

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Факультет (ННІ) ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПОГОДЖЕНО

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

| | |
|---|---|
| <p>Декан факультету (Директор ННІ) <u>Інформаційних технологій</u> (назва факультету(ННІ)) <u>Болбот І.М., д.т.н., проф.</u> (підпис) (ПІБ, вчене звання і ступінь) «__» _____ 2025 р.</p> | <p>Завідувач кафедри <u>Комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки</u> (назва кафедри) <u>Касаткін Д.Ю., к. пед.н., доц.</u> (підпис) (ПІБ, вчене звання і ступінь) «__» _____ 2025 р.</p> |
|---|---|

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження та вдосконалення системи керування маніпулятором для збирання продукції АПК»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і найменування)

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі
(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Шкарупило В.В.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Д.Т.Н., проф.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Болбот І.М.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Попов Д.С.
(ПІБ)

КИЇВ-2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
к.пед.н., доц. Касаткін Д.Ю.
(вчене звання і ступінь) (підпис) (ПІБ)
 «__» _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Попову Дмитру Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і найменування)

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі
(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Дослідження та вдосконалення систем керування маніпулятором для збирання продукції АПК»

затверджена наказом ректора НУБіП України від “29” жовтня 2024р. № 1941 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14 листопада 2025 р.

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи _____

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз систем керування сучасних роботизованих маніпуляторів.
2. Дослідження сенсорного забезпечення та зворотного зв'язку системи керування.
3. Розроблення та вдосконалення адаптивної системи керування маніпулятором.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання “ 29 ” жовтня 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Болбот І.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Попов Д.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка: 63 сторінок, 27 рисунків, 3 лістинга, 25 джерел.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, UR5, BACCHUS, FFROBOTICS FIELD ROBOT, ДОСЛІДЖЕННЯ, ВДОСКОНАЛЕННЯ, МАНІПУЛЯТОР.

Об'єкт дослідження: системи керування роботизованими маніпуляторами, що застосовуються в агропромисловому комплексі.

Актуальність роботи зумовлена потребою у вдосконаленні систем керування роботизованими маніпуляторами, що застосовуються в агропромисловому комплексі. Ефективна система керування забезпечує точність, стабільність і адаптивність рухів маніпулятора в умовах змінного навантаження та складного аграрного середовища, що є ключовим чинником підвищення продуктивності автоматизованих процесів.

У роботі розглядаються чотири розділи.

У першому розділі проведено аналіз існуючих роботизованих систем, зокрема маніпуляторів UR5, BACCHUS, FFRobotics та Soft-Gripper System. Подано їх порівняльну характеристику та визначено особливості систем керування, що використовуються в аграрній робототехніці.

У другому розділі визначено функціональні та технічні вимоги до системи керування маніпулятором, розглянуто сенсорні елементи, виконавчі механізми, контролер та середовище програмної розробки Arduino IDE і SolidWorks.

У третьому розділі виконано тривимірне моделювання конструкції маніпулятора, силовий розрахунок ланок, а також розроблено вдосконалену систему керування із застосуванням адаптивного регулювання та сенсорного зворотного зв'язку.

У четвертому розділі проведено аналіз результатів моделювання, оцінено переваги вдосконаленої системи керування та визначено перспективи її практичного впровадження в аграрному виробництві.

ABSTRACT

Explanatory Note: 63 pages, 27 figures, 3 listings, 25 sources.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, UR5, BACCHUS, FROBOTICS FIELD ROBOT, ДОСЛІДЖЕННЯ, ВДОСКОНАЛЕННЯ, МАНІПУЛЯТОР.

Object of research: control systems of robotic manipulators used in the agro-industrial complex.

Relevance of the work is determined by the need to improve control systems of robotic manipulators applied in the agro-industrial sector. An effective control system ensures the accuracy, stability, and adaptability of manipulator movements under variable loads and in complex agricultural environments, which is a key factor in increasing the productivity of automated processes.

The work consists of four chapters.

The first chapter analyzes existing robotic systems, in particular manipulators such as UR5, BACCHUS, FFRobotics, and Soft-Gripper System. Their comparative characteristics are presented, and the features of control systems used in agricultural robotics are defined.

The second chapter outlines the functional and technical requirements for the manipulator control system, describing the sensor elements, actuators, controller, and the software development environments Arduino IDE and SolidWorks.

The third chapter presents the 3D modeling of the manipulator structure, strength calculations of its links, and the development of an improved control system using adaptive regulation and sensor feedback.

The fourth chapter analyzes the modeling results, evaluates the advantages of the improved control system, and defines the prospects for its practical implementation in agricultural production.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 9

1.1. Загальна характеристика роботизованих маніпуляторів в АПК 9

| | |
|--|----|
| | 6 |
| 1.2. Маніпулятор UR5 (Universal Robots) | 10 |
| 1.3. Роботизована система BACCUS | 13 |
| 1.4. FFRobotics Field Robot | 15 |
| 1.5. Порівняльна характеристика систем | 17 |
| 1.6. Системи керування | 19 |
| РОЗДІЛ 2 | 25 |
| 2.1 Функціональні вимоги до системи керування | 25 |
| 2.2 Технічні вимоги до елементів системи | 26 |
| 2.3 Сенсори, виконавчі механізми і контролер | 31 |
| 2.4 Програмне та комп'ютерне середовище розробки | 36 |
| РОЗДІЛ 3 | 39 |
| 3.1 Функціональні вимоги до системи керування | 39 |
| 3.2. Тривимірне моделювання та аналіз міцності | 40 |
| 3.2 Силовий розрахунок ланок робота-маніпулятора | 43 |
| 3.3 Вдосконалення системи керування маніпулятором | 46 |
| 3.4 Сенсорна та апаратна складова системи керування маніпулятора | 48 |
| 3.5 Програмна реалізація системи керування маніпулятором | 51 |
| РОЗДІЛ 4 | 53 |
| 4.1 Аналіз результатів моделювання розробленої системи керування . | 53 |
| 4.2 Переваги впровадження вдосконаленої системи керування | 55 |
| 4.3 Перспективи розвитку та можливості впровадження вдосконаленої системи керування | 57 |
| ВИСНОВКИ | 60 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ | 61 |
| ДОДАТОК А. | 63 |

ВСТУП

Сучасний розвиток агропромислового комплексу потребує впровадження інноваційних технологій, спрямованих на підвищення ефективності виробництва, зменшення впливу людського фактору та забезпечення стабільної якості продукції. Одним із ключових напрямів цифровізації сільського господарства є автоматизація технологічних процесів із використанням роботизованих систем. Роботизовані маніпулятори, здатні виконувати широкий спектр операцій — від збирання плодів до їх сортування, пакування та транспортування — стають важливим елементом сучасного аграрного виробництва.

Актуальність теми полягає в необхідності підвищення точності, надійності та адаптивності систем керування маніпуляторами, які працюють у складних умовах аграрного середовища. Традиційні промислові маніпулятори, розроблені для стабільних і контрольованих умов, не враховують змінні параметри, властиві сільському господарству: нерівності ґрунту, різноманіття форм і розмірів плодів, вплив погодних факторів тощо. Тому дослідження та вдосконалення системи керування, здатної адаптуватися до таких умов, є важливим завданням сучасної мехатроніки та аграрної робототехніки.

Маніпулятори, призначені для збирання продукції, повинні не лише забезпечувати високу точність позиціонування, а й виконувати захоплення делікатних об'єктів без пошкодження їх структури. Досягнення цього можливе завдяки застосуванню сенсорних систем, адаптивних алгоритмів регулювання та інтелектуального аналізу даних. Розроблення та моделювання таких систем відкриває нові можливості для створення енергоефективних і гнучких рішень для аграрного виробництва.

Метою дослідження є розробка та вдосконалення системи керування роботизованим маніпулятором для збирання продукції агропромислового комплексу, що забезпечує підвищення точності, стабільності та адаптивності руху робочого органу в умовах змінного навантаження.

Об'єктом дослідження є системи керування маніпуляторами, що застосовуються в агропромисловому комплексі.

Предметом дослідження є методи та алгоритми адаптивного керування маніпуляторами, а також сенсорні й програмно-апаратні засоби, які забезпечують стабільну роботу системи.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих роботизованих систем і маніпуляторів, що використовуються в аграрному виробництві.
2. Розробити математичну та тривимірну модель маніпулятора для дослідження його динамічних характеристик.
3. Створити структуру вдосконаленої системи керування з використанням сенсорних елементів і адаптивних алгоритмів.
4. Провести моделювання та аналіз ефективності розробленої системи керування.
5. Оцінити перспективи впровадження вдосконаленої системи в реальних умовах агропромислового виробництва.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МАНІПУЛЯТОРІВ ТА ЇХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ В АПК

1.1. Загальна характеристика роботизованих маніпуляторів в АПК

Для стабільного розвитку агропромислового комплексу необхідно впроваджувати інноваційні технології. Такі технології мають на меті покращити продуктивність виробництва, зменшити вплив людського фактору та гарантувати якість продукції. Наразі автоматизація є важливою для сільського господарства, і роботизовані маніпулятори є однією з основних компонентів цієї автоматизації. Вони здатні виконувати широкий спектр операцій - від збирання врожаю до його сортування, пакування, обприскування та транспортування сільськогосподарської продукції.

