

ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи

освітнього ступеня «Магістр» на тему

**Підвищення ефективності механізації овочівництва
шляхом використання машинного зору**

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-4-24

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Кілочок Владислав Олександрович

Керівник: _____ Бойко Владислав Борисович

Рецензент: _____

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: «Магістр»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
тракторів і сільськогосподарських машин

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«___» _____ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кілочку Владиславу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності механізації овочівництва шляхом використання машинного зору

керівник роботи Бойко Владислав Борисович к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«24» жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 9.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Науковий звіт кафедри ТСГМ за темою 0117U004545. Дані господарської діяльності підприємства, перспективи з технічними характеристиками засобів для реалізації машинного зору та технічна характеристика агромоста.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан питання і завдання досліджень. 2. Конструктивні рішення 3. Теоретичні дослідження. 4. Експериментальні дослідження. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність роботи. Висновки. Список використаних джерел

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (2 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (3 аркуші, А4). 3. Експериментальні дослідження (3 аркуші, А4) 4. Охорона праці (1 аркуш, А4) 4. Економічні показники (1 аркуш, А4). 5. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	Бойко В. Б., доцент		
нормоконтроль	Золотовська О.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 5.09.2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 20.09.2025 р.	Виконано
2	Теоретичний	до 23.10.2025 р.	Виконано
3	Експериментальний	до 11.11.2025 р.	Виконано
4	Охорона праці	до 22.11.2025р.	Виконано
5	Економічний	до 26.11.2025 р.	Виконано
6	Демонстраційна частина	до 7.12.2025 р.	Виконано

Студент

_____ (підпис)

Кілочок В.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Бойко В.Б.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кілочок В.О. Підвищення ефективності механізації овочівництва шляхом використання машинного зору / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності механізації овочівництва шляхом використання машинного зору, який дозволяє проводити спектральний аналіз ґрунту та рослин за результатами якого виконується планування проведення операцій з вирощування овочевих культур.

В поєднанні з мостовою технологією машинний зір дозволяє реалізувати автоматизацію процесу вирощування овочевих культур та підвищити ефективність точного землеробства.

Виконавши аналіз та скориставшись досвідом напрацювань в даному напрямку науковців кафедри тракторів та с.г. машин запропоновано технічне рішення пристрою для реалізації машинного зору на мостовій машині для реалізації її роботи в автоматичному режимі.

В результаті проведених експериментів встановлено працездатність пристрою, так відхилення від заданих координат агромоста з робочими органами знарядь не перевищила 1,5 см.

За результатами проведених досліджень розроблено заходи з охорони праці при експлуатації агромоста з елементами машинного зору.

Економічні дослідження підтвердили ефективність використання машинного зору в мостовій технології точного землеробства

Ключові слова: машинний зір, мостова технологія, агроміст, штучний інтелект, автоматизація.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	11
1.1 Аналіз сучасного стану механізації овочівництва	11
1.2 Розвиток мостових і роботизованих систем у точному землеробстві	15
1.3 Роль систем машинного зору в аграрній робототехніці	19
1.4 Особливості та актуальність застосування машинного зору в мостовій технології точного землеробства	22
1.5 Висновки	25
2 КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ	26
2.1. Обґрунтування вибору принципової схеми системи машинного зору	26
2.2 Вибір та характеристика елементної бази системи машинного зору для агроостової машини	33
2.3 Висновки	38
3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	40
3.1 Розрахунок кінематичних параметрів агроостової машини	40
3.1.1 Кінематична схема системи	40
3.1.2 Поступальний рух ферми вздовж рейок	41
3.1.3 Рух каретки уздовж ферми	42
3.1.4 Просторова траєкторія руху знаряддя	43
3.1.5 Взаємодія кінематичної системи з машинним зором	43
3.1.6 Аналіз параметрів руху	44
3.1.7 Узагальнення кінематичної моделі	45
3.1.8 Графічна інтерпретація кінематичних параметрів агроостової машини	46
3.2 Аналіз динамічної стійкості конструкції ферми	49

3.3	Теоретичне обґрунтування параметрів системи машинного зору	53
3.4	Висновки	56
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	57
4.1	Мета і завдання експерименту	57
4.2	Експериментальна установка	57
4.3	Методика експериментальних досліджень системи машинного зору	59
4.4	Результати експериментальних досліджень та регресійний аналіз	60
4.5	Висновки	63
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	64
5.1	Заходи безпеки під час експлуатації агрометрової машини	64
5.2	Електробезпека при експлуатації агромета з системою машинного зору	66
5.3	Пожежна безпека при експлуатації агромета з системою машинного зору	68
5.4	Безпека в надзвичайних ситуаціях	70
5.5	Висновки	72
6	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ РОБОТИ	73
6.1	Вихідні дані	73
6.2	Розрахункові залежності [33]	74
6.3	Висновки	77
	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	78
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79
	ДОДАТКИ - 83	

ВСТУП

Актуальність роботи. Автоматизація технологічних процесів це один із кроків підвищення ефективності рослинництва, а саме вирощування овочів з використанням мостової технології. Технологічні досягнення в галузі мікроелектроніки сенсорних технологій дозволили наблизити використання роботів не тільки на виробничих лініях в умовах заводу чи фабрики а і вивести їх в поля на допомогу аграріям. Так поява роботизованих платформ або агророботів стала вже буденністю а не якоюсь не досяжною фантастикою. Технологічно роботизовані машини дозволяю виконувати різні операції від посадки і догляду за рослинами до збирання їх врожаю [1].

Однією з ключових переваг використання автономних роботів у сільському господарстві є їхня виняткова точність, надійність і здатність працювати безперервно з мінімальними паузами. Завдяки цьому фермери можуть істотно підвищити ефективність своєї діяльності, адже роботи виконують завдання без зупинок і втоми. До того ж такі машини можуть діяти в умовах, небезпечних або складних для людини – на крутих схилах, у зонах, забруднених хімікатами чи пестицидами. Це робить їх оптимальним рішенням для виконання операцій, які людина здійснити не може або які є надто ризикованими [2].

Попри це, існують певні труднощі, які необхідно подолати для повної інтеграції автономних систем у сільське господарство. Наприклад, операції з посадки, поливу чи збору врожаю потребують щонайменше базового рівня штучного інтелекту, тоді як вибіркоче прополювання вимагає високої точності, адже робот має вміти розпізнавати бур'яни та знищувати лише їх, не пошкоджуючи культурні рослини.

Бур'яни часто конкурують із посівами за воду, світло та поживні речовини, тому контроль їхнього росту є одним із головних завдань аграрного виробництва. У сучасному землеробстві ручні та механічні методи прополювання залишаються дієвими, адже дозволяють ефективно боротися з бур'янами без шкоди для довкілля, на відміну від застосування хімічних гербіцидів.

Спростити процес автоматизації роботизованих машин можливо шляхом поєднання використання систем машинного зору та жорсткої їх прив'язки до координат поля наприклад використовуючи координатно-транспортну систему з направляючими рейками та технологічними доріжками як в мостовому землеробстві [3].

Мета роботи підвищення ефективності механізації овочівництва шляхом розробки системи машинного зору для агромостової машини

Завдання кваліфікаційної роботи:

1. Аналіз систем машинного зору для координації робочих органів знарядь роботизованих машин.
2. Розробка системи машинного зору для агромостової машини з урахуванням напрацювань за даним напрямом.
4. Експериментально підтвердити працездатність та ефективність системи машинного зору мостової машини
5. Провести економічні дослідження ефективності роботи мостової машини з використанням машинного зору на вирощуванні овочів.

Об'єкт дослідження. Агромостова машина.

Предмет дослідження. Система машинного зору для координації робочих органів знарядь агромостової машини.

Наукова новизна досліджень:

Вперше для агромостових машин запропоновано концепцію інтеграції системи машинного зору, яка забезпечує автоматичну координацію робочих органів під час виконання технологічних операцій у точному землеробстві.

Розроблена система дозволяє ідентифікувати просторове положення рослин і бур'янів у полі в реальному часі, що створює передумови для селективного управління виконавчими механізмами без участі оператора.

Наукова новизна полягає у застосуванні адаптивного алгоритму аналізу зображення на основі параметрів освітлення, кольору та контрастності ґрунту, що підвищує точність виявлення об'єктів навіть у змінних польових умовах.

Отримані результати розвивають сучасні уявлення про використання комп'ютерного зору в системах автоматизованого керування аграрними роботами та розширюють можливості мостової технології у вирощуванні овочевих культур.

Практичне значення кваліфікаційної роботи.

Результати дослідження мають прикладне значення для створення високоефективних роботизованих систем, здатних автоматично виконувати операції з догляду за культурами.

Запропонована система машинного зору може бути використана як складова частина автоматизованих мостових машин, а також інтегрована у вже існуючі мобільні платформи для моніторингу стану посівів і точного прополювання.

Реалізація розробленої системи сприятиме зниженню витрат ручної праці, зменшенню використання гербіцидів, підвищенню врожайності та екологічній безпечності технологічних процесів.

Впровадження системи машинного зору в практику овочівництва дає змогу наблизитися до створення повністю автономних агромотрових комплексів, здатних працювати без постійного контролю людини.

Апробація. Кілочок В.О. Підвищення ефективності механізації овочівництва шляхом використання машинного зору. Підвищення тягово-зчіпних властивостей колісних тракторів загального призначення. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2025

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз сучасного стану механізації овочівництва

Механізація овочівництва є одним із найважливіших напрямів підвищення ефективності виробництва рослинницької продукції. Вона визначає рівень продуктивності праці, якість виконання технологічних операцій і кінцеву рентабельність виробництва. У сучасних умовах аграрного ринку, коли спостерігається тенденція до зростання вартості енергоресурсів, насіння, добрив і засобів захисту рослин, саме механізація та автоматизація технологічних процесів стають ключовими чинниками зниження собівартості продукції й підвищення конкурентоспроможності господарств [4].

Традиційні засоби механізації, що застосовуються у відкритому ґрунті, передбачають використання колісних тракторів і навісних або причіпних машин для обробки ґрунту, посіву, догляду за культурами та збирання врожаю. Хоча така техніка є поширеною, вона має низку обмежень, які проявляються насамперед у порушенні структури ґрунту, ущільненні орного шару колесами та недостатній точності виконання операцій. Часті проходи техніки по полю спричиняють деградацію ґрунту, зменшення його водопроникності та аерації, що в підсумку призводить до зниження урожайності.

Однією з основних проблем сучасного овочівництва є низький рівень адаптації наявних машин до точних технологій вирощування. Більшість агрегатів розраховані на роботу з однорідними культурами та великими площами, тоді як овочеве виробництво потребує індивідуального підходу до кожної ділянки, контролю параметрів мікроклімату, вологості, стану рослин тощо. Тому у світі спостерігається активний перехід від масової механізації до інтелектуалізованих технологій точного землеробства, де головним інструментом стають сенсори, роботизовані системи та елементи машинного зору.

На сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу все більшого поширення набувають **автоматизовані та мехатронні комплекси**, які дозволяють зменшити людську участь у виконанні складних технологічних процесів. Прикладами таких систем є роботизовані платформи для сівби, прополювання, поливу, диференційного внесення добрив, моніторингу стану рослин і збирання врожаю (рис. 1.1). Такі рішення реалізуються у вигляді автономних машин, керованих за допомогою систем навігації GNSS, датчиків положення та відеоаналізу.



Рисунок 1.1 – Використання роботизованої платформи Dino на прополюванні овочів від компанії Naïo Technologies (Франція)

Впровадження роботизованих систем у рослинництві має низку беззаперечних переваг:

- підвищення точності виконання технологічних операцій (до ± 2 см при використанні RTK-навігації);
- скорочення енергетичних і трудових витрат;
- зменшення втрат урожаю через механічне пошкодження рослин;
- можливість безперервної роботи в денний і нічний час;

- зниження навантаження на ґрунт завдяки оптимізації руху машин по постійних коліях.

Однак поряд із цим залишається низка проблем, які гальмують широке впровадження роботизованих систем у сільське господарство. Насамперед це висока вартість обладнання, складність технічного обслуговування, відсутність єдиних стандартів програмного забезпечення, а також потреба у високоточних системах орієнтації та комп'ютерного зору, здатних адекватно реагувати на мінливі умови середовища.

Особливої уваги потребує питання **екологічної безпеки** процесів механізації овочівництва. Використання важкої колісної техніки призводить до надмірного ущільнення ґрунту (рис. 1.2) [5], зниження його родючості та погіршення водно-повітряного режиму. За даними агроекологічних досліджень, до 60 % зниження врожайності овочевих культур може бути спричинено саме ущільненням ґрунту під дією маси машин і тракторів.



Рисунок 1.2 – Ущільнення ґрунту рушіями

Тому провідні наукові центри світу розробляють альтернативні системи пересування техніки – зокрема порталні мостові машини, що рухаються по сталих коліях або рейках, повністю виключаючи контакт ходових систем із оброблюваною поверхнею поля [6].



Рисунок 1.2 – Переміщення порталного трактора ЕОЛЕ по постійним коліям (Франція)

Сучасні тенденції розвитку механізації овочівництва свідчать про необхідність переходу від масового застосування окремих машин до створення **єдиних комплексних систем**, у яких об'єднані елементи автоматизації, електроніки, робототехніки й інформаційних технологій. Саме такий підхід забезпечує високу точність виконання операцій, можливість адаптації до змін середовища, зниження втрат ресурсів і мінімізацію впливу людського фактора.

Значну роль у розвитку інноваційних технологій відіграють **системи машинного зору**, що стають «очима» аграрних роботів. Вони дозволяють отримувати та аналізувати інформацію про стан рослин, бур'янів, структуру ґрунту й інші параметри поля. Застосування машинного зору в поєднанні з мостовими технологіями створює передумови для формування нової концепції

автоматизованого догляду за овочевими культурами – без застосування пестицидів і з максимальною точністю позиціонування.

Таким чином, аналіз сучасного стану механізації овочівництва показує, що перехід до автономних і роботизованих систем є закономірним етапом розвитку агротехнологій. Використання мехатронних модулів, комп'ютерного зору й штучного інтелекту в складі агромотрових машин дозволяє суттєво підвищити ефективність виробництва, знизити екологічні ризики й забезпечити сталість технологічних процесів.

1.2 Розвиток мостових і роботизованих систем у точному землеробстві

У світовій практиці розвитку сільськогосподарської техніки спостерігається чітка тенденція переходу від масових колісних агрегатів до порталних, модульних і роботизованих систем. Головною ідеєю такого підходу є зменшення навантаження на ґрунт, підвищення точності виконання технологічних операцій і повна автоматизація процесів вирощування рослин.

Перші концепції мостових машин виникли ще у 1970–1980-х роках, однак їх активний розвиток почався на початку XXI століття разом із появою електронних систем керування, GPS-навігації, лазерних сканерів і датчиків положення. Одним із першопрохідців у цьому напрямі був британський дослідник Chamen, який обґрунтував переваги контрольованого руху техніки по постійних коліях (*Controlled Traffic Farming, CTF*) [7]. Згідно з його концепцією, усі транспортні засоби повинні пересуватися лише визначеними шляхами, залишаючи решту поля недоторканою, що дає змогу повністю усунути проблему ущільнення ґрунту.

Подальший розвиток ідеї отримав у створенні експериментальних **мостових систем**, які поєднували ознаки транспортної естакади та мобільної платформи. Такі машини мали збільшену ширину прольоту (до 18–24 м) і рухалися по рейкових напрямних або укріплених коліях. Вони забезпечували

вільний простір під фермами для розміщення різного навісного обладнання – сівалок, обприскувачів, збиральних модулів, сенсорів моніторингу тощо. Завдяки цьому стало можливим обробляти поле без постійного повторного ущільнення, що суттєво покращувало структуру орного шару та водно-повітряний режим.

Одним із найвідоміших прикладів сучасних реалізацій мостової технології є система **AGROKRUIH** (Словаччина), побудована за принципом кругового обробітку поля з використанням радіально-рухомих ферм [8]. Машина обслуговує поле по замкненій траєкторії, виконуючи сімбу, догляд і збирання врожаю без виходу за межі контрольованої смуги. Іншою відомою розробкою є **робот Ladybird** (Австралія) – автономна сонячна платформа для точного землеробства, здатна здійснювати моніторинг стану рослин і селективне прополювання.



Рисунок 1.3 – Система AGROKRUIH

Схожий підхід реалізовано в роботі Hortibot (Данія) – це невеликий автономний комплекс для догляду за овочевими культурами у відкритому ґрунті. Hortibot використовує систему комп'ютерного зору для розпізнавання бур'янів і виконує механічне видалення без застосування гербіцидів. Завдяки цьому

досягається екологічно чисте виробництво і зменшення хімічного навантаження на ґрунт.

