин. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 52 с.
10. Кравчук В. І., Лінник М. К. Машиновикористання в землеробстві : підручник. Київ : НУБіП України, 2022. 420 с.
11. Кузьо І. В., Якимів В. В. Основи мехатронних систем : навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. 268 с.
12. Ловейкін В. С., Романченко О. В. Основи проектування машин та обладнання : навчальний посібник. Київ : Компрінт, 2020. 318 с.
13. Надточій О. В., Бойко А. І. Технічна експлуатація машинно-тракторного парку : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2023. 352 с.
14. Погорілий Л. В., Барановський В. М. Основи точного землеробства : навчальний посібник. Київ : Аграрна наука, 2021. 286 с.

15. Сидорчук О. В., Тригуба А. М. Інженерія мобільних машин : навчальний посібник. Львів : Сполом, 2020. 296 с.
16. Шматков Г. Г., Кравченко О. М. Організація та управління машинобудівним виробництвом : навчальний посібник. Київ : К, 2021. 336 с.
17. Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi 4 Model B Datasheet. Cambridge : Raspberry Pi Trading Ltd., 2024. 48 p.
18. Arduino. Arduino Mega 2560 Rev3 Technical Specifications. Turin : Arduino S.r.l., 2024. 24 p.
19. Slamtec. RPLIDAR A1M8 Development Kit User Manual. Shanghai : Slamtec Co., Ltd., 2023. 68 p.
20. Ublox AG. ZED-F9P High Precision GNSS Module Data Sheet. Thalwil : Ublox AG, 2024. 92 p.
21. FarmDroid. FD20 Autonomous Field Robot Technical Documentation. Vejen : FarmDroid ApS, 2024. 74 p.
22. AgXeed. AgBot Autonomous Farming Platform. Technical Brochure. Utrecht : AgXeed B.V., 2024. 56 p.
23. Naïo Technologies. Agricultural Robots Product Catalogue. Toulouse : Naïo Technologies, 2023. 48 p.
24. EarthSense Inc. TerraSentia Field Phenotyping Robot. Technical Specifications. Illinois : EarthSense Inc., 2024. 42 p.
25. Mott R. L., Vavrek E. J. Machine Elements in Mechanical Design. 7th Edition. New York : Pearson Education, 2022. 912 p.
26. Shigley J. E., Budynas R. G., Nisbett J. K. Mechanical Engineering Design. 11th Edition. New York : McGraw-Hill Education, 2020. 1104 p.
27. Bolton W. Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering. 8th Edition. Harlow : Pearson Education, 2023. 672 p.
28. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. 2nd Edition. Cham : Springer Nature, 2024. 2304 p.
29. ISO 4254-1:2023. Agricultural Machinery — Safety — Part 1: General Requirements. Geneva : International Organization for Standardization, 2023.