Роботизований маніпулятор являє собою автоматизований пристрій із кількома ступенями вільності, який імітує рухи людської руки. Його конструкція складається з шарнірів і послідовно з'єднаних ланок, що приводяться в дію електричними, пневматичними або гідравлічними приводами. Це дозволяє робочим органам, таким як захоплювач, форсунка, ніж тощо, точно позиціонуватися в просторі для виконання заданих дій.

У сільському господарстві роботизовані маніпулятори поділяються на кілька основних груп відповідно до того, які завдання вони виконують:

- маніпулятори для збирання продукції (фруктів, овочів, ягід);
- роботи для сортування та пакування продукції;
- маніпулятори технологічного обслуговування, що здійснюють дозування, пересаджування рослин або обприскування посівів.

Особливістю сільськогосподарських роботів є робота в складних і змінних умовах середовища. Об'єкти маніпулювання, такі як плоди чи овочі, мають різну форму, розмір, текстуру й ступінь стиглості. Грунт і робоча поверхня можуть бути нерівними, а навколишні фактори такі як: освітлення, вологість, вітер — суттєво впливають на точність і стабільність роботи системи. Через це стандартні промислові маніпулятори, розроблені для

повторюваних операцій у контрольованих умовах, не можуть ефективно працювати в аграрному середовищі без відповідної адаптації.

У світі вже реалізовано багато прикладів успішного використання роботизованих систем у сільському господарстві. Зокрема, іспанська компанія Agrobot створила систему для збирання полуниці, що використовує комп'ютерний зір для розпізнавання стиглих плодів. У Бельгії компанія Ostinion розробила робота Rubion, який обережно відокремлює ягоди від стебел, не пошкоджуючи їх поверхню. Японська компанія FFRobotics створила маніпулятор для збирання яблук, який працює автономно, використовуючи камери глибини та адаптивне керування силою захоплення.

Запровадження таких систем підвищує продуктивність і точність агротехнічних операцій, знижує витрати на ручну працю та допомагає оптимізувати виробничі процеси. Але адаптація промислових маніпуляторів до умов агропромислового комплексу залишається складним завданням. Це вимагає розробки спеціалізованих систем керування, які можуть враховувати динамічні характеристики та змінне навантаження.

Отже, роботизовані маніпулятори мають значний потенціал для подальшої автоматизації агропромислового виробництва. Вони поєднують досягнення сучасної мехатроніки, сенсорних технологій та штучного інтелекту, створюючи адаптивні системи, які забезпечують високу точність, енергоефективність і здатність працювати в реальних умовах сільськогосподарського середовища, де традиційні промислові рішення часто виявляються недостатньо ефективними.

1.2. Маніпулятор UR5 (Universal Robots)

Маніпулятор UR5 від Universal Robots, який зображений на рисунку 1.1, є однією з найбільш поширених платформ для аграрної робототехніки як у промисловому, так і в науковому використанні. Його широке застосування, точність і простота програмування дозволяють створювати адаптивні системи

для збору плодів, сортування, пакування, обприскування та моніторингу рослин.

UR5 може безпечно взаємодіяти з людиною без фізичних перешкод, оскільки він належить до колаборативних роботів. Він має шість ступенів вільності, вантажопідйомність до 5 кг, радіус дії близько 850 мм і точність позиціонування $\pm 0,1$ мм. Приводи маніпулятора - це електричні серводвигуни із замкнутим контуром зворотного зв'язку, який дозволяє підтримувати стабільну траєкторію руху навіть при змінному навантаженні.

У сільському господарстві UR5 часто використовують разом із сенсорними системами, такими як силові сенсорні датчики на кінцевому ефекторі та камери Intel RealSense D435i, лідера та камери глибини ZED. Розпізнавання плодів, обчислення їхнього положення у просторі та планування траєкторії підходу є можливими завдяки цій конфігурації. UR5 використовується як дослідницька платформа для збирання огірків, перцю, полуниці та томатів у багатьох експериментальних розробках.

Щодо системи керування то, архітектура UR5 відкритої системи дозволяє використовувати власні алгоритми. Базовий контролер робота використовує ПД-регулювання на рівні кожного суглоба, а глобальний модуль керування використовує обернену кінематику для координації рухів. Адаптивні модифікації цього методу часто застосовують для вирішення аграрних проблем.

Наприклад, UR5 отримує координати плодів від RGB-D камери під час збору томатів, а потім програмне забезпечення на основі ROS формує вектор руху до об'єкта. Кінцевий ефектор, або захоплювач, активує сенсор сили ACS712 або подібний, щоб визначити контакт із плодом, коли він досягає зони дії. Якщо сила перевищує дозволена, контролер зменшує струм приводу, щоб запобігти пошкодженню плоду.

Планувальник траєкторій MoveIt! створює ідеальну траєкторію з урахуванням обмежень по швидкості та кутового прискорення для стабільності роботи UR5. Модельно-орієнтовані алгоритми (MPC) керують

UR5 у більш складних системах. Ці алгоритми дозволяють враховувати інерційні параметри при русі руки з різними типами плодів.

UR5 у аграрній промисловості використовується разом з м'яким пневматичним захоплювачем. Сила тиску в захоплювачі контролюється окремим контуром ПДД-керування, який узгоджується з головним контролером робота. Це дозволяє поєднати точність позиціонування з делікатністю контакту, що є важливим для роботи з м'якими культурами.

Одним із найбільш відомих прикладів застосування UR5 у сфері аграрної робототехніки є Soft-Gripper System — експериментальна система, побудована на базі маніпулятора UR5 із використанням м'якого пневматичного захоплювача. У такій конфігурації UR5 виконує роль високоточного маніпулятора, який забезпечує позиціонування, орієнтацію та контроль руху, тоді як пневматичний захоплювач реалізує безпечну взаємодію з об'єктом. Основна ідея системи полягає у використанні еластичних силіконових “пальців”, які під дією регульованого тиску повітря змінюють форму, охоплюючи плід м'яко, але надійно. Це дозволяє виконувати маніпуляції з делікатними культурами — полуницею, томатами, яблуками, перцем, виноградом тощо — без пошкодження поверхні.

Таке поєднання механічної точності UR5 та гнучкості м'якого захоплювача робить систему універсальним рішенням для задач збирання, сортування або пакування продукції. Крім того, завдяки модульності конструкції Soft-Gripper System може бути швидко адаптована під різні типи плодів, розміри контейнерів чи специфіку тепличного середовища. Це робить її одним із найефективніших прикладів колаборативної робототехніки у сфері агропромислового комплексу.

UR5 став універсальною платформою для досліджень у сільському господарстві для тестування сенсорних модулів, алгоритмів адаптивного позиціонування та систем керування. Його використовують для створення інтелектуальних аграрних роботів, оскільки він надійний та модульний.



Рис. 1.1 Маніпулятор UR5

1.3. Роботизована система VACCHUS

Комплекс аграрної робототехніки VACCHUS (рис 1.2) є одним із найвідоміших проєктів у Європі. Він розроблений, щоб допомогти автоматизувати збирання винограду у польових умовах. Система була розроблена в рамках проєкту ЄС H2020 і включає мобільну платформу, автономну навігацію, дві роботизовані руки та систему візуального сприйняття.

Механічна частина системи складається з двох шестивісьових маніпуляторних рук, які мають конструкцію, подібну до UR5, що дозволяє обробляти дві сторони рядка виноградника одночасно. Кінцеві ефектори оснащені гнучкими захватами для утримання грон і спеціальними ножовими механізмами для їх зрізання. Вся система змонтована на електропривідній платформі, яка може переміщуватися між рядами виноградника за допомогою GPS-навігації та лідарного позиціонування.



Рис. 1.2 Система VACCHUS

У VACCHUS використовується багаторівнева система керування. На верхньому рівні планується маршрут платформи, на середньому координуються два маніпулятори, а на нижньому керуються приводами та сенсорами кожної ланки.

На рівні окремого маніпулятора використовується комбінація алгоритмів адаптивного ПД-регулювання та візуального сервоконтролю. В реальному часі камери RGB-D біля кінцевих ефektorів оцінюють положення грона, а програмний модуль на базі нейронної мережі визначає його контур і орієнтацію. Траєкторію підходу визначає контролер, щоб уникнути зіткнення з листям і гілками.

Коли система досягає об'єкта, вона запускає механізм зрізу, а потім коригує захоплення відповідно до маси грона, яка визначається моментом шарніру. Регулятор використовує модель Калмана та фільтр прогнозування положення для коригування рухів у реальному часі в разі зміни зовнішніх умов, таких як вітер або коливання гілок.

На рівні мобільної бази використовується автономна система навігації

SLAM з CAN-шиною для синхронізації координат маніпуляторів. Інфраструктура ROS керує всією системою, що забезпечує обмін даними між сенсорними модулями, приводами та центральним процесором.

Система продемонструвала ефективність до 75% при самостійному зборі врожаю та може працювати самостійно, не потребуючи допомоги оператора. ВАСCHUS є прикладом складної робототехнічної системи, яка вміщує в себе мехатроніку, сенсоріку, візійне розпізнавання та планування руху завдяки впровадженню адаптивних систем керування.