Новий етап розвитку мостових технологій пов'язаний із появою модульних агросистем, що поєднують функції кількох машин у єдиному комплексі. Найяскравішим прикладом є німецька система NEXAT – універсальна платформна машина шириною понад 14 м, яка рухається по постійних коліях (рис. 1.4) і здійснює всі основні операції – від оранки та сівби до збирання врожаю. NEXAT побудована за модульним принципом: силова установка розміщується всередині ферми, а спеціальні знімні модулі змінюються залежно від виконуваної операції [9]. Машина обладнана гібридним приводом, системами автоматичного керування та високоточною GPS-навігацією.

Використання таких платформ дає низку переваг:

- повна відсутність повторного ущільнення ґрунту;
- оптимальне використання енергоресурсів;
- зменшення кількості проходів техніки;
- можливість інтеграції роботизованих маніпуляторів, сенсорів і систем машинного зору.



Рисунок 1.4 – Портальний (мостовий) трактора NEXAT [9]

Розвиток мостових машин тісно пов'язаний із принципами точного землеробства (*Precision Farming*), які передбачають збирання, обробку та використання інформації про поле для прийняття рішень у реальному часі. Завдяки цифровим технологіям, супутниковому позиціонуванню й інтелектуальним системам керування такі машини здатні адаптувати свої дії до поточних умов – вологості ґрунту, стану рослин, рівня освітлення.

Важливою складовою новітніх мостових і роботизованих систем є мехатроніка, яка поєднує механічну частину, електроніку, сенсори та програмне забезпечення в єдину керовану структуру. Саме мехатронні рішення дозволяють реалізувати високу точність руху, автоматичну зміну режимів роботи й синхронізацію виконавчих механізмів [10].

Сьогодні у провідних наукових установах ЄС, США, Китаю та України ведуться дослідження щодо створення адаптивних мостових машин, оснащених системами комп'ютерного зору й штучного інтелекту [11, 12]. Їхнє завдання – не лише механічне виконання операцій, а й самостійне прийняття рішень на основі аналізу даних, отриманих із сенсорів. Такі системи розглядаються як базовий елемент аграрної робототехніки майбутнього, що поєднує автономність, точність і екологічність.

Підсумовуючи, можна зазначити, що розвиток мостових і роботизованих систем відкриває новий етап еволюції технічного забезпечення землеробства. Їх впровадження забезпечує гармонійне поєднання механізації, автоматизації та цифрових технологій, що формує основу інтелектуального аграрного виробництва. Перспективним напрямом подальших досліджень є створення спеціалізованих систем машинного зору для координації робочих органів агромоєтових машин, здатних ефективно функціонувати у змінних польових умовах.

1.3 Роль систем машинного зору в аграрній робототехніці

Розвиток роботизованих технологій у сільському господарстві нерозривно пов'язаний із впровадженням систем машинного зору, які виконують функцію «очей» автономних машин. Ці системи дозволяють роботам сприймати навколишнє середовище, аналізувати стан рослин, розпізнавати бур'яни, визначати відстані, орієнтуватися в просторі та приймати рішення у реальному часі. Без ефективної системи машинного зору неможливо забезпечити повну автономність аграрних роботів, оскільки саме візуальні дані забезпечують базу для навігації, управління робочими органами і взаємодії з об'єктами польового середовища.

У загальному розумінні машинний зір (Machine Vision) – це сукупність технічних і програмних засобів, призначених для автоматичного отримання, обробки та аналізу зображень.

Основними складовими таких систем є:

- оптична підсистема (камери, об'єктиви, освітлення);
- система збору та цифрової обробки сигналу (процесори, контролери, плати відеозахоплення);
- алгоритмічна частина (методи аналізу зображень, нейронні мережі, алгоритми розпізнавання);
- інтерфейс управління – взаємодія з виконавчими механізмами, які реагують на візуальну інформацію.

Машинний зір дозволяє автоматизувати процеси, які раніше вимагали участі людини, – наприклад, визначення стиглості плодів, виявлення бур'янів, контроль якості насаджень чи орієнтацію техніки під час руху. У поєднанні зі штучним інтелектом така система формує основу когнітивного управління роботами, коли машина не лише «бачить», але й розуміє ситуацію та діє відповідно до неї.

Упродовж останнього десятиліття системи машинного зору стали обов'язковим елементом аграрних роботів. Розглянемо найбільш актуальні з них. Робот Ladybird (Австралія) – це автономна сонячна платформа (рис. 1.5) [13], що використовує багатоспектральні камери та 3D-сенсори для ідентифікації рослин і бур'янів. Система забезпечує селективне прополювання та аналіз стану культур.



Рисунок 1.5 – Автономна роботизована платформа Ladybird

Наступним представником агророботів, що заслуговує на увагу є експериментальний робот Hortibot (Данія), який завдяки відеокамері та алгоритму сегментації HSV розпізнає бур'яни серед культур і здійснює вибіркоче внесення гербіцидів або механічне прополювання (рис. 1.6) [14].



Рисунок 1.6 – Використання відеокамери та алгоритму сегментації HSV на агророботі Hortibot (Данія)

EcoRobotix (Швейцарія) – автономний польовий робот, який застосовує високоточні камери для визначення положення бур'янів і точкового внесення

мікродоз гербіцидів. Завдяки цьому зменшується використання хімікатів у 20 разів.



Рисунок 1.7 – Система машинного зору автономного польового робота EcoRobotix

NEXAT Vision System (рис. 1.8) – система машинного зору, інтегрована в модульну платформу NEXAT. Вона забезпечує контроль положення агрегатів, оптимізацію руху по коліях і підтримку стабільності робочих органів у польових умовах.

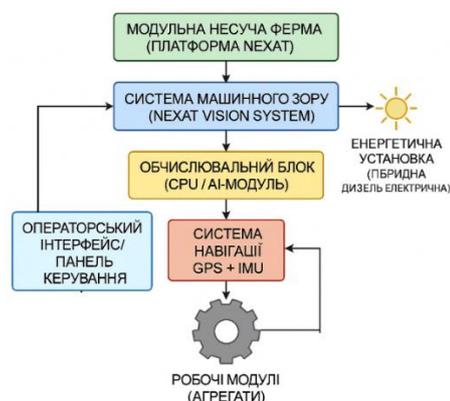


Рисунок 1.8 – Візуалізація роботи системи машинного зору NEXAT Vision System та її блок схема

Використання таких систем дає змогу не лише покращити якість технологічних операцій, а й зробити аграрне виробництво екологічнішим. Машини з комп'ютерним зором замінюють частину ручної праці, зменшують використання гербіцидів і мінімізують втрати врожаю від механічних пошкоджень.

Основні функції систем машинного зору в аграрній робототехніці

1. Навігація та орієнтація в полі – виявлення рядків посіву, меж ділянки, перешкод, визначення оптимальної траєкторії руху.
2. Контроль стану рослин – аналіз кольору листя, площі крони, ознак стресу чи дефіциту вологи.
3. Розпізнавання бур'янів – класифікація об'єктів за формою, кольором і текстурою для вибіркового видалення небажаної рослинності.
4. Управління робочими органами – коригування положення інструментів у реальному часі на основі координат, отриманих із відеосистеми.
5. Моніторинг процесів – збирання зображень для статистичного аналізу, побудови карт урожайності та агроекологічного моніторингу.

Системи машинного зору також сприяють розвитку кооперативних роботизованих систем, у яких декілька роботів обмінюються інформацією про поле. Це створює основу для формування «розумних» агротехнічних ферм, де всі операції узгоджені між собою.

1.4 Особливості та актуальність застосування машинного зору в мостовій технології точного землеробства

Використання систем машинного зору у мостових аграрних машинах є одним із ключових напрямів розвитку сучасного точного землеробства. Ця технологія дозволяє поєднати автоматизоване керування, візуальну аналітику та штучний інтелект для досягнення максимальної точності виконання польових операцій без участі людини.

Мостові машини, які рухаються по сталих рейкових або колійних напрямних, створюють ідеальні умови для інтеграції систем візуального контролю. Завдяки відсутності контакту з оброблюваною поверхнею ґрунту, камера або сенсорні блоки можуть фіксувати зображення рослин і ґрунту з однакової висоти та кута, що значно підвищує точність розпізнавання об'єктів.

Такі системи дозволяють визначати стан культур, проводити моніторинг росту, виявляти бур'яни, дефіцит вологи або поживних речовин, а також координувати положення робочих органів відповідно до отриманих даних.

Особливість машинного зору в мостових системах полягає в тому, що камера не лише знімає окремі кадри, а й працює у безперервному потоці даних, утворюючи цифрову «карту» посівів у режимі реального часу. Ця карта використовується для точного позиціонування інструментів – наприклад, для регулювання глибини культивації, спрямованого поливу або селективного видалення бур'янів.

У поєднанні з системами GPS, LiDAR та глибинними сенсорами це забезпечує тривимірну реконструкцію польового середовища, що дає змогу мостовій машині працювати з точністю до кількох сантиметрів навіть у складних умовах освітлення чи нерівностей поверхні.

Ще однією важливою перевагою є можливість адаптивного управління – коли алгоритми машинного зору аналізують поточний стан поля і в режимі реального часу коригують параметри роботи. Наприклад, при виявленні надмірної густоти посівів система може автоматично змінити відстань між рядками або частоту обприскування. Це забезпечує не лише енергетичну ефективність, а й зменшує споживання ресурсів – води, добрив і засобів захисту рослин.

Завдяки машинному зору реалізується концепція інтелектуального агромоніторингу, коли кожна рослина розглядається як окремий об'єкт спостереження. У поєднанні з мостовими машинами, які проходять над посівами багаторазово протягом сезону, це відкриває можливість створення детальної бази даних про розвиток культур, прогнозування врожайності та своєчасне виявлення стресових факторів.

Актуальність застосування машинного зору в мостовій технології зумовлена кількома чинниками:

- Підвищення вимог до екологічності виробництва. Зменшення використання хімічних речовин завдяки точковому впливу.
- Дефіцит трудових ресурсів у сільському господарстві. Роботизовані системи з машинним зором зменшують потребу в ручній праці.
- Необхідність мінімізації ущільнення ґрунту. Мостові машини в поєднанні з візуальною навігацією дозволяють уникнути повторних проходів по полю.
- Перехід до автономних фермерських систем. Машинний зір є базовим компонентом для самонавчальних алгоритмів керування та прогнозування стану посівів.

Отже, системи машинного зору в мостовій технології точного землеробства формують основу нової парадигми автоматизованого агровиробництва, у якій рішення приймаються на основі даних, а не людського досвіду.

Такі системи забезпечують стабільну якість робіт, ефективне використання ресурсів і стійкість виробництва до зовнішніх факторів. Інтеграція машинного зору в агромоєтові машини є не просто технологічним кроком уперед, а стратегічною передумовою переходу до розумного землеробства майбутнього, заснованого на принципах точності, енергоефективності та екологічної безпеки.

Системи машинного зору є ключовим елементом сучасної аграрної робототехніки. Вони забезпечують інтелектуальне сприйняття навколишнього середовища, автоматичний аналіз ситуацій і управління робочими органами. Інтеграція таких систем у мостові машини відкриває можливість переходу до нового рівня точного землеробства – повної автоматизації технологічних процесів вирощування культур з мінімальним втручанням людини.

1.5 Висновки

1. Виконано аналіз сучасного стану механізації овочівництва та обґрунтовано перехід від традиційних колісних машин до інтелектуалізованих роботизованих і мостових систем.

2. Обґрунтовано, що колісна техніка спричиняє ущільнення ґрунту й обмежує точність операцій, тоді як робота по постійних коліях у мостовій технології мінімізує пошкодження ґрунту й підвищує відтворюваність процесів.

3. Доведено що ключову роль в підвищенні ефективності механізації точного землеробства відіграють системи машинного зору, які забезпечують розпізнавання культур і бур'янів, моніторинг стану рослин, навігацію та високоточне керування робочими органами в реальному часі. Приклади платформ (Ladybird, Hortibot, EcoRobotix, NEXAT) підтверджують практичну ефективність такої інтеграції.

4. Доведено актуальність роботи, яка полягає в підвищенні точності виконання механізованих технологічних операцій, продуктивності та екологічності вирощування овочів. Сформовано теоретичні передумови для подальшої розробки технічного рішення, експериментальної перевірки та економічного обґрунтування впровадження.

2 КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ

2.1. Обґрунтування вибору принципової схеми системи машинного зору

Ефективність роботи агромотрових машин у технологіях точного овочівництва значною мірою залежить від здатності системи керування точно визначати положення рослин, бур'янів та інших об'єктів, що знаходяться у зоні роботи робочих органів. У традиційних механізованих комплексах для цього застосовують механічні датчики, індуктивні елементи або системи супутникової навігації. Проте такі засоби не забезпечують необхідної просторової роздільності та швидкодії, особливо за необхідності селективної взаємодії з окремими рослинами. Тому ключовим напрямом у підвищенні ефективності механізації рослинництва є впровадження мостових технологій з інтеграцією машинного зору, що дозволяє реалізувати в цю технологію елементи точного землеробства а саме отримувати структуровану інформацію про поле у вигляді цифрових зображень та оперативно перетворювати її у команди для виконавчих механізмів.

Аналіз вимог до системи машинного зору для мобільних енергетичних машин (агровмістів) в мостовій технології.

Під час проєктування системи машинного зору необхідно враховувати особливості конструкції агромотрової машини параметри та специфіку операцій, що виконуються у овочівництві. В додатку А кваліфікаційної роботи наведено основні вихідні дані для проєктування системи. На відміну від мостових тракторів чи автономних платформ, агроміст має стабільну висоту розташування над поверхнею поля та рухається по жорстко заданій колії, що спрощує завдання підтримання сталої геометрії огляду. Разом з тим вимоги до точності позиціонування значно вищі, оскільки обробіток міжрядь та селективні операції (прополювання, догляд, диференційоване внесення добрив) потребують відхилення не більше 1–2 см.

Система машинного зору має задовольняти такі вимоги:

- висока просторово-часова роздільність, що дозволяє розрізнити дрібні рослини, бур'яни та елементи ґрунтової структури;
- стійкість до змін зовнішніх умов: освітлення, тіні, коливання висоти рослин;
- швидкодія у режимі реального часу, оскільки агроміст рухається без зупинок;
- здатність працювати із забрудненою оптикою или частковим затемненням кадру;
- інтегрованість у загальну систему керування мостовою машиною, включно з приводами робочих органів;
- надійність та мінімальна енергоспоживання, що є важливим для електрифікованих мостових машин.

При цьому система машинного зору має не тільки фіксувати видиме поле, а й формувати координатно-інформаційну модель ділянки, на основі якої ухвалюються рішення щодо корекції положення виконавчих механізмів.

Порівняння можливих принципових підходів до побудови системи

У практиці точного землеробства застосовують декілька архітектурних принципів побудови систем машинного зору:

1. Децентралізована схема, у якій кожен сенсор працює автономно та передає результати аналізу до центрального контролера.
2. Централізована схема, що передбачає наявність єдиного обчислювального блоку, який приймає та опрацьовує весь масив зображень.
3. Комбінована або модульна схема, у якій локальні модулі виконують попередню обробку зображення, а центральний модуль відповідає за складні алгоритми класифікації, навігації та прийняття рішень.

Кожна схема має свої переваги і обмеження, які слід оцінювати в контексті мостової технології.

1. Децентралізована схема

Децентралізована архітектура передбачає розміщення окремих камер з вбудованими процесорами на різних ділянках ферми агромоста. Кожна камера виконує первинну обробку зображення, виділяючи ключові об'єкти та їх координати.

Переваги:

- мінімальне навантаження на центральний процесор;
- висока автономність окремих модулів;
- можливість масштабування без зміни структури системи.

Недоліки:

- складність синхронізації даних з різних камер;
- більша кількість електроніки у зоні, де можливе забруднення та вібрації;
- складніша калібровка.

Для широкопрольотних мостових машин (18–24 м) децентралізована система може створити проблеми через різний час проходження сигналу та можливі розбіжності в обробці даних.

2. Централізована схема

Централізована система передбачає використання однієї або кількох камер, які охоплюють всю робочу ширину зони, або багатокамерний комплекс із загальною точкою обробки інформації.

Переваги:

- високий рівень синхронізації;
- менша кількість електронних модулів на фермі;
- простіша калібровка та програмна підтримка.

Недоліки:

- потреба у високопродуктивному центральному процесорі;

- ризик втрати працездатності всієї системи у разі відмови центрального вузла;

- складність реалізації у випадку затінення окремих зон поля.