1.4. FFRobotics Field Robot

FFRobotics розробила один із перших успішних роботів-збирачів фруктів, який зараз використовується на фермах у Сполучених Штатах, Ізраїлі та Новій Зеландії. Мобільна платформа та три маніпуляторні руки (рис 1.3), кожна з яких має сенсорний модуль і контролер.

Механічна конструкція базується на модульних маніпуляторах із семи ступенями вільності, що забезпечує високу гнучкість при маніпулюванні між гілками дерев. Кожен маніпулятор має захоплювач із гумовими пальцями, які можуть змінювати тиск і форму захоплення залежно від розміру плоду. Нейронна мережа та камери глибини визначають стиглість і координати кожного фрукта.

Основна система керування складається з центрального контролера, який контролює рухи всіх трьох рук, і локальних модулів, які контролюють низькорівневе керування кожного маніпулятора. Гнучке адаптивне ПД-керування на рівні приводу враховує зміну маси при переміщенні фрукта.

Кожен захоплювач має сенсор сили та моменту, також відомий як сенсор FT, який постійно оцінює зусилля контакту. Коли тиск у приводі перевищує порогове значення, контролер автоматично знижує тиск, що запобігає пошкодженню плоду. Алгоритм компенсації гравітаційних та інерційних моментів використовується для стабілізації рухів у динамічних умовах. Це

підвищує точність позиціонування, навіть коли гілки дерева коливаються.

Візуальний модуль, створений за допомогою глибокої нейронної мережі (YOLO v5), аналізує RGB-зображення, отримані з камер, а потім створює список координат стиглих плодів. Планувальник траєкторій використовує дані, щоб визначити ідеальну послідовність дій для кожної руки. Це запобігає колізіям і перекриттям зон дії. Промислова мережа EtherCAT забезпечує комунікацію між модулями.



Рис. 1.3 FFRobotics Field Robot

Крім того, система має модуль самонавчання. Під час кожного циклу дані про силу контакту та результативність захоплення передаються до бази даних для корекції ваг мережі. Таким чином, точність покращується з кожним повтором.

FFRobotics є одним із найкращих маніпуляторів для комерційного землеробства, який успішно використовує сенсорне та інтелектуальне керування для повністю автономного збирання плодів.

1.5. Порівняльна характеристика систем

Таблиці 1.1 та 1.2 містять порівняльні дані, які дозволяють оцінити технічні параметри роботизованих маніпуляторів. Ці дані також показують ефективність систем керування, ступінь адаптивності та придатність до використання в агропромислових комплексах.

Усі розглянуті системи мають різну конструкційну орієнтацію, як показано в таблиці 1.1. Маніпулятори UR5 і Soft-Gripper System є універсальними платформами, які використовуються переважно в лабораторних або дослідницьких умовах. Однак вони можуть бути використані для створення нових рішень у сфері сільськогосподарської автоматизації завдяки своїй відкритості та можливості підключення зовнішніх сенсорів.

Натомість системи FFRobotics і BACCUS мають мобільну платформу, вбудовану навігацію та компоненти автономного пересування, що робить їх ідеально підходящими для використання в реальному світі. Вони демонструють високу автономність і можуть працювати в нерегламентованих середовищах, наприклад на відкритому ґрунті, між рядками рослин чи деревами саду.

Таблиця 1.1 Технічні характеристики сучасних маніпуляторів в аграрній сфері

| Назва | Виробник | Кількість ступенів вільності | Тип платформи | Основне призначення | Сенсорика |
|---------------------|----------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| UR5 | Данія | 6 | Стаціонарна або мобільна | Збір томатів, ягід | RGB-D камера, датчики сили |
| BACCHUS | Іспанія | 6x2 | Мобільна | Збір винограду | RGB-D камери, AI-навігація |
| Field Robot | Ізраїль | 7x3 | Мобільна | Збір яблук, груш, персиків | Камери глибини, сенсори сили |
| Soft-Gripper System | Японія | 6 | Стаціонарна або мобільна | Збір полуниці, помідорів | RGB-D камера, тензорні сенсори |

Таблиця 1.2 містить детальне порівняння основних функціональних критеріїв, які оцінюють ефективність систем керування маніпуляторами. UR5 має високі оцінки за параметрами точності та простоти інтеграції, і він легко налаштовується для різноманітних завдань за допомогою універсальних програмних інтерфейсів, таких як URScript, ROS і MATLAB. FFRobotics і BACCHUS мають найкращу автономність і польову придатність, оскільки вони мають власну систему навігації, координований контроль рухів і сенсорну підтримку прийняття рішень.

Наявність пневматичного захоплювача з регульованим тиском, сенсорів сили та тензометричних елементів дозволила системі Soft-Gripper досягти найвищої оцінки за показником роботи з м'якими об'єктами.

Таблиця 1.2 Порівняльна характеристика аграрних маніпуляторів

| Критерій | UR5 | BACCHUS | Field Robot | Soft-Gripper System |
|----------------------------|------|---------|-------------|---------------------|
| Точність | ++++ | +++ | +++ | ++ |
| Швидкість | ++++ | ++ | +++ | ++ |
| Простота інтеграції | ++++ | ++ | + | +++ |
| Адаптивність | ++ | ++++ | ++++ | ++++ |
| Робота з м'якими об'єктами | ++ | +++ | +++ | ++++ |
| Придатність до АПК | +++ | ++++ | +++++ | ++++ |

З метою забезпечення ефективної взаємодії з природним середовищем і біологічними об'єктами розвиток аграрних маніпуляторів орієнтований на впровадження гнучких механізмів захоплення, сенсорики та штучного інтелекту. Це вказує на перехід від традиційних жорстких промислових рішень до адаптивних інтелектуальних систем, які можуть працювати в реальних умовах агропромислового виробництва та самостійно приймати рішення.

1.6. Системи керування

Загалом виділяють три основні системи керування: систему шасі, систему робочого органа (маніпулятора) та систему керування групою роботів (у випадку, коли кілька роботів працюють узгоджено в межах одного

технологічного процесу).

Класифікація систем керування:

За участю людини:

- керовані вручну;
- автоматизовані (з частковою участю оператора);
- автоматичні (повністю незалежні від людини).

За типом алгоритму повністю автоматичного керування:

- інтелектуальні;
- адаптивні;
- програмні.

За характером руху системи керування:

- безперервної дії (по замкненому контуру);
- позиційні (дискретні, переміщення від позиції до позиції);
- циклічні (дискретні, з повторюваними рухами по кожній координаті).

За типом керованих аргументів у функціях керування:

- позиційні (орієнтація в просторі);
- швидкісні (рух, швидкість);
- силові (зусилля).

Серед зазначених типів найпростішим для реалізації є дискретне керування окремими ступенями вільності, особливо у випадках, коли функції описують лише початкову та кінцеву координати руху.

Далі предметно поговоримо про системи датчиків зусилля та зорову систему роботів.

Система датчиків зусилля. Під час руху захватного механізму важливо, щоб обидві половини клешні залишалися паралельними. Це дозволяє точно визначати дійсні значення прикладених зусиль і крутних моментів.

Залежно від конструкції, датчики, які вимірюють зусилля дотику, можуть бути розміщені безпосередньо на робочих поверхнях захвату або в

його корпусі. На стику між клешнею та кривошипом зазвичай встановлюють датчик, здатний сприймати сили у трьох координатах і відповідні крутні моменти.

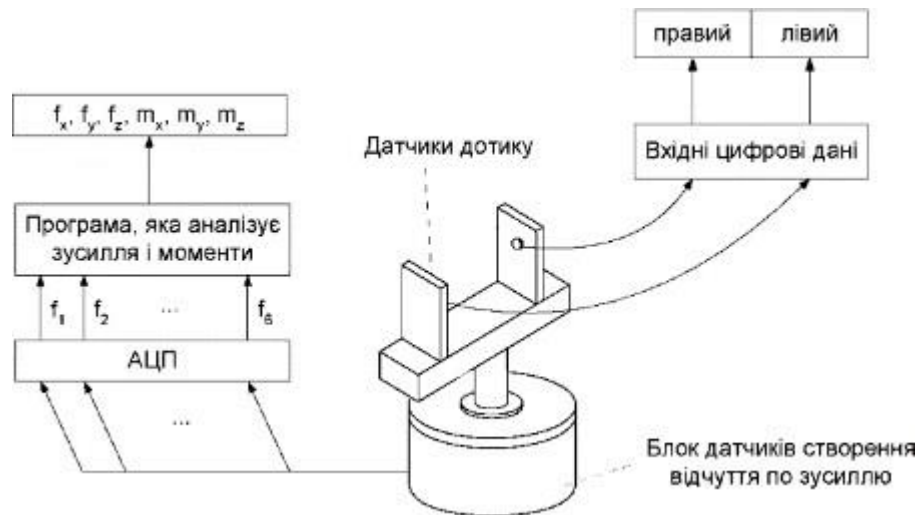


Рис. 1.4 Принцип дії сприйняття зусиль

Система зорових датчиків. Основним елементом цієї системи є камера, що передає зображення у цифровій формі на обчислювальний модуль (рис. 1.5). Отримане зображення квантується та перекодовується у цифровий формат, придатний для подальшої обробки програмними засобами. Таким чином робот «бачить» навколишнє середовище та розпізнає об'єкти.

Методи розпізнавання можуть бути як простими, так і складними. Найпростіші ґрунтуються на аналізі геометричних параметрів об'єкта — довжини, ширини, висоти, площі, кількості отворів, радіуса, кутів, координат тощо. Ці параметри об'єднуються у показники форми тіла. Для складних об'єктів використовують шаблони, з якими порівнюють вхідні дані, і на основі цього приймаються рішення відповідно до закладеного алгоритму.

Суть шаблонного підходу полягає в нормалізації зображення за розмірами, узгодженні центру ваги та напрямів головних осей симетрії. При цьому вісь інерції має бути розташована перпендикулярно до головної

площини аналізу.

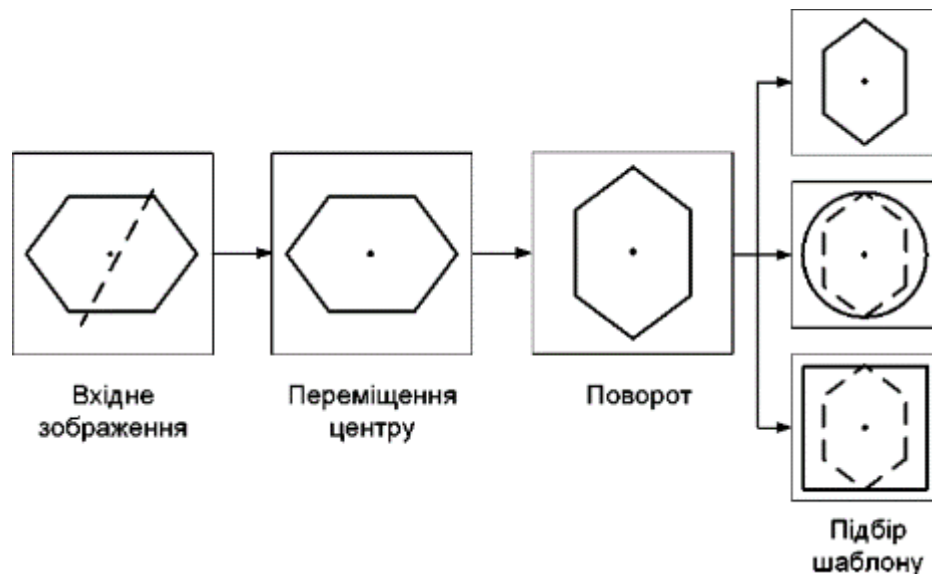


Рис. 1.5 Процес підбору шаблону по вихідному зображенню

Адаптивне керування роботом використовується в місцях, де навколишнє середовище робота постійно змінюється через технологічні процеси або випадкові збурюючі фактори. Це відрізняється від попереднього методу керування роботом, коли програмісти вже знають все про навколишнє середовище та стан роботи.

У роботів такого типу особливо важливо забезпечити злагоджену роботу системи приймання вхідних даних, їхньої обробки та подальшого ухвалення рішень у нестандартних, непередбачених ситуаціях. Це ускладнює процес програмування, однак робить робота більш універсальним і функціональним, оскільки розширюється діапазон умов, у яких він здатний ефективно працювати.

Основні варіації реалізації адаптивного керування:

- керування, що здійснюється виключно на основі поточної інформації з датчиків, без використання заздалегідь визначених шаблонів;
- перебудова одного або кількох алгоритмів роботи під час зміни параметрів або структури навколишнього середовища;
- перемикання між заздалегідь підготовленими алгоритмами для різних

типів систем технічного зору;

- використання адаптивного керування як допоміжної підсистеми для уточнення або коригування дій у межах шаблонного керування.

Підсумовуючи наведене вище, можна зазначити, що приводи механізму можуть керуватися як за допомогою програмного керування, так і шляхом безпосереднього впливу на них, або ж через поєднання обох підходів одночасно.

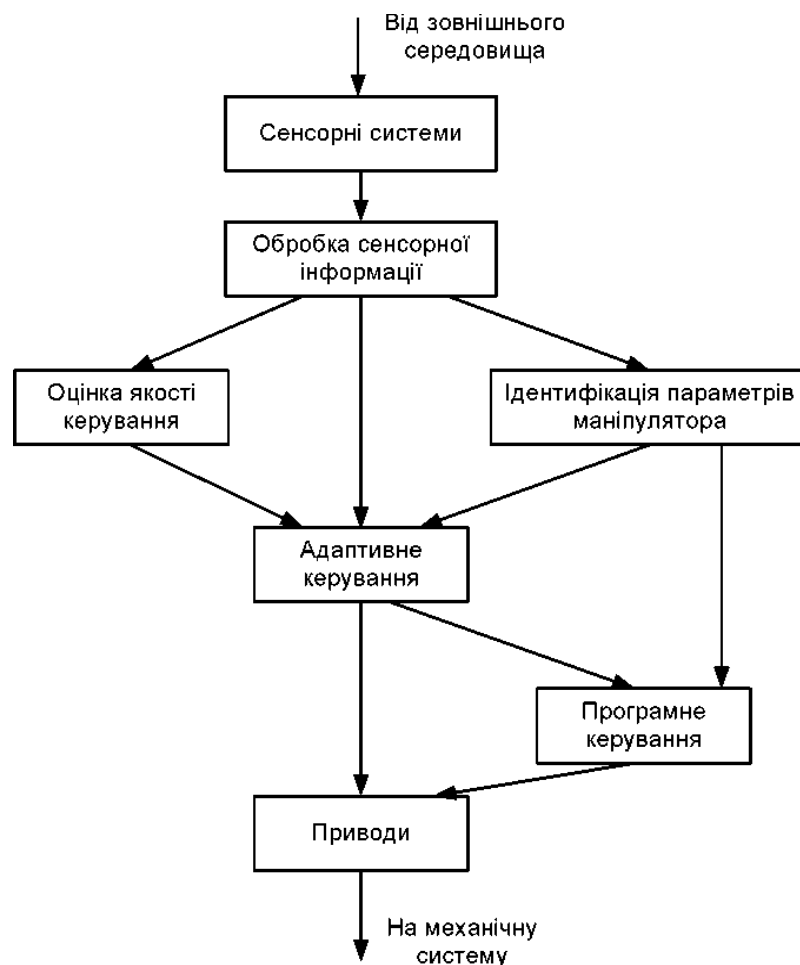


Рис. 1.6 Схема керування робочим органом робота

У випадку одночасного використання адаптивного та програмного керування, адаптивна система виконує низку важливих функцій. Вона забезпечує оцінку якості роботи маніпулятора, коригуючи його дії для зменшення похибки, підвищення точності позиціонування та підтримання стабільного режиму роботи. Крім того, адаптивне керування здійснює контроль відхилень фактичної траєкторії або дій від запрограмованої, а також

визначає стан навколишнього середовища та просторове положення робочого органу відносно об'єктів, із якими він взаємодіє, або силу, з якою захват діє на предмет.

Особливо важливою є функція керування, що змінюється залежно від прикладеного навантаження. Її особливість полягає в тому, що у процесі роботи робот використовує комплекс логічних алгоритмів, поєднаних із командами, які формують рух маніпулятора. Для реалізації цих функцій система оснащується спеціальними оптичними датчиками, розташованими безпосередньо на маніпуляторі. Вони сканують робочу зону на наявність цільових об'єктів, а між захватними елементами встановлюється датчик присутності предмета. У такий спосіб навколишнє середовище піддається скануванню, а захват позиціонується таким чином, щоб кінці “пальців” розташовувалися ортогонально до зони роботи. Коли об'єкт виявлено, робочий орган займає положення, при якому відстань від центра об'єкта до площин захвату є рівною. Якщо фотоелектричний датчик фіксує перекриття променя, на мікросхему надходить сигнал про наявність об'єкта в зоні дії. У разі помилки або відсутності предмета операція повторюється автоматично.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНІЧНІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРОМ

2.1 Функціональні вимоги до системи керування

Для збирання продукції агропромислового комплексу (АПК) система керування маніпулятором повинна автоматично виконувати технологічні процедури, пов'язані з виявленням, позиціонуванням, захопленням і переміщенням плодів у робочій зоні. Основною метою розробки є створення інтелектуальної системи керування, яка може підтримувати високу точність і стабільність руху робочого органу, одночасно адаптуючись до змін умов середовища та навантаження.

Функціональність системи керування включає збір, обробку та аналіз даних від сенсорних елементів; створення керуючих сигналів для виконавчих механізмів; і забезпечення постійного зворотного зв'язку між кожною частиною системи. Керування має виконуватися в реальному часі з мінімальною затримкою реакції та з точним позиціонуванням маніпулятора.

Динамічні впливи, які виникають під час руху ланок, такі як коріолісові, гравітаційні та відцентрові моменти, повинні бути компенсовані системою. Це запобігає коливанням і перевищенням під час відпрацювання команд, знижує похибку позиціонування та гарантує плавний рух навіть у разі зміни маси або положення об'єкта захоплення. Керування має бути адаптивним, що означає, що система може змінювати свої параметри регулювання відповідно до поточного навантаження, властивостей об'єкта чи умов роботи. Такий метод дозволяє підтримувати оптимальну точність і швидкодію, незважаючи на зміни в робочому середовищі або робочих процесах.

Важливою функціональною вимогою є контроль сили взаємодії між робочим органом маніпулятора та об'єктом. Система повинна регулювати зусилля захоплення відповідно до фізичних властивостей продукції, запобігаючи її пошкодженню. У разі перевищення допустимих навантажень

система має переходити в безпечний режим або зупиняти рух до стабілізації стану.