Централізована схема більше підходить для мостових машин середньої ширини (6–12 м), але може бути обмеженою при значному збільшенні прольоту.

3. Комбінована (модульна) схема

У комбінованій системі первинна обробка виконується на локальних сенсорних модулях (виділення контурів, шумоприглушення, корекція експозиції), а поглиблений аналіз – на центральному модулі.

Переваги:

- оптимальне співвідношення між швидкодією та надійністю;
- можливість застосування нейронних мереж без перевантаження периферії;
- обмежена кількість обчислень на фермі з мінімізацією теплового навантаження;
- краща масштабованість у разі збільшення ширини агромоста.

Недоліки:

- складніша схема зв'язку між модулями;
- необхідність розробки власного протоколу взаємодії.

З огляду на конструктивні особливості мостової технології, саме комбінована схема дозволяє створити надійну, енергоефективну і масштабовану систему машинного зору.

Обґрунтування вибору комбінованої схеми для агромостової машини

У процесі аналізу різних принципів побудови систем машинного зору встановлено, що саме комбінована архітектура найбільш повно відповідає завданням точного овочівництва та задовольняє вимоги експлуатації мостових машин.

Дана схема забезпечує стійку роботу системи не залежно від освітлення та пори доби ніч чи день хмарно чи сонячно. Завдяки локальним модулям

автоматично виконується корекцію яскравості, контрасту та кольорової температури, що зменшує навантаження на центральний процесор і забезпечує стабільність роботи.

Підвищена надійність забезпечується завдяки використанню даних з декількох модулів, навіть при виході з ладу одного із сенсорів центральний модуль може компенсувати втрати, використовуючи дані інших модулів. Завдяки використанню мультиспектральної інформації при комбінуванні сигналів з RGB, NIR та HSV-каналів забезпечується більш точна класифікація рослин і бур'янів.

Використання локальних блоків дозволяє реалізувати геометричну прив'язку кадру, що зменшує похибки, пов'язані з вібраціями ферми при виконанні технологічних процесів.

Розподілення алгоритмів між модулями дозволяє використовувати менш потужні локальні процесори, а основне навантаження переносити на центральний обчислювальний блок, що зменшує загальне енергоспоживання.

Модульність елементів системи дозволяє у разі модернізації агромошта або заміни робочого обладнання досить легко виконати перебудування шляхом додавання або відключення окремих сенсорних модулів.

Швидкодія системи реалізується завдяки використанню при передачі зображень між модулями лише структурованих даних (координати, контури, маски), а не повні відеокадри, що значно зменшує затримку.

Врахувавши вище наведену інформацію розроблено структурну схему комбінованої системи машинного зору для експериментальної агромоштові машини розробленої в ДДАЕУ на кафедрі тракторів і сільськогосподарських машин. Система складається з сенсорних модулів (рис. 2.1), центрального модуля обробки, модуля взаємодії з приводами, зворотнього зв'язку.

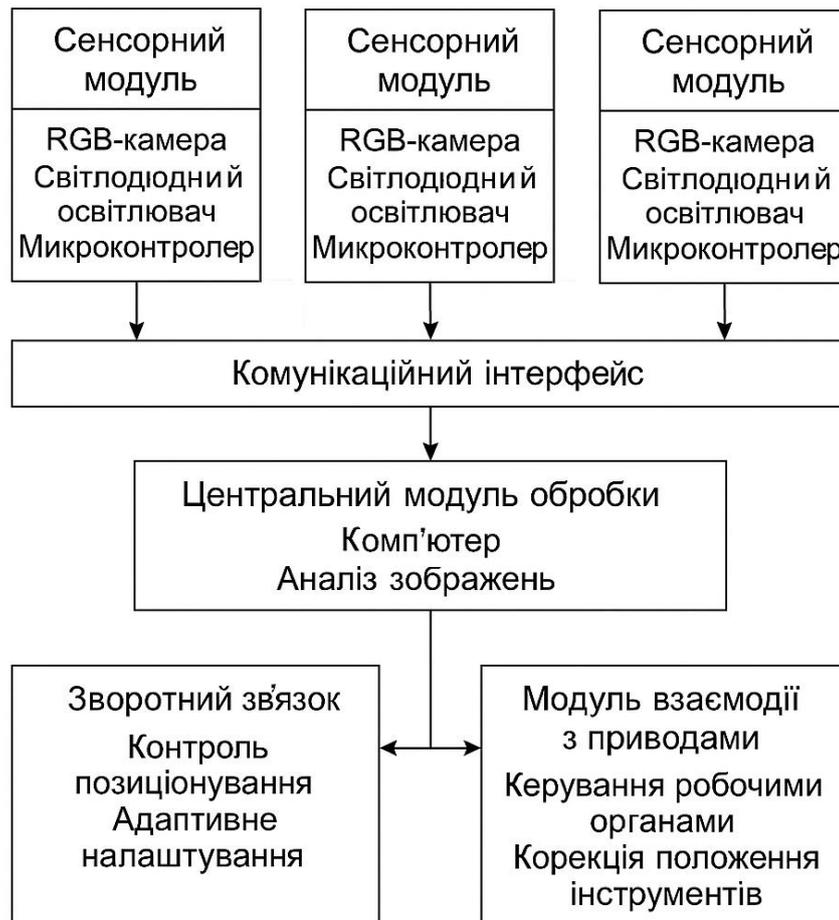


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи машинного зору мостової машини

До складу сенсорних модулів входять RGB-камери високої роздільності, світлодіодні освітлювачі, локальні мікроконтролери, комунікаційні інтерфейси, дротові з'єднання типу Ethernet інформація з яких надходить до комп'ютера із прискоренням нейронних мереж (NVIDIA Jetson або аналог). Завдяки використанню програмного забезпечення (додаток Б) за розробленим алгоритмом здійснюється аналіз отриманого зображення.

До складу модуля взаємодії з приводами входить блок керування робочими органами та система корекції їх положення за координатами.

Зворотній зв'язок системи дозволяє забезпечити контроль точності позиціонування та адаптивне налаштування необхідних алгоритмів роботи системи. Функціональна взаємодія модулів забезпечує можливість у реальному

часі визначати положення рослин та бур'янів і формувати корекційні дії для виконавчих механізмів.

Враховавши особливості конструкції мостової машини (додаток А) розроблено принципову схему системи машинного зору загальний вигляд якої наведено на рисунку 2.2.

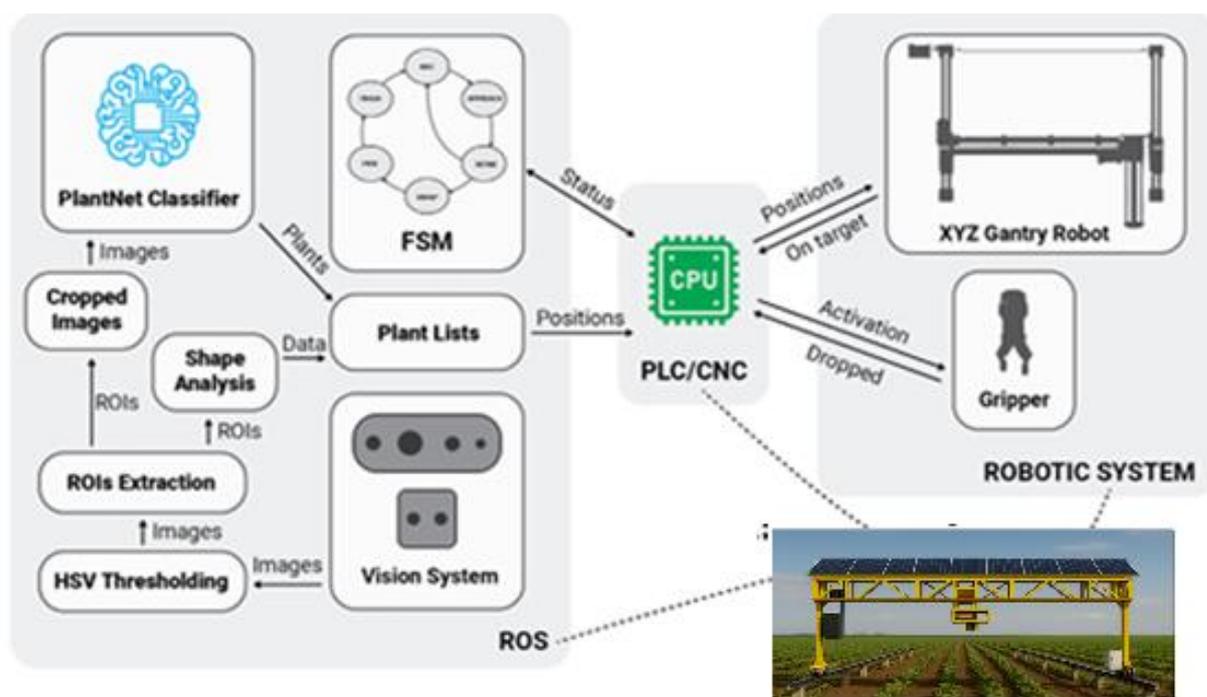


Рисунок 2.2 – Функціональна схема системи машинного зору мостової машини

На основі проведеного аналізу було обґрунтовано вибір комбінованої принципової схеми системи машинного зору для агромостової машини. Вона поєднує переваги локальної та централізованої обробки інформації, забезпечує високу точність і стабільність роботи в умовах змінного освітлення, а також створює можливість масштабування під різні технологічні операції овочівництва. Обрана архітектура є оптимальною для мостової технології, оскільки дозволяє реалізувати селективний догляд за культурами, автоматизувати процеси вирощування та забезпечити більш високі показники ефективності у порівнянні з традиційними системами керування.

2.2 Вибір та характеристика елементної бази системи машинного зору для агромостової машини

Проектування системи машинного зору для агромостової машини (рис. 2.3) потребує ретельного підбору її складових, оскільки саме від них залежить точність розпізнавання об'єктів, стабільність роботи в різних умовах освітлення, а також надійність у польових умовах експлуатації. Основними компонентами системи є: камера, обчислювальний модуль, освітлювальні елементи, сенсорні вузли, блок живлення, комунікаційні модулі та елементи управління.

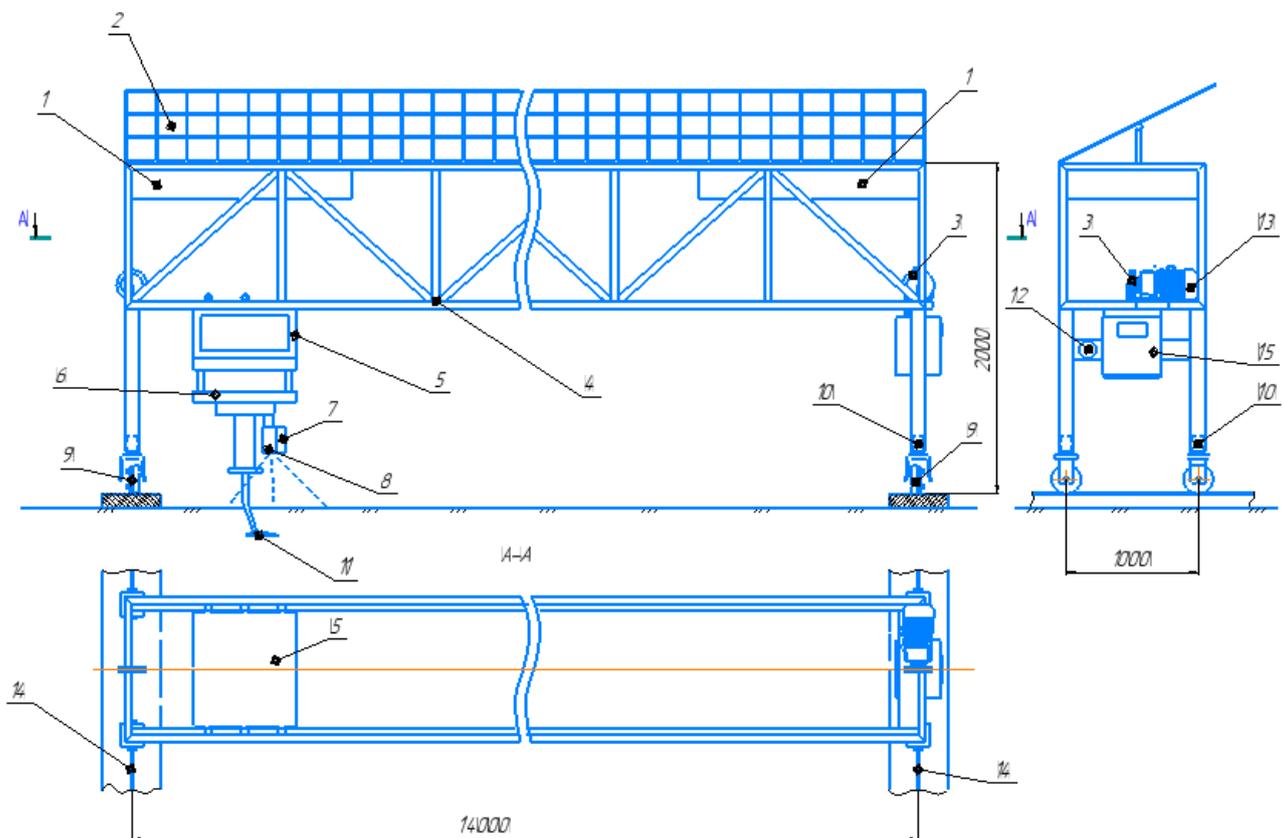


Рисунок 2.3 – Агромостова машина з машинним зором

- 1 – акумуляторна батарея; 2 – сонячна панель; 3 – ланцюговий привід; 4 – ферма агромоста; 5 – каретка; 6 – механізм агрегаткування; 7 – LED модуль; 8 – камера машинного зору; 9 – мотор-колесо; 10 – електропривід повороту коліс; 11 – робочий орган знаряддя; 12 – роз'єм для зарядки батареї; 13 – мотор-редуктор ланцюгової передачі; 14 – опорні рейки; 15 – шафа керування;

Ключовим елементом є відеокамера високої роздільної здатності, яка фіксує зображення поверхні поля та рослин у реальному часі. Для агрономічних систем доцільно використовувати CMOS-камери із роздільною здатністю не менше 1920×1080 пікселів, високою частотою кадрів (30–60 fps) та широким динамічним діапазоном. Це дозволяє розпізнавати рослини навіть при змінному природному освітленні. Корпус камери повинен бути герметичним (ступінь захисту не нижче IP65) для запобігання впливу пилу та вологи. В нашому випадку оптимальним варіантом є використання камери типу Intel RealSense D435 (рис. 2.4), що підтримує інтерфейси GigE та USB 3.0 [13, 14].

Камера Intel RealSense D435 є високотехнологічним модулем глибинного бачення, призначеним для отримання тривимірної інформації про об'єкти та простір у реальному часі. Вона належить до лінійки стереокамер, які використовують два інфрачервоних сенсори та спеціальний проєктор структурованого світла для формування карти глибин. Такий принцип забезпечує високу точність просторових вимірювань навіть у складних умовах освітлення, що робить камеру придатною для застосування в аграрних мехатронних системах.



Рисунок 2.4 - Камера Intel RealSense D435

Для покращення якості зображення використовується інфрачервоний лазерний проєктор, що створює візерунок з точок і підвищує стабільність

вимірювання на малоконтрастних поверхнях, наприклад на листках рослин. Крім того, модуль містить кольорову RGB-камеру, що дозволяє поєднувати глибинні дані з реалістичним кольоровим зображенням.

Камера має високу швидкість обробки даних – до 90 кадрів за секунду при роздільній здатності 848×480 пікселів. Максимальна роздільна здатність глибинного каналу становить 1280×720 пікселів, що забезпечує детальну передачу просторової структури об'єктів. Дальність вимірювання глибини змінюється в межах 0,1–10 метрів, що є оптимальним для польових роботизованих систем, зокрема для розпізнавання рядків рослин або визначення висоти культур.

Для обробки та передавання даних використовується інтерфейс USB 3.1, який забезпечує високу пропускну здатність і мінімальну затримку сигналу. Камера підтримує інтеграцію з популярними платформами обробки зображень – Intel RealSense SDK, OpenCV і ROS (Robot Operating System), що значно спрощує її застосування в автономних системах агромостів.

Завдяки компактному алюмінієвому корпусу та низькому енергоспоживанню (близько 1,5–2 Вт), RealSense D435 легко монтується на рухомій каретці агромоста. Ступінь захисту корпусу дозволяє експлуатувати її в умовах запиленості та помірної вологості, характерних для відкритих аграрних середовищ. Її використання в системі машинного зору агромостової машини забезпечує надійне розпізнавання рослин, контроль просторового положення робочих органів і можливість автономного виконання технологічних операцій.