Система керування повинна підтримувати кілька режимів роботи:

- автоматичний – виконання повного циклу дій згідно з алгоритмом без участі оператора;
- ручний – можливість керування окремими ланками або ефектором для налагодження, тестування чи навчання;
- аварійний – автоматичне відключення або блокування приводу у випадку відмови сенсорів, перевантаження чи втрати зв'язку.

Для забезпечення стабільності роботи, система повинна фільтрувати вхідні сигнали, проводити самодіагностику, знаходити помилки вимірювання та повідомляти оператора про критичні стани. Крім того, передбачається можливість записувати основні параметри та події роботи системи для аналізу.

Функціональні вимоги визначають логіку роботи системи керування маніпулятором і служать основою для розроблення технічних вимог до окремих її компонентів, вибору сенсорів, виконавчих механізмів і контролера, які будуть розглянуті в наступних підрозділах. Крім того, вони служать основою для подальшого створення математичної моделі та вдосконалення алгоритмів керування.

2.2 Технічні вимоги до елементів системи

Технічні вимоги до елементів системи керування маніпулятором для збирання продукції агропромислового комплексу визначаються на основі аналізу умов експлуатації, особливостей робочого середовища, динамічних навантажень і функціональних характеристик, необхідних для правильного виконання завдань. Вони визначають основні параметри, яким повинні відповідати окремі частини системи, такі як сенсорна підсистема, контролер, виконавчі механізми, джерело живлення та комунікаційна інфраструктура,

щоб гарантувати, що система керування працює правильно, стабільно та безпечно.

Система керування маніпулятором повинна працювати в режимі реального часу з затримкою обміну даними між сенсорами, контролером і виконавчими елементами не більше 50–100 мілісекунд. Це дозволяє швидко реагувати на зміни навколишнього середовища та місця роботи. Частота оновлення сигналів зворотного зв'язку повинна становити не менше 10–20 герц, щоб гарантувати точність позиціонування та стабільність. Параметри електричної системи, рівні напруги сигналів та інтерфейси зв'язку повинні бути узгоджені з кожним компонентом системи. Система повинна бути захищена від електричних перешкод, вібрацій і короткочасних відхилень напруги живлення, які є типовими для умов сільськогосподарського виробництва.

Точність позиціонування маніпулятора має бути не гірша ± 1 міліметра, а похибка визначення кутового положення окремих ланок не повинна перевищувати $0,5^\circ$. Під час переміщення ефектора система повинна забезпечувати плавність рухів без ривків та коливань, навіть у разі зміни навантаження чи збурень від навколишнього середовища. Ці вимоги визначають мінімально допустимі значення для швидкодії контролера, роздільної здатності сенсорів і точності роботи приводів.

Сенсорна підсистема повинна бути здатною вимірювати положення, швидкість, прискорення, навантаження та інші параметри динаміки руху з похибкою не більше 1–2%. У результаті фільтрації та цифрової обробки сигнали повинні мати достатню стабільність, відсутність спотворень і шумів. Щоб гарантувати достатнє відтворення швидкоплинних змін положення маніпулятора, частота оновлення вимірювань не може бути нижчою 50 герц. Сенсорні елементи повинні бути захищені від температури, вологості та пилу, які виникають у тепличних і садових умовах, де передбачається робота маніпулятора. Захист корпусу сенсорів повинен перевищувати IP 54, а температурний діапазон для роботи повинен становити від +5 до +45 градусів

Цельсія при відносній вологості до 80 %. Надійність вимірювальної системи гарантується резервуванням важливих каналів, наявністю вбудованих процедур самодіагностики та повідомленням у разі втрати або неправильної обробки даних.

Виконавчі механізми, які забезпечують переміщення ланок і робочого органу маніпулятора, повинні відповідати вимогам потужності, моменту та плавності роботи. Щоб повний цикл захоплення та переміщення плодів тривав менше десяти секунд, їхні динамічні властивості повинні забезпечити необхідну швидкість руху та прискорення. Щоб досягти цього, система керування повинна забезпечити плавне прискорення та гальмування без вібрацій і ривків, оскільки ці фактори можуть підвищити навантаження на механічну частину. Вихідний момент кожного приводу повинен перевищувати робоче навантаження на 30%. Це створює запас потужності, щоб компенсувати інерційні ефекти та непередбачувані зміни маси об'єкта. Діапазон напруги живлення виконавчих механізмів має становити 5–24 вольти, струм споживання — не перевищувати 2–5 ампер залежно від типу двигуна. Виконавчі пристрої повинні бути оснащені системою контролю температури, а також мати захист від короткого замикання, перевантаження й втрати сигналу керування. Наявність зворотного зв'язку за положенням або струмом є обов'язковою умовою для реалізації адаптивного регулювання й компенсації динамічних впливів.

Контролер системи керування виконує функції збору даних, обробки сигналів і формування керуючих дій для приводів. Таким чином, щоб виконувати алгоритми адаптивного керування у режимі реального часу, він повинен мати достатню обчислювальну потужність. Його продуктивність повинна бути достатньою для аналізу даних сенсорів із частотою не нижче 10 герц і для синхронної роботи всіх каналів. Контролер повинен мати не менше шести аналогових і восьми цифрових входів/виходів. Крім того, він повинен підтримувати стандартні комунікаційні інтерфейси, такі як UART, SPI, CAN або подібні до них, щоб зв'язуватися з сенсорами та виконавчими

механізмами. Конструкція повинна забезпечити можливість спостереження, налаштування та аналізу процесу керування за допомогою зовнішнього комп'ютера або одноплатного модуля. Напруга контролера має становити 5–12 вольт, а споживана потужність у режимі очікування не повинна перевищувати 5 ват. При цьому система має бути енергоефективною, із можливістю переведення у режим пониженої активності за відсутності керуючих команд.

Джерело живлення системи повинно забезпечувати стабілізовану постійну напругу із допустимими відхиленнями не більше $\pm 5\%$, а також мати багаторівневий захист від коротких замикань, перенапруги, перегріву та зворотної полярності. Живлення різних модулів - сенсорних, обчислювальних і силових — має бути розділене або ізольоване для уникнення взаємного впливу. Наявність стабілізаторів напруги й фільтрів живлення є обов'язковою умовою стабільної роботи контролера та сенсорів. У системі комунікації має застосовуватися шина даних, що забезпечує швидкість обміну не нижчу за 1 мегабіт на секунду. Передавання інформації між модулями повинно здійснюватися із контролем цілісності пакетів, що виключає появу помилкових команд і втрату даних у процесі керування. Для уникнення взаємних електричних перешкод слід передбачити екранування сигнальних ліній та розділення контурів заземлення.

Технічні вимоги до системи також охоплюють критерії надійності, безпеки та експлуатаційної довговічності. Усі елементи системи мають витримувати тривалу роботу без деградації параметрів. Середній напрацювання на відмову повинен становити не менше 10 000 циклів безперервного функціонування. Конструкція системи має забезпечувати можливість безпечного зупинення маніпулятора при виникненні будь-яких відмов або аномалій — перевищення струму, втрати зв'язку із сенсорами, збоїв програмного забезпечення. У таких випадках контролер повинен ініціювати аварійне відключення живлення виконавчих механізмів і перевести систему у стабільний стан очікування.

Система повинна підтримувати температурний режим роботи від +5 до +40 °С, відносну вологість до 80 % та витримувати незначні механічні вібрації. Конструкція корпусів та з'єднань повинна забезпечувати захист електронних компонентів від пилу, вологи та випадкового контакту з рідинами. З метою безпеки передбачаються механічні стопи або електронні обмежувачі ходу, що запобігають виходу ланок маніпулятора за межі допустимого робочого простору. Усі кабелі живлення та сигналів повинні мати подвійне ізолювання й надійне кріплення у місцях з'єднання.

Високі вимоги висуваються до стабільності системи під час дії динамічних навантажень. При різкій зміні маси або положення об'єкта керування система повинна автоматично компенсувати додаткові інерційні моменти та зберігати задані траєкторії руху. Внутрішні регулятори мають гарантувати відсутність коливань і перерегулювань більш як 5 %. Задля підвищення точності передбачено використання алгоритмів фільтрації й прогнозування параметрів, які дозволяють зменшити вплив випадкових збурень.

До програмно-технічних вимог належить сумісність контролера з середовищем моделювання та налагодження, можливість оновлення мікропрограмного забезпечення, а також захист від несанкціонованого доступу. Програмне забезпечення має підтримувати збереження даних про параметри руху, зусилля, відхилення, спрацювання захистів та аварійні ситуації у вигляді журналу подій для подальшого аналізу й удосконалення алгоритмів керування.

Енергоефективність системи. При збереженні необхідної швидкодії усі частини повинні споживати найменшу кількість електроенергії. Зменшення тепловиділення та продовження терміну служби елементів можна досягти за допомогою використання імпульсних стабілізаторів, енергозберігаючих режимів контролера та автоматичного відключення другорядних модулів під час простою.