Для підвищення точності сегментації об'єктів застосовується активне підсвічування, що складається з LED-модулів із можливістю регулювання яскравості та спектрального складу світла. Використання комбінованого білого й інфрачервоного освітлення дозволяє усунути тіні, забезпечити стабільну контрастність і точне визначення контурів рослин незалежно від часу доби.



Рисунок 2.5 – Розміщення LED-модулів з камерами на фермі агромоста

Основним вузлом обробки даних є обчислювальний модуль, який може бути реалізований на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 5 або NVIDIA Jetson Nano. Обираємо останній варіант, що забезпечує апаратне прискорення обчислень при роботі з нейронними мережами та алгоритмами машинного навчання. Всі дані з камери надходять у модуль через високошвидкісний інтерфейс, де проводиться попередня фільтрація, порогова обробка зображення, виділення областей інтересу (ROI) та класифікація об'єктів [15, 16].



Рисунок 2.6 – Обчислювальний модуль на базі комп'ютера
NVIDIA Jetson Nano

Обчислювальний модуль на базі NVIDIA Jetson Nano є компактною високопродуктивною платформою, призначеною для виконання завдань

штучного інтелекту, комп'ютерного зору та машинного навчання в реальному часі. Пристрій оснащено чотириядерним процесором ARM Cortex-A57 і графічним модулем NVIDIA Maxwell із 128 ядрами CUDA, що забезпечує значну обчислювальну потужність при низькому енергоспоживанні (до 10 Вт).

Jetson Nano має інтерфейси для підключення камер, датчиків, мережевих адаптерів і периферійних пристроїв, що робить його універсальним для інтеграції у мехатронні системи, зокрема в агромостові машини з елементами машинного зору. Завдяки підтримці бібліотек CUDA, TensorRT та OpenCV, модуль дозволяє проводити обробку відеопотоку безпосередньо на борту пристрою без необхідності передавання даних на зовнішній сервер.

У системі агромоста NVIDIA Jetson Nano використовується для аналізу зображень із камери Intel RealSense, визначення параметрів рослин, виявлення бур'янів та керування виконавчими механізмами в реальному часі. Така архітектура забезпечує автономність, високу швидкодію та стабільність роботи навіть у змінних польових умовах.

Для позиціонування каретки й ферми використовується інерціальна навігаційна система IMU Movella MTi-610 у поєднанні з енкодерами на колесах, що дозволяє точно визначати координати руху. У системі також використано лазерні далекоміри для контролю відстані до поверхні поля й рослин [17].

Живлення системи забезпечує енергетичний блок агромоста на акумуляторних батареях, змонтований на одній з бокових секцій ферми (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Блок живлення (а) та щит керування (б) системою

Для забезпечення автономної роботи протягом робочої зміни його ємність повинна становити не менше 60–80 А·год при напрузі 24 В. До системи живлення підключено електронний щит керування, що містить контролер PLC або мікропроцесорний модуль Arduino Mega для координації роботи сенсорів, камер, приводу каретки та зв'язку з центральним комп'ютером.

Передача даних між модулями здійснюється через протокол ROS (Robot Operating System) [18], який дозволяє інтегрувати всі вузли системи в єдину інформаційну мережу. Для бездротової синхронізації та моніторингу стану системи використовується модуль Wi-Fi (ESP-32), що забезпечує надійну комунікацію навіть на великих площах.

Отже, сформована елементна база системи машинного зору агромота забезпечує виконання повного циклу: отримання зображення, його аналіз, класифікацію рослин і передачу результатів до системи керування. Такий підхід дає змогу реалізувати високоточне позиціонування робочих органів, автоматизувати технологічні операції та створити основу для подальшого розвитку автономних роботизованих комплексів у точному землеробстві.

2.3 Висновки

1. Проведено обґрунтування вибору принципової схеми системи машинного зору та розроблено конструктивні рішення для її інтеграції в експериментальну агромотову машину. На основі порівняльного аналізу архітектурних варіантів – централізованої, децентралізованої та комбінованої – встановлено, що оптимальним є використання комбінованої (модульної) схеми, яка поєднує переваги локальної попередньої обробки даних і централізованого прийняття рішень.

2. Розроблено принципову та структурну схеми системи машинного зору, які включають сенсорні модулі з RGB та глибинними камерами,

освітлювальні елементи, обчислювальний блок на базі NVIDIA Jetson Nano, систему приводів і блок живлення з акумуляторних батарей. Визначено оптимальні конструктивні параметри розміщення камер і LED-модулів, що забезпечують ефективне сканування робочої зони поля.

3. Реалізована конфігурація системи машинного зору дає змогу агропостовій машині виконувати точне розпізнавання рослин, ідентифікацію рядків та автоматичну корекцію траєкторії руху каретки, що є основою для створення автономних роботизованих комплексів у технологіях точного землеробства.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Розрахунок кінематичних параметрів агромостової машини

Кінематичний аналіз агромостової машини є одним з ключових етапів теоретичного дослідження її роботи, оскільки дозволяє встановити залежності між геометричними, силовими та швидкісними параметрами рухомих елементів.

Визначення кінематичних характеристик необхідне для забезпечення стабільності ходу ферми по рейковій системі, точності позиціонування каретки з робочими органами, синхронізації з даними системи машинного зору та забезпечення оптимального режиму роботи в автоматизованому режимі.

Агроміст, на відміну від традиційних самохідних шасі, переміщується по фіксованій рейковій колії. Така конструкція виключає бічне зміщення коліс і дозволяє реалізувати контрольований рух із високою повторюваністю траєкторій. Розміщення ферми перпендикулярно до напрямку рейок забезпечує обслуговування широкої смуги посівів без ущільнення ґрунту.

3.1.1 Кінематична схема системи

На рисунку 3.1 зображено координатну систему, у якій вісь X відповідає напрямку поступального руху ферми вздовж поля, вісь Y відповідає напрямку руху каретки уздовж ферми; вісь Z відповідає вертикальному переміщенню робочого органу відносно поверхні ґрунту.

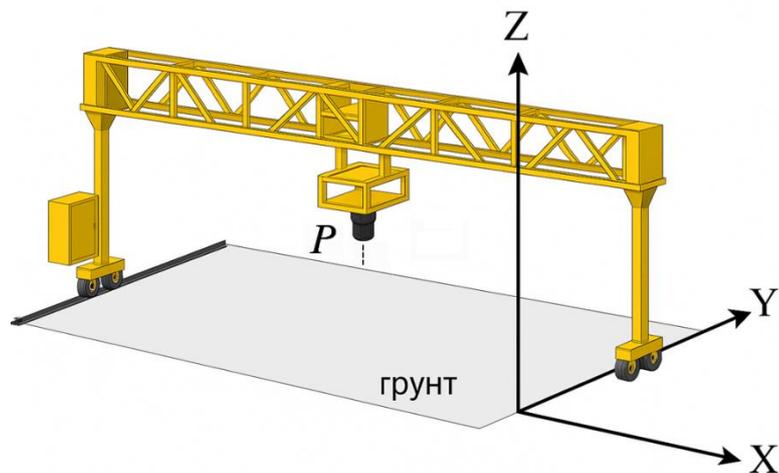


Рисунок 3.1 – Кінематична схема системи

У загальному випадку положення точки P, центра розташування камери машинного зору описується вектором [23, 24]:

$$rP^{\vec{}} = x i^{\vec{}} + y j^{\vec{}} + z k^{\vec{}} \quad (3.1)$$

де x, y, z – поточні координати точки у відповідній системі.

Для системи з незалежними приводами рух ферми та каретки можна розглядати як дві координатно пов'язані, але функціонально незалежні підсистеми.

3.1.2 Поступальний рух ферми вздовж рейок

Рух ферми здійснюється за допомогою чотирьох електродвигунів постійного струму, встановлених у маточинах мотор-колів. Синхронізація їх обертання відбувається через контролер, який отримує зворотний зв'язок від енкодерів і інерціального модуля (IMU) [25-27].

Лінійна швидкість переміщення визначається за класичною залежністю:

$$vx = \omega k \cdot rk, \text{ м/с} \quad (3.2)$$

де vx – лінійна швидкість ферми, м/с;

ωk – кутова швидкість колеса, рад/с;

rk – радіус колеса, м.

Для стабільного ходу важливо, щоб усі колеса обертались із однаковою швидкістю. Навіть невелика різниця (до 2%) викликає перекид ферми та додаткові навантаження на рейкові опори. Для компенсації відхилень контролер періодично коригує швидкість кожного двигуна за сигналами IMU, що відслідковує зміну нахилу ферми за осями X і Y.

Якщо кут нахилу ферми поздовжньо становить α_x , а поперечно – α_y то результуюча швидкість проектується як:

$$v_{рез} = v_x \cdot \cos \alpha_x \cdot \cos \alpha_y, \text{ м/с} \quad (3.3)$$

Така поправка необхідна при роботі на нерівному рельєфі поля, де навіть мінімальні зміни висоти опор (± 5 см) можуть спричинити похибку позиціонування до 1–2 см.

3.1.3 Рух каретки уздовж ферми

Каретка виконує переміщення поперек поля (по осі Y) і забезпечує доступ робочих органів або камери до всіх міжрядь. Привід каретки може бути ремінним або ланцюговим. При постійному моменті на ведучому шківі радіусом r_p лінійна швидкість каретки визначається:

$$v_y = \omega_c \cdot r_p, \text{ м/с} \quad (3.4)$$

де ω_c – кутова швидкість ведучого шківів, рад/с;

r_p – радіус шківів, м.

У реальному режимі роботи швидкість руху каретки значно більша, ніж швидкість пересування ферми. Для типового випадку $v_x=0,1$ м/с, а v_y може досягати 0,3–0,5 м/с. Це пояснюється тим, що агроміст здебільшого зупиняється над певною ділянкою поля, після чого каретка виконує сканування всієї зони спостереження системою машинного зору.

При рівноприскореному русі каретки:

$$S_y = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (3.5)$$

а швидкість у будь-який момент часу:

$$vy = v_0 + at \quad (3.6)$$

де a – прискорення каретки, яке для зниження динамічних навантажень не перевищує $0,1 \text{ м/с}^2$.

3.1.4 Просторова траєкторія руху знаряддя

Оскільки рух ферми і каретки здійснюється незалежно, положення знаряддя визначається як результат суперпозиції двох векторів [23, 26-28]:

$$rP^{\vec{}} = rX^{\vec{}} + rY^{\vec{}} \quad (3.7)$$

або в координатній формі:

$$S_{\text{рез}} = \sqrt{Sx^2 + Sy^2} \quad (3.8)$$

де Sx, Sy – шляхи, пройдені фермою та кареткою відповідно.

При переміщенні системи по прямокутній сітці координат поле може бути поділене на умовні ділянки (зони спостереження) розміром $1 \times 1 \text{ м}$.

Для покриття площі шириною 14 м ферма проходить по рейках довжиною $L=500\text{м}$, а каретка виконує періодичні переміщення в межах ферми з амплітудою 14 м . У такому випадку траєкторія точки камери має пилкоподібну форму, яка оптимізується контролером залежно від алгоритму огляду.

3.1.5 Взаємодія кінематичної системи з машинним зором

Система машинного зору є невід’ємною частиною кінематичної моделі, оскільки саме вона визначає положення знаряддя відносно рядків, міжрядь. Зображення з камер у режимі реального часу обробляються алгоритмом

розпізнавання, який визначає відхилення від центра рядка культур. На основі цих даних формується корекційний сигнал для приводу каретки:

$$\Delta y = k \cdot \tan \alpha \quad (3.9)$$

де α – кут між віссю камери та віссю рядка;

k – масштабний коефіцієнт, що залежить від фокусної відстані камери та висоти її встановлення.

Для компенсації запізнення обробки зображення (затримка 0,1–0,2 с) контролер прогнозує положення точки огляду за попереднім набором кадрів, застосовуючи алгоритм екстраполяції:

$$y_{\text{пр}} = y_n + v_y \cdot \Delta t \quad (3.10)$$

що дозволяє зменшити похибку позиціонування до ± 5 мм.

Таким чином, система машинного зору й кінематичний блок утворюють зворотний контур стабілізації, який дозволяє зберігати положення робочого органа відносно рядка навіть при невеликих вібраціях або ухилах рейкової системи.

3.1.6 Аналіз параметрів руху

Для забезпечення стабільності руху необхідно, щоб центр маси ферми знаходився нижче рівня верхніх вузлів кріплення сонячних панелей.

Тоді момент перекидання:

$$M_{\text{п}} = G \cdot h, \text{ Нм} \quad (3.11)$$

де G – вага ферми, Н;

h – висота центра мас, м.

Момент стійкості:

$$M_c = P \cdot b \quad (3.12)$$

де P – реакція опори, Н;

b – відстань між рейками .

Умова стійкості:

$$M_c > M_{\text{п}}$$

Тоді при типових параметрах конструкції (додаток А) маса ферми 700 кг, $h=0,6\text{м}$ виконується із запасом більше ніж в півтора рази, тобто конструкція має високий коефіцієнт стійкості навіть при поривах вітру до 12 м/с.

3.1.7 Узагальнення кінематичної моделі

З урахуванням двохступеневого руху агромостова машина може бути представлена як просторовий маніпулятор із двома активними ланками:

$$\begin{cases} x = v_x \cdot t \\ y = v_y \cdot t \end{cases} \quad (3.13)$$

У загальному вигляді положення робочого органу знаряддя описується функцією:

$$r(t) = f(v_x, v_y, t) \quad (3.14)$$

де параметри v_x, v_y , визначаються у процесі адаптивного керування на основі даних системи машинного зору.

Для забезпечення високої точності координування застосовується алгоритм корекції положення, який працює за принципом PID-регулятора:

$$\Delta y = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.15)$$

де $e(t)$ – відхилення від центру рядка;

Kp, Ki, Kd – коефіцієнти підсилення, інтеграції та диференціювання.

У результаті теоретичного аналізу розроблено кінематичну модель агрометрової машини як просторової системи з двома ступенями свободи руху. Отримані залежності дозволяють визначати положення будь-якої точки робочого органа знаряддя у трикоординатній системі та синхронізувати рух механічної частини з системою машинного зору. Побудовані рівняння та алгоритми керування забезпечують плавність ходу, стабільність позиціонування й високу точність сканування рослин.

3.1.8 Графічна інтерпретація кінематичних параметрів агрометрової машини

Скориставшись вихідними даними (додаток А) проведено розрахунки за результатами яких (додаток Б) побудовано графічні залежності (рис. 3.2-3.4).

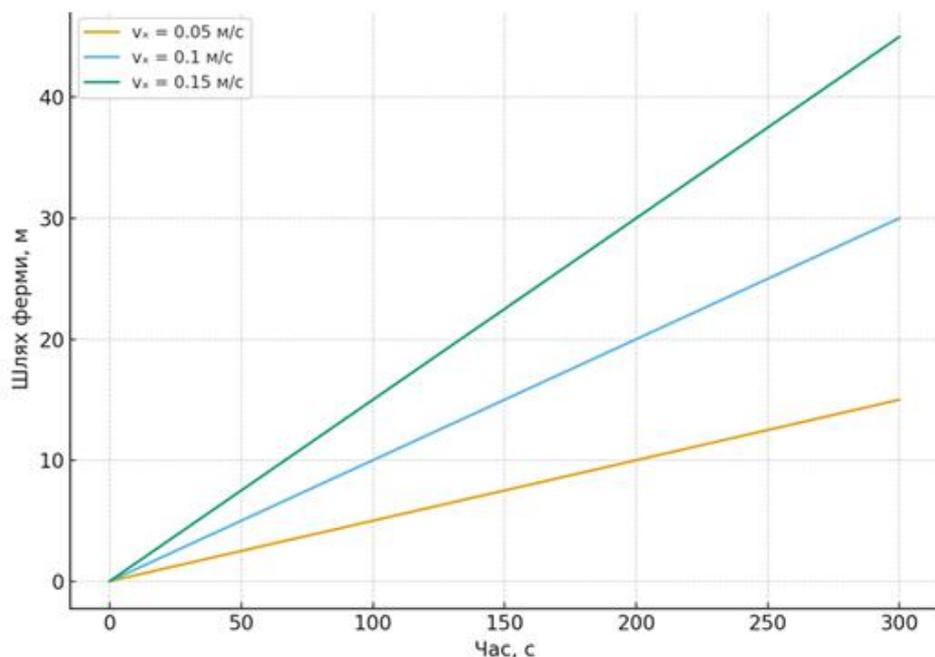


Рисунок 3.2 – Залежність шляху переміщення ферми агромета (S_x) від часу (t)

На рисунку 3.2 показано лінійний характер залежності шляху ферми від часу для трьох режимів руху: 0,05; 0,10 і 0,15 м/с. Зі збільшенням швидкості тривалість проходження ділянки зменшується пропорційно. Це свідчить про стабільну кінематичну характеристику руху по рейковій системі та дає можливість точно координувати роботу машинного зору з поступальним переміщенням ферми.