Створення надійної, ефективної та безпечної системи керування

маніпулятором вимагає дотримання цих технічних вимог. Вони забезпечують узгоджену роботу сенсорних елементів, контролера та виконавчих механізмів, сприяють стабільності та точності позиціонування робочого органу та гарантують безпечне функціонування всієї установки в умовах агропромислового виробництва. Виконання цих вимог створює основу для подальшої розробки алгоритмів керування та практичної реалізації маніпулятора. Крім того, це дозволяє досягти оптимального балансу між точністю, швидкістю та енергоефективністю системи.

2.3 Сенсори, виконавчі механізми і контролер

Вибір елементів системи керування маніпулятором для збирання продукції агропромислового комплексу здійснювався відповідно до визначених функціональних і технічних вимог, що забезпечують необхідну точність, надійність і стабільність роботи. При розробленні системи враховано узгодження сенсорів, контролера та виконавчих механізмів для реалізації адаптивного керування рухом маніпулятора та безпечного захоплення продукції без її пошкодження.

Сенсорна підсистема є важливою для формування зворотного зв'язку та аналізу параметрів роботи маніпулятора. До її складу входять кілька датчиків різного типу, що виконують взаємодоповнюючі функції.

Для визначення кутових положень обрано магнітні енкодери AS5600(рис. 2.1), які забезпечують безконтактне вимірювання повороту вала з точністю до $0,05^\circ$. Датчик підтримує інтерфейс I²C і має вбудовану систему цифрової фільтрації сигналів, що дозволяє отримувати стабільні дані навіть при наявності електромагнітних збурень. Його компактність і низьке енергоспоживання роблять його зручним для використання в рухомих ланках маніпулятора, а робочий діапазон температур від -25 до $+125$ °C дозволяє застосовувати прилад в аграрних умовах.

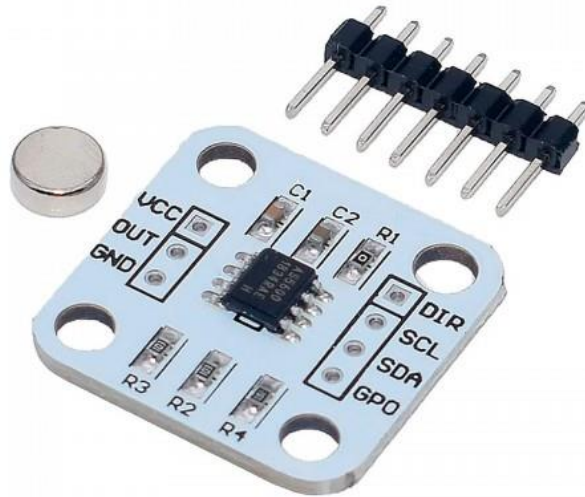


Рис. 2.1 Магнітний енкодер AS5600

Для оцінки лінійних і кутових прискорень використовується інерційний модуль MPU-6050 (рис. 2.2), що поєднує триосьовий акселерометр і гіроскоп. Він забезпечує вимірювання динамічних характеристик руху маніпулятора з частотою до 1 кГц та дозволяє реалізувати алгоритми стабілізації й компенсації інерційних впливів. Інтерфейс I²C забезпечує просте з'єднання з контролером, а вбудовані фільтри низьких частот усувають шумові складові сигналу. MPU-6050 застосовується для забезпечення плавності руху та контролю орієнтації маніпулятора під час роботи.

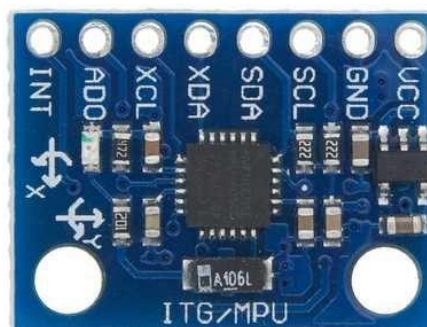


Рис. 2.2 Інерційний модуль MPU-6050

Для контролю навантаження на виконавчі механізми встановлено датчики струму ACS712 (рис. 2.3), що дозволяють непрямо визначати прикладену силу або момент під час захоплення об'єкта. Прилад забезпечує лінійне перетворення струму у напругу в діапазоні до ± 30 А та працює на основі ефекту Холла. Отримані дані використовуються для захисту приводів від перевантаження й для регулювання сили захоплення ефектора в режимі зворотного зв'язку. Перевагою є висока чутливість та електрична ізоляція між силовою та сигнальною частинами.

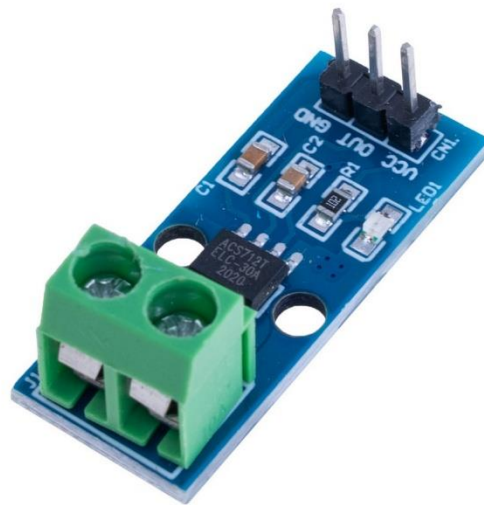


Рис. 2.3 Датчик струму ACS712

Для визначення положення цільових об'єктів у просторі та побудови глибинної карти робочої зони використовується камера Intel RealSense D435i (рис 2.4). Вона має два інфрачервоних сенсори та RGB-модуль, завдяки чому може формувати 3D-зображення з точністю до ± 2 мм на дистанції до 2 метрів. Інтегрований інерційний блок дає можливість коригувати дані при русі маніпулятора, а висока швидкість оновлення кадрів (до 90 fps) забезпечує роботу в режимі реального часу. Цей сенсор дозволяє точно виявляти плоди, оцінювати їхні координати та формувати вхідні дані для керуючої системи.



Рис. 2.4 Датчик струму ACS712

Усі згадані сенсори підключаються до центрального контролера, яким є Arduino Mega 2560 (рис. 2.5). Цей контролер забезпечує збір даних від усіх сенсорних модулів, попередню обробку сигналів і передавання керуючих команд до виконавчих механізмів. Він побудований на мікроконтролері ATmega2560 із тактовою частотою 16 МГц, має 54 цифрові входи-виходи (з яких 15 можуть використовуватися як ШІМ-канали) та 16 аналогових входів. Наявність інтерфейсів UART, SPI та I²C дозволяє підключати декілька сенсорів одночасно, а вбудований USB-порт — налагоджувати та тестувати систему через комп'ютер. Контролер має достатній обсяг пам'яті (256 КБ Flash, 8 КБ SRAM, 4 КБ EEPROM) для зберігання керуючого алгоритму й роботи в режимі реального часу. Його перевагами є надійність, доступність та сумісність з великою кількістю електронних модулів.

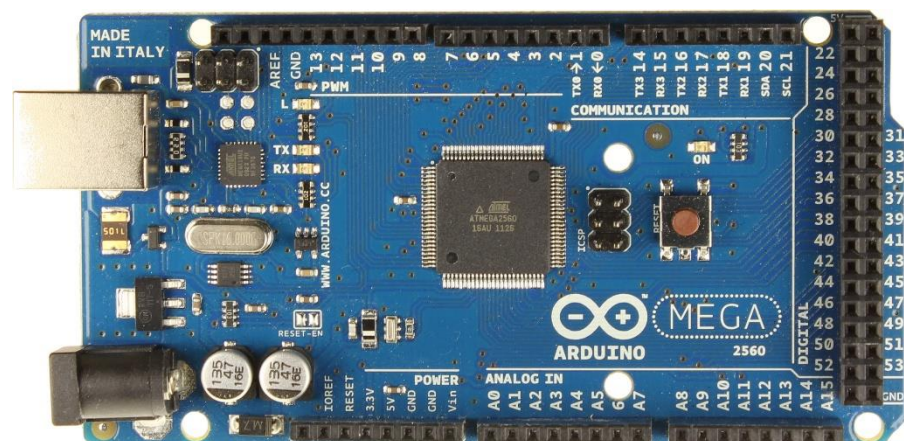


Рис. 2.5 Центральний контролер Arduino Mega 2560

У якості виконавчих механізмів застосовано серводвигуни з вбудованими системами зворотного зв'язку. Вони дозволяють керувати кутом повороту з точністю до 1° , підтримують роботу в позиційному та швидкісному режимах і забезпечують достатній момент для переміщення робочого органу. Завдяки високому ККД і низькому моменту інерції серводвигуни забезпечують плавний рух без перерегулювань. Керування здійснюється імпульсними сигналами ШІМ, а зворотний зв'язок реалізується через вбудовані потенціометри та струмові датчики. Діапазон напруги живлення для даних приводів становить 5–12 В, а споживаний струм — до 2 А на один мотор, що відповідає вимогам енергоефективності та допустимого навантаження контролера.

Кінцевий ефектор обладнано окремим мініатюрним електромеханічним приводом, який регулює силу стискання залежно від параметрів об'єкта. Привід працює у замкненому циклі із зворотним зв'язком за струмом, що дозволяє коригувати сигнал керування в режимі реального часу. Для підвищення надійності використано додаткові механічні обмежувачі ходу та електронний захист від перевантаження.