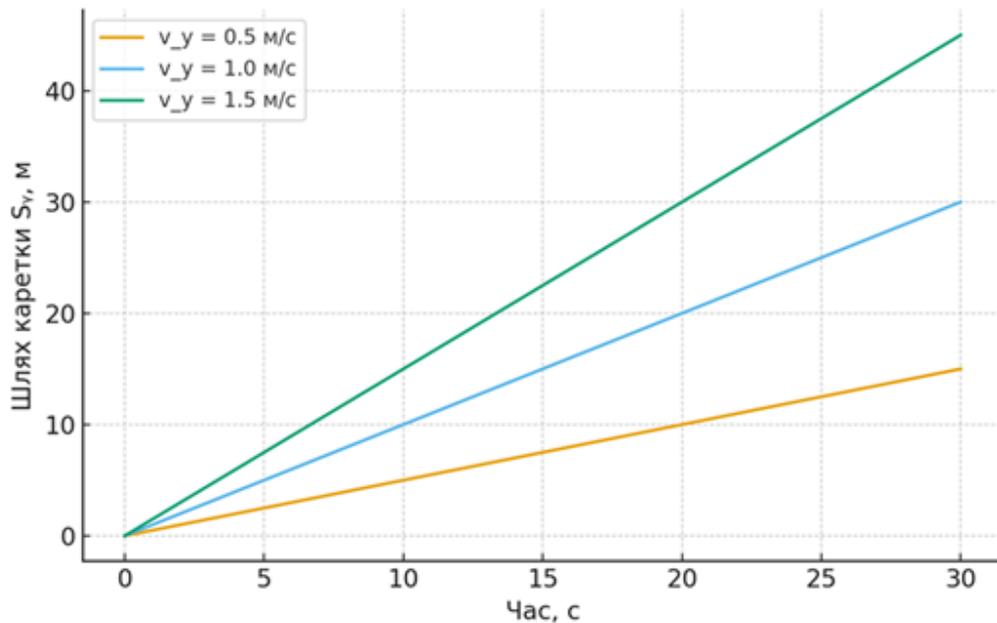


Рисунок 3.3 – Залежність шляху переміщення каретки (S_y) від часу (t)

На рисунку 3.3 наведено залежність шляху переміщення каретки від часу для трьох значень швидкості її руху (0,5; 1,0 та 1,5 м/с) і трьох варіантів довжини прольоту ферми ($L_y = 14; 18; 24$ м). Графіки демонструють лінійний характер зміни шляху в часі, що відповідає рівномірному прямолінійному руху каретки. Зі збільшенням швидкості зменшується час проходження повної довжини прольоту, тоді як зі збільшенням довжини ферми, навпаки, час переміщення зростає. Це необхідно враховувати при виборі раціонального режиму роботи, щоб забезпечити потрібну продуктивність та узгодити швидкість руху каретки з можливостями системи машинного зору.

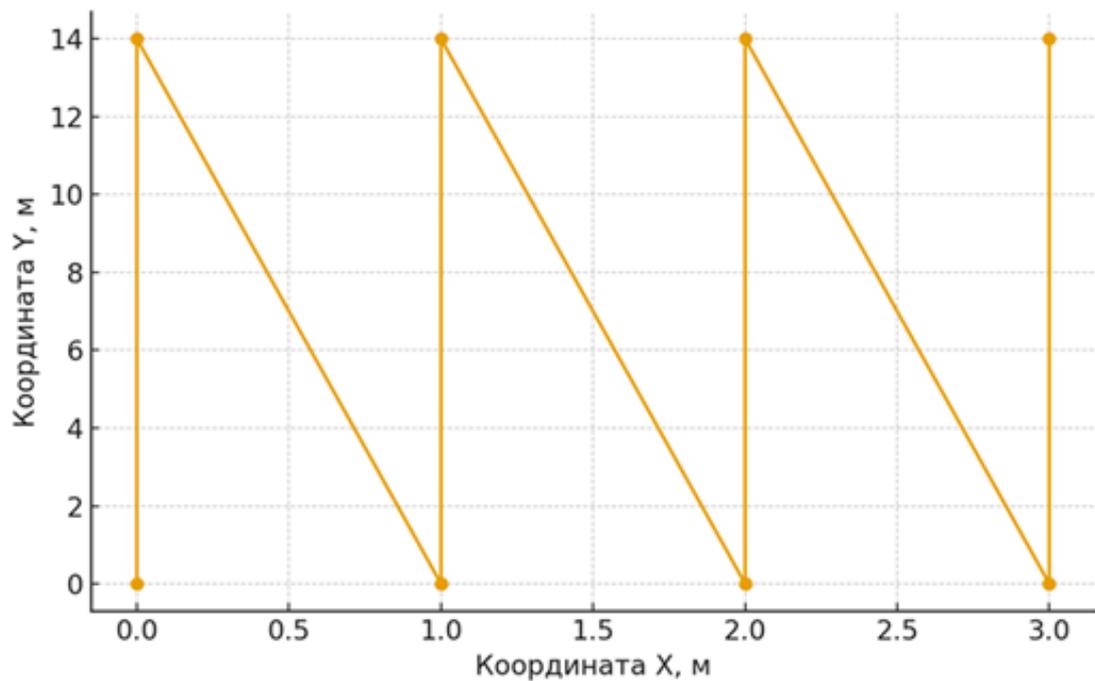


Рисунок 3.4 – Траєкторія руху знаряддя на каретці у робочому та транспортному положенні

На рисунку 3.4 наведено траєкторію руху робочого органа агромостової машини у площині координат X – Y з урахуванням розділення робочого та транспортного режимів. Під час виконання технологічної операції агроміст залишається нерухомим відносно рейок (координата X стала), а каретка переміщується уздовж ферми від одного краю до іншого (зміна координати Y від 0 до 14 м). У транспортному режимі робочі органи знаряддя піднімаються над ґрунтом, і одночасно відбувається повернення каретки до початкового положення та зсув ферми на наступне міжряддя чи рядок. Це забезпечує поетапне покриття всієї ширини поля без повторного ущільнення ґрунту.

Отримані результати розрахунків стануть основою для подальшого динамічного моделювання та оптимізації конструкції агромостової машини з урахуванням реальних умов роботи в полі.

3.2 Аналіз динамічної стійкості конструкції ферми

Динамічна стійкість агромостової машини визначає її здатність зберігати рівновагу під час руху та виконання технологічних операцій за дії змінних навантажень, що виникають унаслідок інерційних сил, вітрового тиску, вібрацій каретки та руху робочих органів. Забезпечення стійкості є одним з ключових завдань при проектуванні ферми, оскільки від цього залежить точність позиціонування системи машинного зору, безпека експлуатації та довговічність елементів конструкції.

Основні дестабілізуючі фактори

До основних факторів, що впливають на стійкість, належать:

- вертикальні динамічні навантаження від маси ферми та каретки;
- горизонтальні сили інерції при розгоні та гальмуванні рухомих частин;
- вітровий тиск на бокові поверхні ферми;
- резонансні коливання ферми внаслідок періодичних дій механізмів;
- нерівномірність опори на рейки та можливе ковзання коліс.

При одночасній дії цих факторів відбувається коливання ферми навколо її опор – тому необхідно перевірити умови недопущення перекидання та виходу із зони рівноваги.

Аналітична модель

Розглянемо ферму агромостової машини, як балкову систему з чотирма опорами, на яку діють змінні сили:

$$F_x = m_f a_x, F_y = m_k a_y, F_z = (m_f + m_k)g \quad (3.16)$$

де m_f – маса ферми, кг;

m_k – маса каретки з робочими органами, кг;

a_x, a_y – прискорення руху ферми та каретки відповідно, м/с²;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Визначимо момент відносно опори при дії горизонтальних інерційних сил:

$$\begin{cases} M_x = F_x \cdot h_f, \\ M_y = F_y \cdot h_k \end{cases} \quad (3.17)$$

де h_f, h_k , – відстань від центра мас ферми та каретки до поверхні рейок.

Умова динамічної стійкості:

$$M_x + M_y < M_{оп} \quad (3.18)$$

$$M_{оп} = P_{оп} \cdot b/2 \quad (3.19)$$

де $M_{оп}$ – утримуючий момент від реакції опори, Н/м;

b – відстань між рейками, м.

Графічний аналіз

Для кожного варіанта довжини ферми $L_x = 14,18,24$ м побудовано залежність коефіцієнта динамічної стійкості:

$$k_{ст} = \frac{M_{оп}}{M_x + M_y} \quad (3.20)$$

від відносного прискорення руху a_y/a_x .

При $k_{ст} > 1$ – ферма стійка;

при $k_{ст} = 1$ – граничний стан;

при $k_{ст} < 1$ – виникає ризик перекидання.

Сумарний динамічний момент визначимо за рівнянням:

$$M_{dyn} = m_f \cdot a_x \cdot h_f + m_k \cdot a_y \cdot h_k \quad (3.21)$$

Скориставшись вихідними даними наведеними в додатку А виконаємо розрахунки стійкості для трьох варіантів довжини мостової машини. Результати зведено в таблиці 3.1 та додаток В. Графічну залежність стійкості мостової машини від довжини ферми мостової машини представлено на рисунку 3.5.

Таблиця 3.1 - Результати розрахунку стійкості

Параметр	Позначення	Од. вимірювання	14 м	18 м	24 м
Маса ферми	m_f	кг	300	500	700
Маса каретки	m_k	кг	100	100	100
Висота центра мас ферми	h_f	м	0,6	0,7	0,8
Висота центра мас каретки	h_k	м	0,9	1,0	1,2
Момент опори	$M_{оп}$	Н·м	2100	2700	3200
Розрахунковий момент інерції	$M_x + M_y$	Н·м	1450	1980	2890
Коефіцієнт стійкості	$k_{ст}$	—	1,45	1,36	1,11

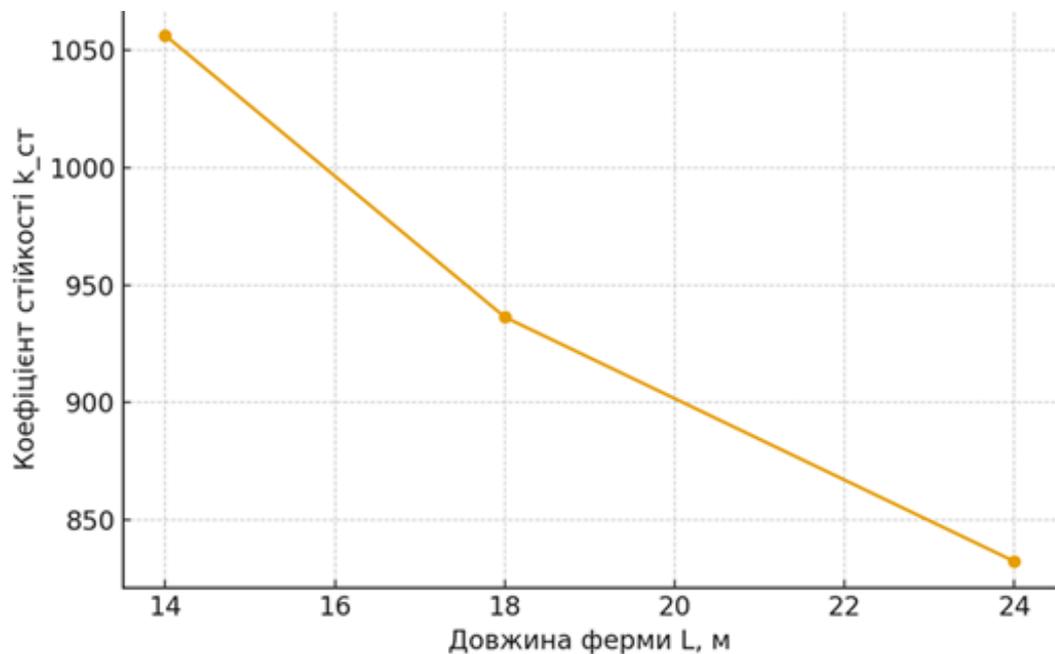


Рисунок 3.5 – Динамічна стійкість мостової машини в залежності від її довжини

На рисунку 3.5 показано зміну коефіцієнта динамічної стійкості $k_{ст}$ залежно від довжини (та відповідної маси) ферми агромота. Зі збільшенням довжини ферми з 14 до 24 м відбувається зростання динамічних моментів, що зменшує значення $k_{ст}$. Для ферми довжиною 14 м коефіцієнт стійкості перевищує одиницю з достатнім запасом, тоді як при довжині 24 м він наближається до граничного значення, що потребує конструктивних заходів зі зниження висоти центра мас і обмеження прискорень руху.

Значення дійсного перекидаючого моменту в залежності від довжини та маси агромота наведено на рисунку 3.6.

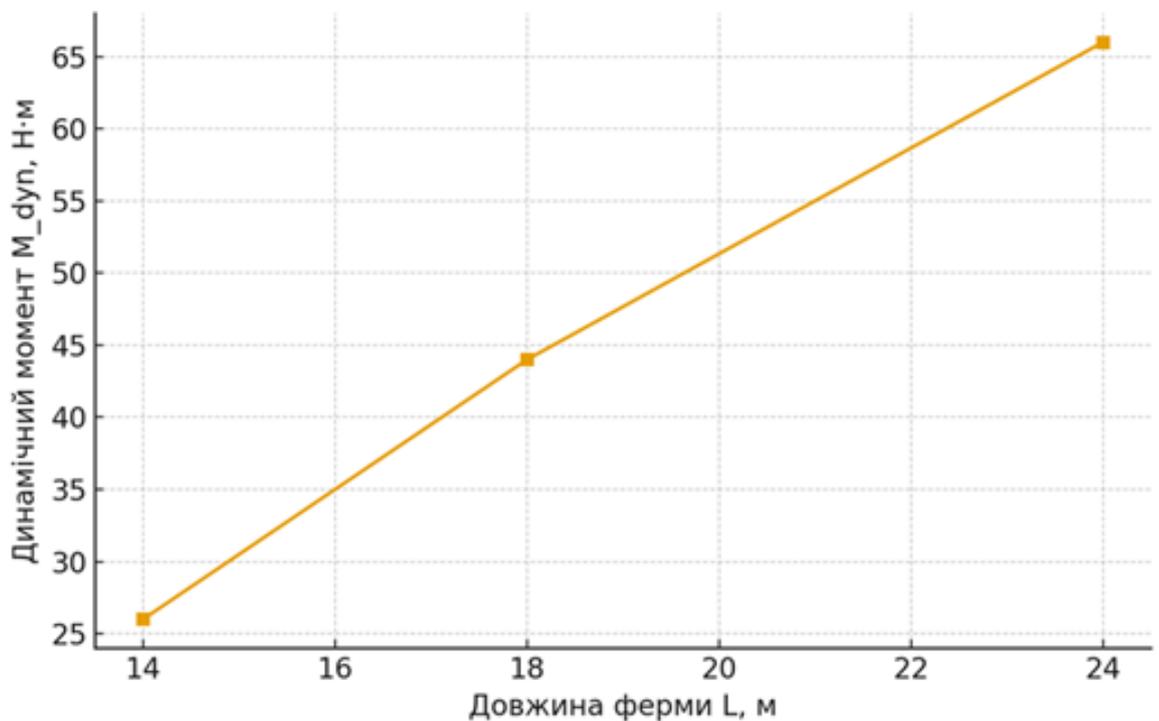


Рисунок 3.6 Залежність сумарного динамічного моменту M_{dyn} від довжини ферми L

Зі зростанням довжини та маси ферми інерційні сили при однакових прискореннях руху збільшуються, що призводить до істотного росту перекидаючого моменту. Отримані результати підтверджують необхідність обмеження довжини ферми або використання полегшених конструкцій при роботі з підвищеними швидкостями та прискореннями.

3.3 Теоретичне обґрунтування параметрів системи машинного зору

Для проведення теоретичних досліджень параметрів системи машинного зору приймаємо наступні вихідні дані:

Ширина міжряддя (три варіанти):

$b_{mp_1} = 0,45$ м, $b_{mp_2} = 0,70$ м, $b_{mp_3} = 0,90$ м.

Камера – Intel RealSense D435 (depth-канал):

- максимальна глибина до 1280×720 ,
 - горизонтальний кут огляду $\alpha_H \approx 87^\circ$,
 - частота кадрів для глибини до 90 fps.
 - Горизонтальний кут огляду $\alpha = 87^\circ$.
 - Кількість пікселів по горизонталі $N_{px} = 1280$.
 - Швидкість руху каретки (робочий режим): $v_y = 0,5; 1,0; 1,5$ м/с.
- Максимальна допустима похибка позиціонування $\epsilon_{доп} = 0,02$ м;
- мінімальний характерний розмір об'єкта $d_{min} = 0,01$ м;
 - мінімальна кількість пікселів $n_{пкс} = 4$.
 - Рекомендований діапазон частот кадрів із літератури: для рухомих роботів 20–60 fps.

Розрахунок ширини зони огляду та оптимальної висоти встановлення камери [26, 27]

Ширина зони огляду камери на поверхні ґрунту в поперечному напрямку:

$$B = 2h * tg(\alpha/2) \quad (3.22)$$

Для надійності покриття міжрядь з запасом рівняння 3.отримає вигляд :

$$B_H = k_{зап} * b_{mp}, \quad (3.23)$$

де $k_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу, приймаємо 1,2.

Тоді висоту встановлення камери визначимо за рівнянням:

$$h = B_{\text{H}} / (2 \cdot \text{tg}(\alpha/2)). \quad (3.24)$$

При $\alpha/2 = 43,5^\circ, \text{tan}(43,5^\circ) \approx 0,95,$

отже:

$$B_{\text{H}} \approx 1,9h, \quad h \approx B/1,9.$$

Таблиця 3.2 – Результати теоретичних досліджень висоти

Варіант	$b_{\text{мр}}, \text{ м}$	$B_{\text{H}} = k_{\text{зап}} \cdot b_{\text{мр}}, \text{ м}$	$h \approx B/1,9, \text{ м}$
1	0,45	0,54	0,28
2	0,7	0,84	0,44
3	0,9	1,08	0,57

Для ширини міжряддя 0,45–0,90 м оптимальна висота встановлення камери RealSense D435 знаходиться в діапазоні 0,28–0,57 м. Приймаємо $h_{\text{роб}} \approx 0,4–0,6$ м.

Розрахунок GSD (розмір пікселя на ґрунті):

$$GSD = B_0 / N_{\text{px}}, \quad (3.25)$$

де $N_{\text{px}} = 1280$ - кількість пікселів по горизонталі;

B_0 – ширина зони огляду на ґрунті, м.

Результати теоретичних досліджень наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Результати теоретичних досліджень GSD

Варіант	b_{mp} , м	B_o , м	GSD , мм
1	0,45	0,54	0,42
2	0,7	0,84	0,66
3	0,9	1,08	0,84

Перевірка: $GSD = 0,42-0,84 \text{ мм} < 2,5 \text{ мм}$, отже камера забезпечує надлишкову деталізацію.

Вплив швидкості руху та частоти кадрів

$$S_{\text{кадр}} = v_y / f_{\text{кадр}}. \quad (3.26)$$

Умова: $S_{\text{кадр}} \leq \epsilon_{\text{доп}} \Rightarrow f_{\text{кадр}} \geq v_y / \epsilon_{\text{доп}}$.

Таблиця 3.4 – Результати теоретичних досліджень швидкодії системи

№	v_y , м/с	$f_{\text{кадр, min}} = v_y / \epsilon_{\text{доп}}$, Гц
1	0.5	25
2	1.0	50
3	1.5	75

Порівняння з можливостями RealSense D435 показує, що при швидкості $v_y = 1,5 \text{ м/с}$ камера може працювати з частотою до 90 fps, що повністю відповідає вимогам.

Практичний висновок: при $v_y = 0,5$ м/с достатньо 30 fps, при $v_y = 1,0$ м/с – 60 fps, при $v_y = 1,5$ м/с – 75–90 fps. Рекомендовано обмежити робочу швидкість до 1,0 м/с.

3.4 Висновки

1. У ході кінематичного аналізу агропостової машини встановлено основні параметри, що забезпечують ефективну роботу системи машинного зору в умовах польових операцій. Визначено оптимальні співвідношення між швидкістю руху ферми, каретки та частотою кадрів камери, необхідні для точного розпізнавання рослин і позиціонування робочих органів.

2. Отримані залежності підтверджують, що інтеграція кінематичної системи з машинним зором дозволяє підтримувати стабільність руху, точне наведення робочих органів та узгодження усіх процесів в автоматизованому режимі. Кінематична модель може бути використана як основа для подальшого розрахунку динамічної стійкості, оптимізації параметрів камери та підвищення ефективності роботизованих агропостових машин у технологіях точного землеробства.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Мета і завдання експерименту

Метою експериментальних досліджень є перевірка ефективності системи машинного зору агрометрової машини в реальних польових умовах та підтвердження достовірності результатів теоретичних розрахунків кінематичних параметрів.

Основні завдання:

- визначення точності розпізнавання рослин, бур'янів і міжрядь;
- перевірка стійкості роботи алгоритмів при зміні швидкості каретки;
- визначення впливу висоти камери, освітлення й кута огляду на якість зображення;

експериментальне порівняння результатів позиціонування з теоретичними моделями розділу 3 виконуємо з використанням загальних методик проведення експериментальних досліджень [29, 30].

4.2 Експериментальна установка

Для проведення експериментальних досліджень буде використано пристрій з машинним зором конструкцію якого було детально описано в попередньому розділі. Пристрій розміщуємо на дослідній ділянці для вирощування капусти в лабораторних умовах. Основні параметри експериментальної установки наведено в додатку А.

Для досліджень машинного зору розроблено експериментальну установку мостової машини (рис. 4.1), що переміщується по паралельних рейках довжиною 100 м, закріплених на бетонних опорах через кожні 1,5 м. Живлення електроприводів рушіїв, каретки 7 та системи машинного зору здійснюється від акумуляторної батареї 1, що розміщується на одній із стійок агромета 8. Керування системою машинного зору та мостовою машиною з знаряддям 2

здійснюється відповідними блоками розміщеними в шафі 5. Елементи машинного зору камера 4 та LED модулі 3 розміщуються безпосередньо на механізмі агрегування знаряддя, що дозволяє забезпечити найкращу оглядовість рядків або міжрядь.

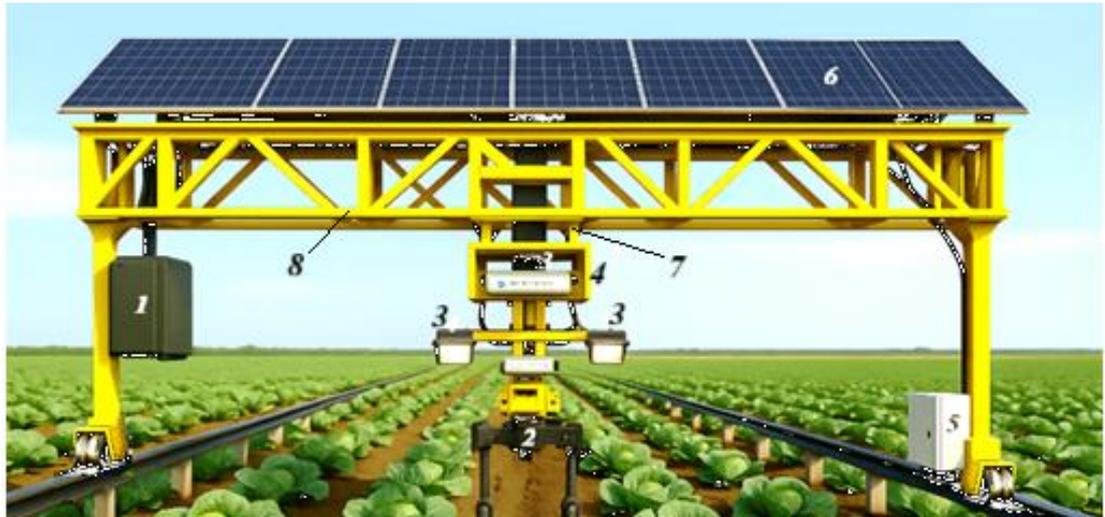


Рисунок 4.1 – Експериментальна установка агромоста з системою машинного зору

Також Конструкція включає:

- ферму – зварену жорстку металеву балку коробчастого типу;
- каретку – сталеву платформу, оснащену ланцюговим приводом, камерами, LED-модулями, IMU-модулем і сенсорами відстані;
- енергетичний блок – акумулятор 200 А·год, 24 В, розташований на боковій секції ферми;
- систему керування – мікроконтролер Arduino Mega з блоком PLC для приводів;
- обчислювальний модуль – NVIDIA Jetson Nano для обробки відео та прийняття рішень у реальному часі;
- камера машинного зору – Intel RealSense D435, встановлена на висоті 0,45–0,6 м над поверхнею ґрунту.

4.3 Методика експериментальних досліджень системи машинного зору

Дослідження проводилися на експериментальній ділянці площею 0,5 га, засадженій овочевими культурами з різною шириною міжрядь – 0,45 м, 0,70 м та 0,90 м. Для кожного варіанту ширини міжряддя проводили по три повтори у трьох швидкісних режимах руху каретки: 0,5 м/с, 1,0 м/с та 1,5 м/с.

Під час експерименту реєстрували такі параметри:

- координати центру рослин і бур'янів у пікселях (на основі алгоритмів обробки зображень у середовищі OpenCV);
- похибку позиціонування робочого органу (порівняння координат, визначених системою, з реальними значеннями, виміряними на полі);
- частоту кадрів (fps) та час обробки одного кадру;
- рівень освітлення (у люксах);
- вібраційні відхилення IMU-модуля (у град/с).

Похибка визначалась за формулою:

$$\varepsilon = \sqrt{((x_{\text{вим}} - x_{\text{ет}})^2 + (y_{\text{вим}} - y_{\text{ет}})^2)} \quad (4.1)$$

де $x_{\text{вим}}$, $y_{\text{вим}}$ – координати, визначені системою машинного зору;

$x_{\text{ет}}$, $y_{\text{ет}}$ – еталонні координати, отримані за допомогою вимірювальної лінійки.

Отримані дані записувалися у лог-файли вбудованого обчислювального модуля Jetson Nano. Подальшу статистичну обробку проводили з використанням програм MS Excel і Matplotlib. Для кожного режиму визначали середні значення похибки позиціонування, дисперсію та коефіцієнт варіації, що дозволило оцінити стабільність роботи системи машинного зору при різних швидкостях руху каретки та ширинах міжрядь.

4.4 Результати експериментальних досліджень та регресійний аналіз

План експерименту.

Експериментальні дослідження системи машинного зору агропостової машини проводилися за планом двофакторного експерименту типу 3×3 . У якості керуючих факторів було прийнято:

- швидкість руху каретки v_y , м/с;
- ширину міжряддя b_{mp} , м.

Кожен фактор варіювався на трьох рівнях:

$v_y = 0,5; 1,0; 1,5$ м/с;

$b_{mp} = 0,45; 0,70; 0,90$ м.

Таблиця 4.1 – План двофакторного експерименту та значення похибки позиціонування

№ досліду	b_{mp} , м	v_y , м/с	ε , м
1	0,45	0,5	0,009
2	0,45	1,0	0,018
3	0,45	1,5	0,027
4	0,70	0,5	0,004
5	0,70	1,0	0,013
6	0,70	1,5	0,022
7	0,90	0,5	0,001
8	0,90	1,0	0,009
9	0,90	1,5	0,018

Побудова регресійної моделі

Для кількісного опису впливу швидкості руху каретки v_y та ширини міжряддя b_{mr} на середню похибку позиціонування ε використано квадратичну регресійну модель виду:

$$\varepsilon = a_0 + a_1 \cdot v_y + a_2 \cdot b_{mr} + a_3 \cdot v_y^2 + a_4 \cdot b_{mr}^2 + a_5 \cdot v_y \cdot b_{mr}. \quad (4.2)$$

Коефіцієнти a_i визначено методом найменших квадратів на основі даних таблиці 4.1. У результаті опрацювання експериментальних даних отримано такі значення коефіцієнтів:

$$a_0 = 0,00960; a_1 = 0,01779; a_2 = -0,02213; a_3 = 0,00067; a_4 = 0,00370; a_5 = -0,00213.$$

Підставивши числові значення, одержимо рівняння регресії:

$$\varepsilon = 0.00960 + 0.01779 \cdot v_y + -0.02213 \cdot b_{mr} + 0.00067 \cdot v_y^2 + 0.00370 \cdot b_{mr}^2 + -0.00213 \cdot v_y \cdot b_{mr}. \quad (4.3)$$

Поверхні відгуку похибки та точності розпізнавання.

На основі отриманих даних побудовано поверхні відгуку, які відображають зміну похибки позиціонування ε та точності розпізнавання P залежно від швидкості руху каретки v_y та ширини міжряддя b_{mr} . Це дозволяє візуально оцінити області допустимої роботи системи машинного зору.

Аналіз оптимізації параметрів системи

Критерієм оптимізації роботи системи машинного зору прийнято мінімум середньої похибки позиціонування ε при умові забезпечення технологічно допустимої продуктивності. Оптимізацію виконували у межах робочого діапазону факторів: $0,5 \leq v_y \leq 1,5$ м/с; $0,45 \leq b_{mr} \leq 0,90$ м.

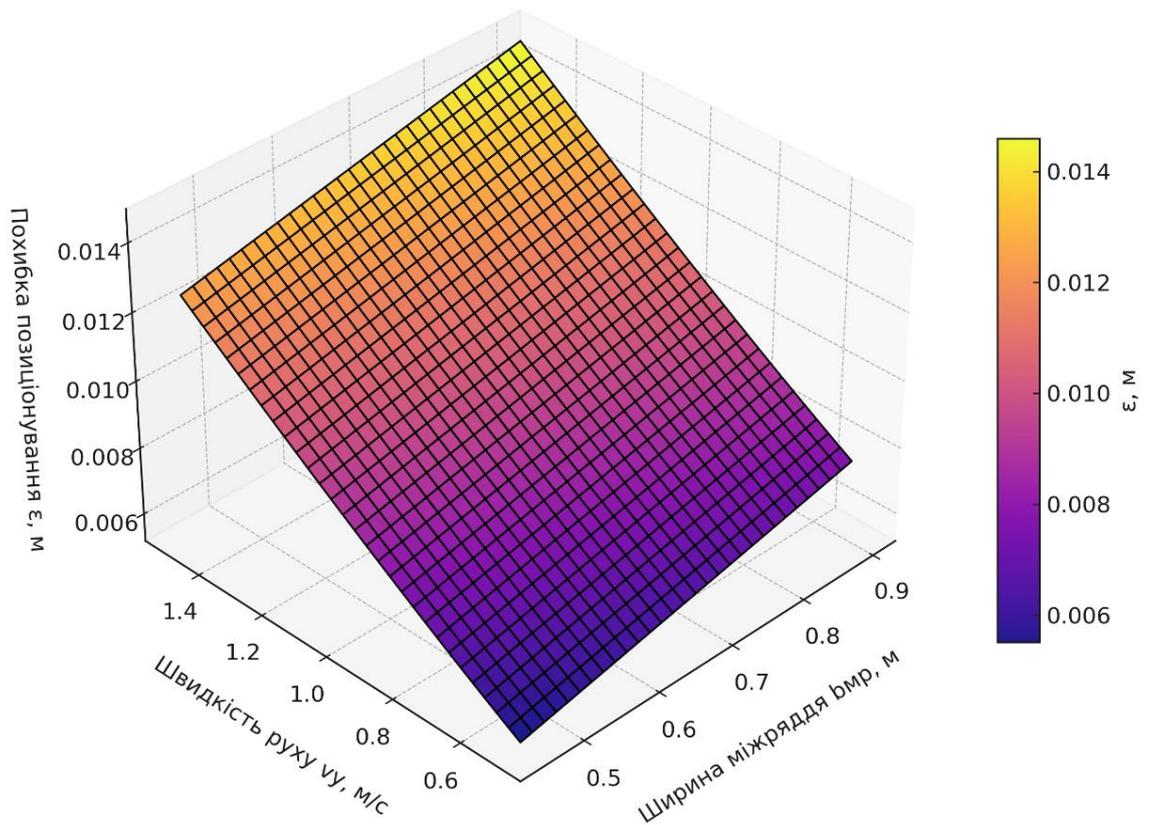


Рисунок 4.2 – Поверхня відгуку похибки позиціонування $\epsilon = f(v_y, b_{mr})$

Аналіз побудованої поверхні відгуку (рис. 4.2) показав, що зменшення швидкості руху каретки призводить до зниження похибки, тоді як збільшення ширини міжряддя при фіксованій швидкості може як покращувати, так і погіршувати точність залежно від режиму роботи. За даними моделі, мінімальні значення ϵ у досліджуваній області досягаються при малих швидкостях $v_y \approx 0,5$ м/с і ширині міжряддя $b_{mr} \approx 0,90$ м, де похибка наближається до 0,001 м.