Живлення усіх елементів здійснюється від стабілізованого джерела 12 В із системою розподілу потужності на сигнальні та силові ланцюги. Для сенсорів і контролера використовується окрема лінія 5 В із фільтрами та стабілізаторами напруги. Комунікаційна структура побудована на шині I²C для взаємодії з датчиками та UART для зв'язку між контролером і зовнішнім обчислювальним модулем. Така схема забезпечує високу надійність обміну даними та мінімальні затримки під час роботи.

Комплекс вибраних компонентів — контролер Arduino Mega 2560, енкодери AS5600, інерційний модуль MPU-6050, датчики струму ACS712, глибинна камера Intel RealSense D435i та серводвигуни виконавчої системи — утворюють узгоджену апаратну структуру системи керування. Вони забезпечують отримання повної інформації про стан маніпулятора, точне виконання керуючих дій та можливість адаптивного регулювання під час

роботи в реальних умовах агропромислового виробництва. Реалізація такої архітектури є оптимальним рішенням з погляду співвідношення між функціональністю, вартістю та енергоефективністю.

2.4 Програмне та комп'ютерне середовище розробки

Програмна складова системи керування є основним компонентом, який забезпечує взаємодію між сенсорними, обчислювальними та виконавчими компонентами маніпулятора. Вона обробляє дані, створює керуючі сигнали, виконує алгоритми адаптивного регулювання та контролює стан системи. Створення цієї частини передбачало використання різноманітних сучасних програмних засобів, які дозволяють поєднати етапи проектування, симуляції та програмування в єдиному технологічному циклі.

Розроблення тривимірної моделі маніпулятора виконано у середовищі CAD-системи SolidWorks, яка забезпечує побудову просторової конструкції з урахуванням кінематичних зв'язків між ланками. Створена 3D-модель дозволяє візуально оцінити конфігурацію механізму, положення з'єднань, кути обертання та робочий простір маніпулятора. За допомогою SolidWorks проведено аналіз взаємного розташування компонентів, визначено можливі перешкоди між елементами під час руху, а також оптимізовано геометрію ланок для забезпечення плавності роботи. Тривимірна модель використовується як основа для побудови математичних залежностей і перевірки кінематичних характеристик системи, що дозволяє узгодити конструктивну й алгоритмічну частини проєкту.

Для розроблення програмного забезпечення, яке реалізує алгоритм керування, використано середовище Arduino IDE. Воно призначене для створення, компіляції та завантаження програмного коду в контролер Arduino Mega 2560, який є центральним обчислювальним елементом системи. Код написано мовою C++, що забезпечує високу швидкодію та простоту реалізації алгоритмічних структур. Програмна реалізація складається з послідовності

модулів, які виконують основні функції: опитування сенсорів, фільтрацію даних, обчислення похибки між заданими та поточними параметрами, формування сигналів керування для виконавчих механізмів та моніторинг стану системи.

Логіка програми побудована за циклічним принципом, що дозволяє системі працювати у режимі реального часу. Спочатку контролер зчитує дані з сенсорів AS5600, MPU-6050 і ACS712, перетворює їх у цифрову форму та зберігає у змінних. Після цього обчислюється відхилення положення або навантаження від еталонних значень. Далі виконується блок керування, який формує керуючі впливи для серводвигунів, а результати передаються через PWM-сигнали на відповідні канали виконавчих механізмів. Паралельно відбувається перевірка перевищення допустимих параметрів струму чи кута, і при потребі активується захисний механізм, що обмежує або зупиняє рух. Такий підхід забезпечує стабільність і безпеку роботи системи навіть у разі зміни навантаження чи зовнішніх збурень.

Важливою особливістю реалізації є використання модульної структури коду, яка розділяє програму на логічно незалежні частини: блок ініціалізації сенсорів, блок опитування, обчислювальний блок, модуль керування приводами та блок захисту. Це спрощує налагодження, дозволяє змінювати параметри алгоритму без порушення загальної структури й відкриває можливість подальшого розширення системи. У коді передбачено функції для калібрування датчиків, усереднення показників і фільтрації шумів, що підвищує точність отриманих даних. Програма також містить базові процедури самодіагностики, які дають змогу виявляти несправності сенсорів або виконавчих механізмів.

У процесі відлагодження використовувалася серійна передача даних через порт UART, завдяки чому можна відстежувати змінні параметри під час роботи програми. Це забезпечує можливість моніторингу та корекції алгоритму без фізичного втручання в систему. Окрім цього, структура коду дозволяє в майбутньому додати підтримку бездротового зв'язку або

підключення до зовнішнього комп'ютера для візуалізації даних і графічного аналізу.

Для побудови геометричних моделей і перевірки траєкторій руху ефектора використано SolidWorks, що взаємопов'язана з параметрами сенсорів і приводів. Така інтеграція забезпечує візуальну відповідність між механічною й програмною частинами системи, дозволяє перевірити працездатність розроблених алгоритмів на рівні віртуального експерименту та виявити потенційні конфлікти руху. У межах роботи SolidWorks виконує функцію віртуального прототипу, який відображає взаємодію всіх складових системи.

Для обробки даних і графічного аналізу результатів може бути використане середовище MATLAB, яке є одним із найефективніших інструментів для моделювання динамічних систем. У цьому середовищі можливе створення моделей окремих ланок маніпулятора, побудова структурних схем керування, перевірка стійкості регулятора та візуалізація отриманих характеристик. У межах цієї роботи математичне моделювання не виконувалося, однак структура системи передбачає можливість інтеграції програмного коду контролера з MATLAB для подальшої перевірки ефективності алгоритму або реалізації режиму Hardware-in-the-Loop. Такий підхід дозволяє розширити дослідницькі можливості системи без необхідності створення фізичного макета.

Поєднання CAD-системи SolidWorks і середовища Arduino IDE забезпечує комплексне програмно-комп'ютерне середовище розробки, яке охоплює всі етапи — від створення віртуальної моделі до реалізації алгоритмів керування. CAD-система використовується для геометричного та кінематичного аналізу конструкції, а Arduino IDE — для програмної реалізації логіки роботи системи. Це дає змогу перевіряти коректність взаємодії між елементами, моделювати поведінку маніпулятора й оцінювати ефективність алгоритмів у віртуальному середовищі.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАНІПУЛЯТОРА

3.1 Функціональні вимоги до системи керування

Завданням даної роботи є вдосконалення системи керування маніпулятором для збирання продукції АПК. Ефективність функціонування будь-якої сучасної системи керування нерозривно пов'язана з наявністю адекватної математичної моделі об'єкта керування.

Класичні підходи до керування, зокрема використання лінійних ПД-регуляторів для кожного ступеня вільності, розглядають маніпулятор як сукупність незалежних об'єктів або як систему з частково невизначеною динамікою. Такі підходи не враховують складні нелінійні та взаємозв'язані динамічні ефекти:

- Залежність матриці інерції від конфігурації (положення ланок) маніпулятора.
- Виникнення значних коріолісових та відцентрових сил при русі на високих швидкостях.
- Вплив гравітаційних моментів, що нелінійно змінюються залежно від положення ланок.
- Різка зміна динамічних параметрів системи (зокрема, маси та інерції останньої ланки) в момент захоплення плоду.

Ігнорування цих факторів призводить до зниження точності відстеження траєкторії, виникнення значних динамічних помилок та коливань, особливо у швидкісних режимах роботи.

Тому, для синтезу високоефективного алгоритму керування, який би нівелював зазначені недоліки, в даному розділі проводиться повний цикл розробки математичного двійника маніпулятора. Процес включає побудову тривимірної моделі, її аналіз методом скінченних елементів (МСЕ) для отримання масо-інерційних характеристик. Отримана модель стане

детермінованим фундаментом для синтезу вдосконаленого алгоритму керування на основі моделі (Model-Based Control).

3.2. Тривимірне моделювання та аналіз міцності

Першим етапом дослідження є створення точної 3D-моделі маніпулятора в CAD-системі SolidWorks. На даному етапі є не лише розробка конструкції, але й отримання верифікованих геометричних та масо-інерційних характеристик (мас, положень центрів мас, тензорів інерції) кожної рухомої ланки, які є вхідними даними для динамічного аналізу.

Проектування розпочато з нульової ланки (рис. 3.1) та поворотної платформи (рис. 3.2).

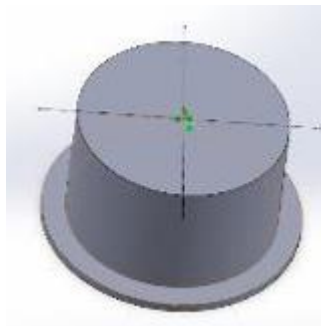


Рисунок 3.1 – Моделювання стійки маніпулятора

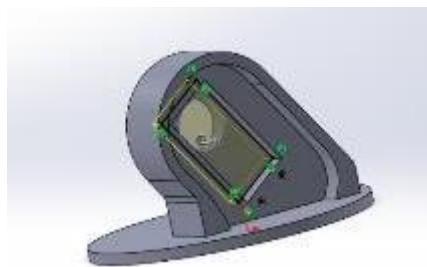


Рисунок 3.2 – Моделювання поворотної платформи

Далі було послідовно спроектовано ключові ланки маніпулятора, що формують його кінематичний ланцюг: плече (рис. 3.3) та передпліччя (рис.3.4).