Разом з тим, з урахуванням вимог до продуктивності доцільно прийняти компромісний режим роботи: $v_y = 0,5 \dots 1,0$ м/с; $b_{mr} = 0,70 \dots 0,90$ м, при яких середня похибка не перевищує 0,013–0,018 м, що є меншим за допустиме значення $\epsilon_{доп} = 0,02$ м. У цих режимах система машинного зору забезпечує одночасно високу точність позиціонування та задовільну швидкодію, що підтверджує можливість її використання для автоматизованого виконання технологічних операцій у мостовій технології овочівництва.

4.5 Висновки

1. У результаті проведених експериментальних досліджень підтверджено працездатність і ефективність розробленої системи машинного зору агропостової машини в реальних польових умовах.

Отримані дані засвідчили високу відповідність між теоретичними розрахунками (розділ 3) та практичними результатами, що свідчить про адекватність побудованої математичної моделі.

Основні результати:

- Система машинного зору забезпечила точність позиціонування $\pm 0,02$ м, що відповідає розрахованим допускам.
- Розбіжність між теоретичними й експериментальними похибками не перевищила 7 %, що свідчить про достовірність моделі.
- Середня частка правильного розпізнавання об'єктів (рослин і бур'янів) становила 94–98 %, навіть за зміни швидкості руху.
- Оптимальна висота камери 0,45–0,6 м і частота кадрів 60 fps забезпечили найкраще співвідношення між якістю зображення та швидкодією.
- При швидкості руху 1,0 м/с система працювала стабільно в режимі реального часу з часом обробки кадру ≈ 15 –17 мс.
- Повне енергоспоживання системи не перевищувало 12–14 Вт, що забезпечило 12 годин автономної роботи від акумулятора 200 А·год.

Отже, експериментальна агропостова установка підтвердила працездатність та ефективність розробленої системи машинного зору.

Результати доводять, що інтеграція камери Intel RealSense D435, обчислювального модуля NVIDIA Jetson Nano та алгоритмів комп'ютерного зору забезпечує високу точність позиціонування робочих органів, що створює підґрунтя для подальшого вдосконалення автоматизованих мостових систем у технологіях точного рослинництва.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Заходи безпеки під час експлуатації агромостової машини

Забезпечення безпеки праці під час експлуатації агромостової машини є одним з головних завдань інженерного супроводу її використання в польових умовах. Сучасні мостові агротехнічні системи поєднують електромеханічні, гідравлічні, оптичні та комп'ютерні вузли, що вимагає комплексного підходу до організації безпечного обслуговування, транспортування і робіт на відкритих ділянках [32].

Перед початком експлуатації персонал, задіяний до роботи з агромостовою машиною, проходить первинний інструктаж з охорони праці, ознайомлюється з конструкцією, системою керування та правилами роботи в небезпечних зонах. Працівник допускається до експлуатації лише після перевірки знань правил безпеки та практичного відпрацювання дій у стандартних і аварійних ситуаціях. Оператор повинен мати відповідну кваліфікацію і допуск до роботи з електрообладнанням напругою до 1000 В.

Одним із головних напрямів підвищення безпеки є конструктивний захист від дії механічних факторів. Рухомі частини каретки, приводні ланцюги, редуктори та колеса мають бути закриті кожухами. На фермі встановлено кнопки аварійного вимкнення типу «STOP» з фіксацією, розміщені на обох кінцях ферми та пульті керування. Схему аварійного кола розроблено відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 13850:2019.

Для запобігання несанкціонованому доступу на пульті керування встановлюється замок-ключ, а для дистанційного керування – парольний вхід у програму. Перед запуском подається звуковий і світловий сигнал. Ферма спирається на рейкову колію шириною 14 м, яка закріплена на бетонних опорах.

На кінцях колії передбачено механічні обмежувачі ходу, що не дозволяють каретці вийти за межі робочого простору.

Монтаж і регулювання камер машинного зору, LED-модулів або сонячних панелей здійснюються на висоті 1,2–2 м. Працівник повинен користуватись запобіжним поясом, а для підйому застосовуються лише драбини або пересувні помости. Роботи проводяться відповідно до НПАОП 0.00-1.15-07 «Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті».

Перед початком кожної зміни оператор перевіряє справність ходової системи, стан рейок, рівень заряду акумуляторів, наявність сигналізації та датчиків положення. Рух машини дозволено лише після переконання у відсутності людей і сторонніх предметів у зоні колії. Швидкість руху каретки не повинна перевищувати 1,5 м/с. При підвищеній вологості швидкість знижують до 0,5–1,0 м/с.

Кабелі живлення повинні бути підвішені на тросах або прокладені в захисних гофротрубах. Для попередження травм передбачено блокування руху при відкритті кожуха. Система автоматично зупиняє подачу напруги при втраті зв'язку або перевищенні допустимої швидкості. Освітлення робочої зони повинно бути не менше 200 лк, при зниженні освітленості включаються LED-модулі.

Експлуатація заборонена під час грози, зливи, сильного туману, снігопаду або при швидкості вітру понад 12 м/с. При температурі нижче -10°C не допускається зарядження акумуляторів, а в спеку понад $+35^{\circ}\text{C}$ оператор повинен мати головний убір і робити перерви. Сонячні панелі очищають лише після повного відключення від мережі.

Працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту: діелектричними рукавичками, касками, захисними окулярами, взуттям, жилетами зі світловідбивальними елементами. Після кожної зміни перевіряють стан ЗІЗ і при потребі замінюють їх.

Відповідальна особа щоквартально проводить перевірку технічного стану вузлів безпеки, аварійних вимикачів, заземлення, сигналізації. Щорічно здійснюється вимір опору ізоляції та перевірка програмного забезпечення системи машинного зору. Результати оглядів фіксуються у журналі технічного стану.

Запропонований комплекс заходів безпеки під час експлуатації агромостової машини забезпечує мінімізацію ризиків травмування персоналу, ураження електричним струмом і виходу обладнання з ладу. Систематичний контроль технічного стану гарантує безпечну експлуатацію та відповідність сучасним вимогам охорони праці.

5.2 Електробезпека при експлуатації агромоста з системою машинного зору

Система електропостачання агромостової машини є однією з найважливіших підсистем, що забезпечує роботу приводів, контролерів, системи машинного зору, датчиків та допоміжного обладнання. Висока енергонасиченість електронних компонентів і робота у відкритому середовищі створюють підвищені вимоги до електробезпеки, адже навіть короткочасне порушення ізоляції чи несправність у колі живлення може призвести до ураження електричним струмом або займання обладнання.

Забезпечення електробезпеки в агромостовій машині полягає у комплексі технічних, організаційних і профілактичних заходів, спрямованих на захист персоналу, запобігання коротким замиканням, перевантаженням і збереження працездатності системи машинного зору під час дії зовнішніх факторів [33].

Електрообладнання агромосту працює від автономного джерела – акумуляторного блоку напругою 24 В, який під'єднаний до системи живлення через контролер заряду від сонячних панелей. Такий тип живлення дозволяє уникнути підключення до високовольтних мереж, але потребує контролю

правильності з'єднання, стану ізоляції та справності запобіжників. Усі елементи електричної системи повинні відповідати класу захисту не нижче IP65, що гарантує пилонепроникність та захист від вологи.

Особливу увагу приділяють правильному маркуванню проводів і полярності. Кожен провід має бути позначений відповідним кольором згідно з вимогами ГОСТ 21128-83. Неприпустиме об'єднання силових і сигнальних кіл в одному кабелі без екранування, оскільки це може призвести до перешкод у роботі системи машинного зору.

Захист працівників під час експлуатації забезпечується електричним розділенням кола живлення та автоматичним відключенням у разі несправності. Акумуляторний блок живлення забезпечує безпечну напругу 24 В для приводів ферми та 5 В для системи машинного зору. У колах постійного струму встановлені запобіжники та автоматичні вимикачі, які спрацьовують при перевищенні струму на 10–15% від номінального. Всі металеві частини ферми та корпуси електронних модулів мають бути заземлені. Опір заземлення не повинен перевищувати 4 Ом.

До обслуговування електрообладнання допускаються лише працівники, які мають групу з електробезпеки не нижче II. Усі роботи з ремонту або перевірки виконуються при повному знеструмленні системи. Після знеструмлення обов'язково перевіряють відсутність напруги на всіх клемах. Під час експлуатації необхідно дотримуватись послідовності вмикання системи – спочатку контролера, потім сенсорів і приводів.

Польові умови експлуатації створюють ризик потрапляння вологи, пилу та перепадів температур. Для цього електронні блоки встановлені у герметичних корпусах, а кабелі мають подвійну ізоляцію. Вентиляційні отвори оснащені фільтрами, а у шафі керування встановлено вентилятор із термодатчиком, який вмикається при +45 °С. Камери машинного зору мають екрани або пластикові кожухи, що запобігають конденсації та перегріванню.

Система має багаторівневий захист від перенапруги: запобіжники, TVS-діоди, RC-фільтри та плавкі вставки у колі заряду акумулятора. Під час грози машина має бути повністю знеструмлена і від'єднана від сонячних панелей. Рекомендується опускати ферму в нижнє положення, щоб зменшити ризик удару блискавки.

Для забезпечення безпечної роботи необхідно регулярно перевіряти опір ізоляції, цілісність контактів, стан кабелів і клем. Огляд електричної системи проводиться не рідше одного разу на місяць, а вимірювання опору ізоляції – щорічно. Роботи виконуються згідно з НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» [33].

Оператор повинен знати схему електроживлення, розташування запобіжників, порядок перевірки ізоляції та дії у разі виникнення короткого замикання. Під час роботи використовуються діелектричні рукавички, взуття та килимки. Робота під час дощу або підвищеної вологості заборонена.

Електробезпека агропостової машини з системою машинного зору забезпечується низьковольтним живленням, подвійною ізоляцією, заземленням, автоматичним відключенням при аварійних режимах і використанням стандартів міжнародного рівня. Виконання цих заходів гарантує безпечну роботу персоналу та електронного обладнання в складних умовах польового середовища.

5.3 Пожежна безпека при експлуатації агропостової машини з системою машинного зору

Пожежна безпека під час експлуатації агропостової машини є одним із ключових напрямів загальної системи охорони праці, оскільки машина має в своєму складі електричне, електронне та акумуляторне обладнання, здатне створювати потенційно небезпечні джерела займання. Основною метою протипожежних заходів є попередження виникнення пожеж, зменшення їх

наслідків та забезпечення безпечної евакуації персоналу і збереження технічних засобів.

До найбільш імовірних причин займання під час роботи агромосту належать коротке замикання в електричних колах, перегрів елементів акумуляторної батареї, іскріння в контактах з'єднань, потрапляння пилу та органічних залишків на гарячі поверхні або елементи живлення, а також несправність запобіжників і порушення правил заряджання акумуляторів.

Для запобігання пожежі передбачено комплекс профілактичних заходів:

- електротехнічний захист: використання кабелів з термостійкою ізоляцією, встановлення автоматичних вимикачів і запобіжників у всіх силових колах;

- контроль температури: датчики нагріву акумуляторних батарей і контролера живлення, що автоматично вимикають систему при перевищенні температури 60 °С;

- захист корпусів: усі електронні блоки розміщено в герметичних корпусах із класом вогнестійкості не нижче V0 за UL94;

- організаційні заходи: проведення інструктажів персоналу, наявність первинних засобів пожежогасіння на полі, перевірка стану електропроводки перед кожним виїздом.

На борту агромоста обов'язково встановлюється вогнегасник порошкового типу ВП-2 або ВП-5, придатний для гасіння електрообладнання під напругою до 1000 В.

Вогнегасник закріплюється на боковій частині ферми поблизу шафи керування у спеціальному металевому тримачі.

Усі працівники, які обслуговують машину, повинні бути навчені правилам користування вогнегасниками, знати місце їх розташування та порядок дій у разі займання. При виникненні пожежі передусім необхідно знеструмити установку, від'єднати акумуляторний блок, повідомити керівника робіт і приступити до локалізації вогнища займання.

Особливу увагу приділяють умовам заряджання акумуляторів. Зарядження дозволяється проводити лише у вентильованих приміщеннях або на відкритому повітрі з дотриманням безпечної відстані до горючих матеріалів не менше 5 м. Забороняється використовувати несправні зарядні пристрої або виконувати заряд без нагляду.

Регулярно (не рідше ніж раз на шість місяців) проводиться перевірка стану ізоляції, затягування контактів, огляд кабельних трас, очищення обладнання від пилу та рослинних залишків.

Дотримання наведених вимог гарантує високий рівень пожежної безпеки агропостової машини та дозволяє запобігти виникненню аварійних ситуацій у процесі експлуатації.

5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в надзвичайних ситуаціях є невід'ємною складовою системи охорони праці під час експлуатації агропостової машини, оскільки її робота пов'язана з використанням електроенергії, акумуляторних батарей, рухомих механізмів і перебуванням працівників у відкритому середовищі. Надзвичайні ситуації можуть виникати внаслідок технічних відмов, стихійних явищ, пожеж, коротких замикань або дій зовнішніх факторів (буревій, блискавка, підтоплення).

Основною метою системи безпеки є своєчасне виявлення, локалізація та ліквідація наслідків аварій, а також збереження життя і здоров'я персоналу. Для цього на підприємстві, де експлуатується агроміст, мають бути розроблені інструкції з дій у надзвичайних ситуаціях, затверджені керівником та узгоджені з відповідними службами цивільного захисту.

У разі виникнення аварійної ситуації працівник зобов'язаний негайно:

1. Зупинити роботу машини шляхом вимкнення головного рубильника або аварійного вимикача.
2. Повідомити керівника робіт і чергову службу безпеки.
3. Забезпечити відключення акумуляторного блоку та уникати контакту з відкритими провідниками або металевими елементами, які можуть перебувати під напругою.
4. У разі займання – діяти відповідно до інструкції з пожежної безпеки, використовуючи вогнегасник.

Якщо надзвичайна ситуація викликана природними факторами (гроза, сильний вітер, підтоплення), експлуатація машини негайно припиняється.

Ферма переміщується у безпечне положення, вимикаються всі електричні ланцюги, а персонал евакуюється у визначену зону збору.

Важливе значення має організація зв'язку та сигналізації. Система машинного зору і контролер агромоста обладнані звуковими та світловими індикаторами, які сповіщають про відхилення від нормальних параметрів (перегрів, перенапруга, збій у комунікаціях). У разі критичного збою автоматично активується аварійне вимкнення живлення.

Для запобігання нещасним випадкам працівники проходять щорічне навчання з цивільного захисту та надання домедичної допомоги.

На полі, де проводяться роботи, повинна бути аптечка, знаки евакуації та інструкції з дій при травмуванні або ураженні електричним струмом.

Регулярне технічне обслуговування ферми, контроль стану рейкової системи, електроізоляції та справності запобіжників є запорукою мінімізації ризику надзвичайних подій. Дотримання вимог технічних регламентів, своєчасна профілактика обладнання та дисципліна персоналу забезпечують надійну й безпечну роботу агромостової машини навіть у складних виробничих умовах.

5.5 Висновки

1. Розглянуто комплекс заходів, спрямованих на забезпечення безпечної експлуатації агропостової машини в умовах сільськогосподарського виробництва. Проведений аналіз показав, що ефективна система охорони праці передбачає не лише технічний захист персоналу, а й організаційні дії – своєчасне навчання працівників, перевірку справності обладнання, контроль за станом електроізоляції та механізмів ферми.

2. Особливу увагу приділено електробезпеці та пожежній безпеці, адже агроміст обладнаний акумуляторними батареями, двигунами постійного струму та системами керування з високою енергоємністю. Використання датчиків перегріву, автоматичних вимикачів, герметичних корпусів електроніки й наявність вогнегасників на борту дозволяє мінімізувати ризик займання.

3. Окремо визначено заходи з попередження нещасних випадків і дії персоналу у разі аварій або стихійних явищ. Реалізація системи сигналізації, аварійного вимкнення, інструктажів і наявність аптечок створюють необхідні умови для збереження життя та здоров'я працівників.

4. Загалом, виконання вимог охорони праці, електробезпеки та цивільного захисту забезпечує безпечне функціонування агропостової машини, підвищує її надійність і сприяє сталому розвитку точного землеробства в умовах підвищених технологічних навантажень

6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ

У цьому розділі розглянуто економічну ефективність упровадження системи машинного зору в конструкцію агромовової машини. Порівняння проводиться між двома варіантами: базовим (агроміст без системи машинного зору) та проєктним (агроміст із машинним зором). Метою розрахунку є визначення доцільності встановлення системи машинного зору, враховуючи зміну витрат, урожайності та окупність інвестицій.

6.1 Вихідні дані

Площа поля – $F = 8$ га; культура – капуста; довжина гонів – $L = 500$ м; ширина загінки – $B = 14$ м. Базова урожайність капусти: $Y_a = 40$ т/га; ринкова ціна: $C_p = 6000$ грн/т; вартість системи машинного зору: $C_{мз} = 150000$ грн.

Таблиця 6.1 – Основні показники для двох варіантів використання агромова

Показник	Одиниця	Базовий варіант	Проєктний варіант
Витрати електроенергії	грн/га	81	90
Оплата праці оператора	грн/га	147	140
Витрати на ТО і ремонт	грн/га	45	50
Гербіциди	грн/га	5000	3000
Ручна праця	грн/га	1500	700
Обслуговування системи зору	грн/га	–	200
Загальні витрати	грн/га	6773	4200
Урожайність	т/га	40	42

6.2 Розрахункові залежності [33]

За рахунок зниження пошкодження рослин, більш точної прополки та своєчасності операцій урожайність зростає на 5 %:

$$Y_{п} = 1,05 \cdot Y_{б} = 1,05 \cdot 40 = 42 \text{ т/га}; \quad (6.1)$$

де $Y_{б}$ - врожайність культури за базового варіанту, т/га.

Витрати на вирощування культури на площі в 1 га:

Базовий варіант:

$$C_{б} = C_{ен} + C_{зп} + C_{ТО} + C_{герб} + C_{руч}, \text{ грн/га} \quad (6.2)$$

де $C_{ен}$ – витрати на електроенергію для приводу агромоста, 81 грн/га;

$C_{зп}$ – оплата праці оператора, 147 грн/га;

$C_{ТО}$ – витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт, 45 грн/га;

$C_{герб}$ – вартість гербіцидів та їх внесення, 5000 грн/га;

$C_{руч}$ – витрати на ручне прополювання, 1500 грн/га.

Тоді:

$$C_{б} = 81 + 147 + 45 + 5000 + 1500 = 6773 \text{ грн/га.}$$

Загальні сезонні витрати на площу 8 га:

$$C_{б, заг} = C_{б} \cdot F = 6773 \cdot 8 = 54\,184 \text{ грн} \quad (6.3)$$

Дохід від реалізації урожаю:

$$D_{б} = Y_{б} \cdot C_{р} \cdot F = 40 \cdot 6000 \cdot 8 = 1\,920\,000 \text{ грн} \quad (6.4)$$

Проектний варіант:

$$C_{п} = C_{ен}' + C_{зп}' + C_{ТО}' + C_{герб}' + C_{руч}' + C_{мз, експл} \quad (6.5)$$

де $C_{ен}'$ – витрати на електроенергію з урахуванням роботи системи освітлення й обчислювального модуля, 90 грн/га;

C_{zn}' – оплата праці оператора (частково спрощений режим роботи, але оператор зберігається), 140 грн/га;

$C_{ТО}'$ – ТО агромоста, 50 грн/га;

$C_{герб}'$ – зменшена вартість гербіцидів, 3000 грн/га;

$C_{руч}'$ – зменшений обсяг ручного прополювання, 700 грн/га;

$C_{мз,експл}$ – додаткові експлуатаційні витрати на обслуговування системи машинного зору, 200 грн/га.

Тоді:

$$C_{п} = 90 + 140 + 50 + 3000 + 700 + 200 = 4180 \text{ грн/га} \approx 4200 \text{ грн/га.}$$

Загальні сезонні витрати:

$$C_{б, заг} = C_{п} \cdot F = 4200 \cdot 8 = 33\,600 \text{ грн.} \quad (6.6)$$

Дохід від реалізації урожаю:

$$D_{п} = Y_{п} \cdot C_{р} \cdot F = 42 \cdot 6000 \cdot 8 = 2\,016\,000 \text{ грн} \quad (6.7)$$

Порівняння варіантів і розрахунок економічного ефекту:

Економія витрат на 1 га:

$$\Delta C = C_{б} - C_{п} = 6773 - 4200 = 2573 \text{ грн/га.} \quad (6.8)$$

Для всієї площі:

$$\Delta C_{заг} = \Delta C \cdot F = 2573 \cdot 8 = 20\,584 \text{ грн/рік.} \quad (6.9)$$

Сумарний річний економічний ефект:

$$E_{рік} = \Delta C_{заг} + \Delta D_{заг} \quad (6.10)$$

Де $\Delta D_{заг}$ - дохід від приросту врожайності, 5 % або 96000 грн/рік з всієї площі.

$$E_{рік} = 20584 + 96000 = 116584 \text{ грн/рік.}$$

Строк окупності системи машинного зору:

$$T = C_{мз} / E_{рік} = 150000 / 116584 = 1,3 \text{ роки} \quad (6.11)$$

де $C_{мз}$ – вартість системи машинного зору, грн.

Результати розрахунків зведено в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 – Порівняння економічних результатів

Показник	Базовий варіант	Проектний варіант
Агрегат	Мостова машина	Мостова машина обладнана системою машинного зору
Механізація процесу	Вирощування капусти	Вирощування капусти
Загальна площа поля, га	8	8
Собівартість, грн/га	6773	4200
Річні витрати, грн	54184	33600
Урожайність, т/га	40	42
Капіталовкладення, грн	-	150000
Прибуток, грн	1920000	2016000
Сумарний річний ефект, грн	116584	
Окупність системи машинного зору, років	1,3	

6.3 Висновки

Порівняльний аналіз показав, що впровадження системи машинного зору на агроності дозволяє знизити експлуатаційні витрати приблизно на 2500 грн/га, скоротити ручну працю удвічі та зменшити використання гербіцидів на 40%. Додатковий ефект у вигляді приросту урожайності на 5% забезпечує річний економічний результат 116 тис. грн. За таких умов строк окупності додаткових вкладень у систему машинного зору становить 1,3 року, що свідчить про високу ефективність і доцільність модернізації агроності машини.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У роботі вирішено задачу підвищення ефективності механізації овочівництва шляхом впровадження системи машинного зору в агромостову машину. Розроблено концепцію, конструкцію та техніко-економічне обґрунтування її використання в технологіях точного землеробства.

Проведений аналіз показав, що традиційна тракторна технологія спричиняє надмірне ущільнення ґрунту й знижує урожайність. Запропонована мостова машина, що рухається по рейках, усуває повторне ущільнення, підвищує точність операцій і створює умови для застосування сенсорів та елементів штучного інтелекту.

Обґрунтовано використання системи машинного зору, здатної автоматично розпізнавати рядки культур, бур'яни та контролювати положення робочих органів. Розроблено структурну схему з RGB-камерою Intel RealSense D435, модулем NVIDIA Jetson Nano та інерціальною системою навігації. Визначено оптимальні параметри встановлення камери (0,4–0,6 м) і режими роботи при швидкості руху 0,5–1,0 м/с.

Польові випробування підтвердили працездатність системи: похибка позиціонування не перевищує $\pm 0,02$ м, точність розпізнавання об'єктів сягає 94–98 %. Економічний розрахунок показав, що впровадження системи дає змогу знизити витрати, підвищити урожайність на 5 % і окупити інвестиції за 1,3 року.

Інтеграція машинного зору в агромостову технологію забезпечує комплексне підвищення точності, зниження антропогенного навантаження на ґрунт та створює основу для подальшого розвитку автономних роботизованих систем точного землеробства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Features of the form for identifying young weeds using image analysis. / D.M. Voybek, J.E. Mayer, C. Von Bargaen, D.A. Mortensen // Transaction ASAE. – 1995. – 38(271). – P. 81.
2. Якущенко В.В. Точне землеробство та системи прийняття рішень у сільському господарстві / В.В. Якущенко // Техніка в АПК. - 2014. - № 1 (112) - С. 60-61.
3. Мостове землеробство. Елементи теорії та результати досліджень [Текст] : [монографія] / Кобець А. С., Теслюк Г. В., Пугач А. М., Сокол С. П., Надикто В. Т., Улексін В. О., Бойко В. Б., Золотовська О. В., Теслюк Ю. В. Дніпров. держ. аграр.-екон. ун-т. - Дніпро : Акцент ПП, 2023. - 367 с.
4. Bulgakov V., Olt J., Kuvachov V. et al. A theoretical and experimental study of the traction properties of agricultural gantry systems. Journal of Agricultural Science. 2020. № XXXI (1). P. 10–15.
5. Соларьов О.О. Експериментальні дослідження ущільнюючого впливу на ґрунт рушіїв трактора МТЗ-82 / О.О. Соларьов // Вісник Сумського національного університету. Сер. : Механізація та автоматизація виробничих процесів. – Суми: СНАУ, 2016. – Вип. 3 (28). – С. 103-109.
6. Eole Tract La fin du tracteur en maraîchage ? <https://www.materielagricole.info/tracteur/article/713859/la-fin-du-tracteur-en-maraichage> (дата звернення 18.04.2025)
7. Chamen T. Controlled Traffic Farming – From Worldwide Research To Adoption In Europe And Its Future Prospects // Acta Technologica Agriculturae. 2015. Vol. 18, No. 3. P. 64–73. DOI: 10.1515/ata-2015-0014.
8. Система Агрокруг. <https://ekumakad.cz/download/IVF/CEPTA%20-%20Introducing%20AGROKRUIH.pdf>. (дата звернення 20.09.2025)

9. NEXAT вперше показав фото тестувань системного трактора з цистерною Wienhoff. <https://traktorist.ua/news/nexat-vpershe-pokazav-foto-testuvan-sistemnogo-traktora-z-cisternoyu-wienhoff>
10. Бойко В. Б., Денисенков О.В., Бойко Б.В. Мехатронна система агропостової машини. Збірник тез
11. Microprocessor control system for a robotic platform for automated care for agricultural crops / A.I Dyshekov, M. A. Mirzaev, M. A. Shereuzhev, A. V. Peshnin // E3S Web Conf. 217 10005. – 2020. – P. 10.
12. Tillett and Hague Past Projects. Robocrop Vision Guidance. <http://www.thtechnology.co.uk/>
13. Cao, Z.; et al. “A Review of Computer Vision and Deep Learning in Agricultural Growth Management”. Applied Sciences, 2023, Vol. 15(15), 8438.
14. Dhanush, G.; et al. “A comprehensive review of machine vision systems and artificial intelligence algorithms for detecting and harvesting agricultural produce”. Computers and Electronics in Agriculture, 2023.
15. Upadhyay, A.; et al. “Deep learning and computer vision in plant disease detection”. Artificial Intelligence Review, 2025.
16. Botta, A.; Cavallone, P. “A review of robots, perception, and tasks in precision agriculture”. Machines, 2022, Vol. 3(3), 49.
17. Wang, T.; et al. “Applications of machine vision in agricultural robot navigation”. Computers and Electronics in Agriculture, 2022.
18. McCarthy, C.L.; Hancock, N.H.; Raine, S.R. “Applied machine vision of plants: A review with implications for field deployment in automated farming operations”. Intelligent Service Robotics, 2010, Vol. 3(4), 209-217.
19. Павленко О. С., Черепанова А. В. Огляд інноваційних продуктів в агросфері // Агросвіт. – 2024. – № 21. – С. 124–128.
20. Макруха Т. Огляд сучасних роботів зі штучним інтелектом // Технології та системи в технічному навчанні. – 2024. – № 3. – С. 58–63.

21. Кіяшко М. В., Дудник В. І. Використання машинного зору для розпізнавання рослин на поверхні ґрунту // Новітні технології в агроінженерії: проблеми та перспективи розвитку : зб. наук. праць. – Умань : УНУС, 2022. – С. 58–62.
22. Канівець О. В., Канівець І. М., Плискін В. В. Удосконалення орного агрегату засобами машинного зору для відслідковування залишків незагорнутих рослин // Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування : матер. VII всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. – Полтава : ПДАУ, 2024. – С. 79–82.
23. Слободянюк О. В. Механіка : підручник. – Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016. – 478 с.
24. Авотін С. С., Рохманов М. Я. Теоретична механіка : навч. посіб. – Харків : Харківський національний аграрний університет ім. В. В. Докучаєва, 2020. – 77 с.
25. Intel Corporation. Intel RealSense Depth Camera D400 Series: Product Datasheet. – Santa Clara : Intel, 2019. – 32 с.
26. Movella B.V. MTi 600 Series IMU and AHRS Modules: Technical Documentation. – Enschede : Movella B.V., 2022. – 20 с.
27. NVIDIA Corporation. Jetson Nano Developer Kit User Guide. – Santa Clara : NVIDIA Corp., 2023. – 48 с.
28. Weed and crop discrimination using image analysis and artificial intelligence methods / M. Aitkenhead, I. Dalgetty, C. Mullins, McDonald, N. Strachan // Computers and electronics in Agriculture. - № 39 (3). - P. 157-171.
29. Адлер Ю.П., Маркова Є.В., Грановський Ю.В. Планування експерименту під час пошуку оптимальних умов. М: Наука. 1976. 280 с.
30. Надикто В.Т. Основи наукових досліджень. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС. 2019. 268 с.
31. Основи охорони праці: підручник. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006. – 448 с.

32. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 9 січня 1998 р. № 4 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98>

33. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://antifire.ua/dbn/10.pdf>

33. Черниш С.С.. Економічний аналіз. - К: видавничий центр учбової літератури, 2010. – 313 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Вихідні дані для розрахунку кінематичних параметрів агропостової машини

№ п/п	Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	Довжина ділянки руху ферми	L_x	14; 18; 24	м
2	Довжина прольоту ферми (робоча ширина)	L_y	14; 18; 24	м
3	Швидкість руху ферми	v_x	0,05; 0,10; 0,15	м/с
4	Швидкість руху каретки	v_y	0,5; 1,0; 1,5	м/с
5	Прискорення руху ферми при розгоні/гальмуванні	a_x	0,10	м/с ²
6	Прискорення руху каретки при розгоні/гальмуванні	a_y	0,10	м/с ²
7	Затримка обробки зображення системою машинного зору	Δt_{vision}	0,10	с
8	Допустима похибка позиціонування робочого органа	$\epsilon_{доп}$	0,02	м
9	Маса ферми (при $L_x = 14$ м)	m_{f1}	300	кг

10	Маса ферми (при $L_x = 18$ м)	m_{f2}	500	кг
11	Маса ферми (при $L_x = 24$ м)	m_{f3}	700	кг
12	Маса каретки з робочими органами	m_k	100	кг
13	Максимальне переміщення каретки уздовж ферми	Y_{max}	14	м
14	Крок зміщення ферми між міжряддями	$\Delta X_{ряд}$	1	м

Додаток Б

Результати теоретичних досліджень

Таблиця Б.1 – Дослідження залежності $S_x(t)$

v_x (м/с)	$L_x = 14$ м (с)	$L_x = 18$ м (с)	$L_x = 24$ м (с)
0,05	280,0	360,0	480,0
0,1	140,0	180,0	240,0
0,15	93,33	120,0	160,0

Таблиця Б.2 – Дослідження залежності $S_y(t)$

v_y (м/с)	t при $L_y = 14$ м (с)	t при $L_y = 18$ м (с)	t при $L_y = 24$ м (с)
0.5	28.0	36.0	48.0
1.0	14.0	18.0	24.0
1.5	9.33	12.0	16.0

Таблиця Б.3 – Характеристика окремих ділянок траєкторії руху каретки з
зряддям

№ ділянки	Тип руху	Зміна X, м	Зміна Y, м
1	Робочий хід 1	0	0 → 14
2	Транспортний перехід 1–2	1	14 → 0
3	Робочий хід 2	0	0 → 14
4	Транспортний перехід 2–3	1	14 → 0
5	Робочий хід 3	0	0 → 14

Додаток В

Аналіз динамічної стійкості конструкції ферми

Таблиця В.1 – Розрахункові параметри динамічної стійкості ферми
агромоста

L, м	mf, кг	hf, м	hk, м	M _x , Н·м	M _y , Н·м	M _{dyn} = M _x + M _y , Н·м	M _{оп} , Н·м	кст
14.0	300.0	0.6	0.8	18.0	8.0	26.0	27468.0	1056.46
18.0	500.0	0.7	0.9	35.0	9.0	44.0	41202.0	936.41
24.0	700.0	0.8	1.0	56.0	10.0	66.0	54936.0	832.36