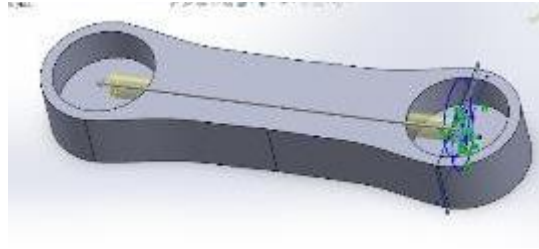


Рисунок 3.3 – Моделювання коромисла

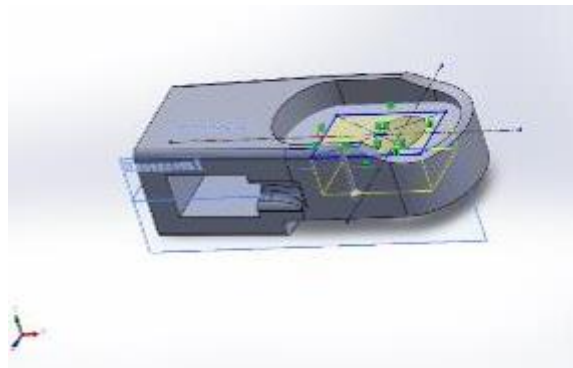


Рисунок 3.4 – Моделювання перехідної ланки маніпулятора

Проведено проектування зап'ястного суглоба (рис. 3.5) з трьома ступенями вільності (3-DOF), який забезпечує необхідну орієнтацію захватного пристрою в просторі.

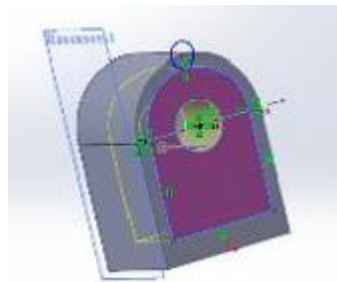


Рисунок 3.5 – Зап'ястна ланка маніпулятора

Також розроблено та змодельовано вал (рис. 3.6), який буде обертатися в корпусі.

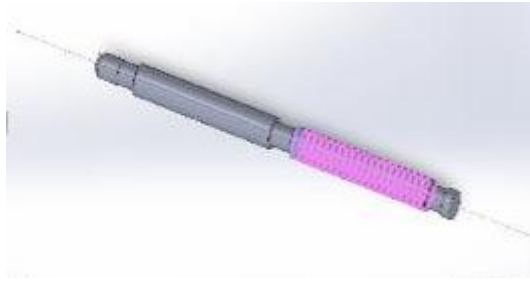


Рисунок 3.6 – Вал маніпулятора

Завершальним етапом моделювання конструкції стало проєктування спеціалізованого захватного пристрою (рис. 3.7), а саме кронштейну з ефектором.

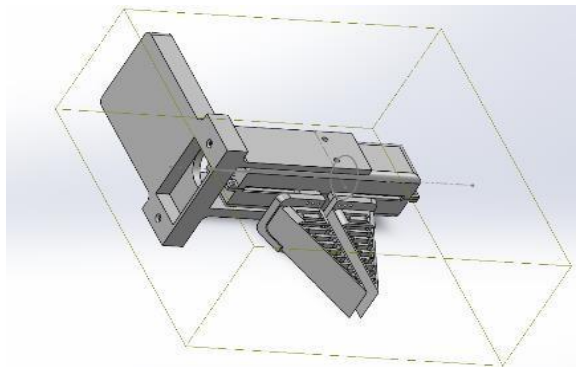


Рисунок 3.7 – Кронштейн та захватний елемент

Загальний вигляд розробленого 6-осьового (6-DOF) маніпулятора представлено на рисунку 3.8.

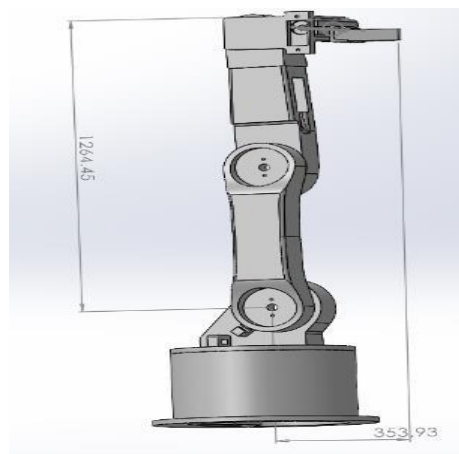


Рисунок 3.8 – Загальний вигляд 3D-моделі маніпулятора

Змодельований у вигляді 3D-моделі маніпулятор має різні положення(рис. 3.9)

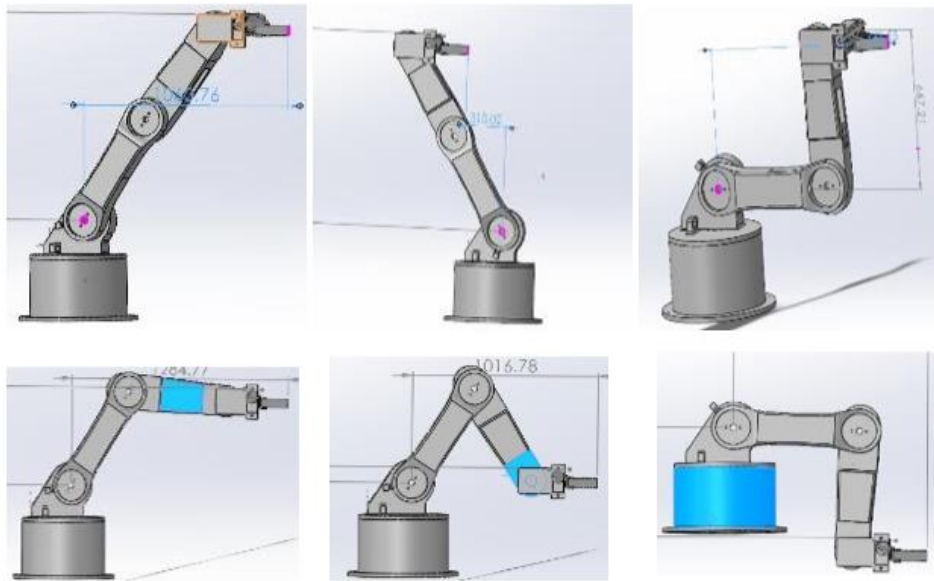


Рисунок 3.9 Положення маніпулятора

3.2 Силевий розрахунок ланок робота-маніпулятора

Силевий розрахунок потрібен для перевірки надійності та міцності конструкції механізму маніпулятора. Розрахунок проводиться послідовно, від основи (стійки) до захватного пристрою, для забезпечення надійності кожного вузла.

Розрахунки базуються на максимальному експлуатаційному навантаженні (вага вантажу, наприклад яблука, 0.5 кг, що відповідає 5 Н) та власній вазі ланок. Ланки виготовлені з пластику ABS. Маса ключових компонентів були визначені на основі їх об'єму та густини матеріалу:

- Коромисло: $m = 10.4$ кг (104 Н) (Рис. 10).
- Перехідна ланка та "зап'ястя": $m = 8.9$ кг (89 Н) (Рис. 3.11).
- Кронштейн та лапа: $m = 2.53$ кг (25.3 Н) (Рис. 3.7).

Загальне сумарне навантаження від ваги ланок та вантажу становить 223,3 Н.

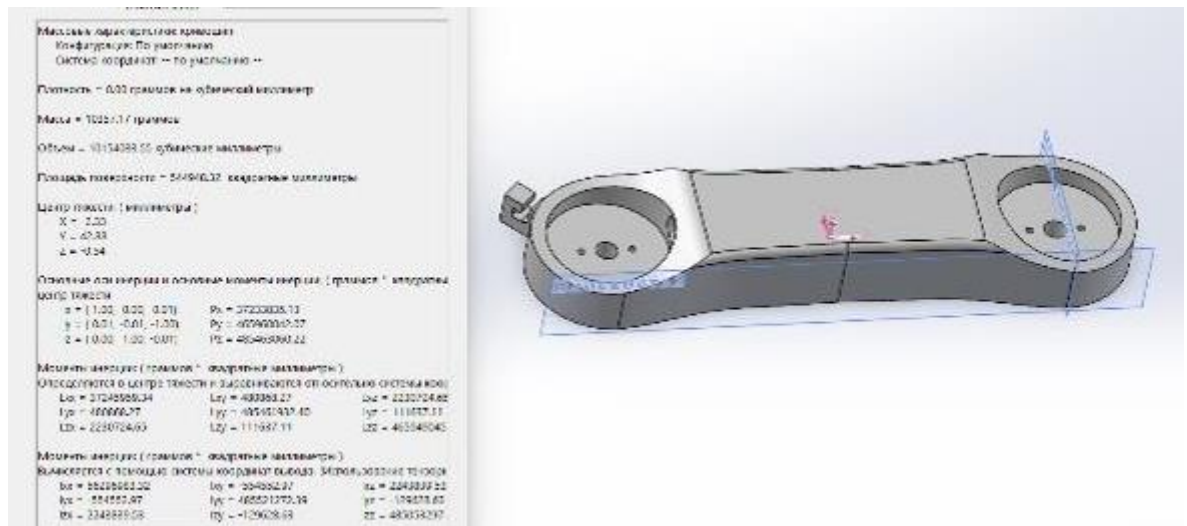


Рисунок 3.10 Характеристика коромисла

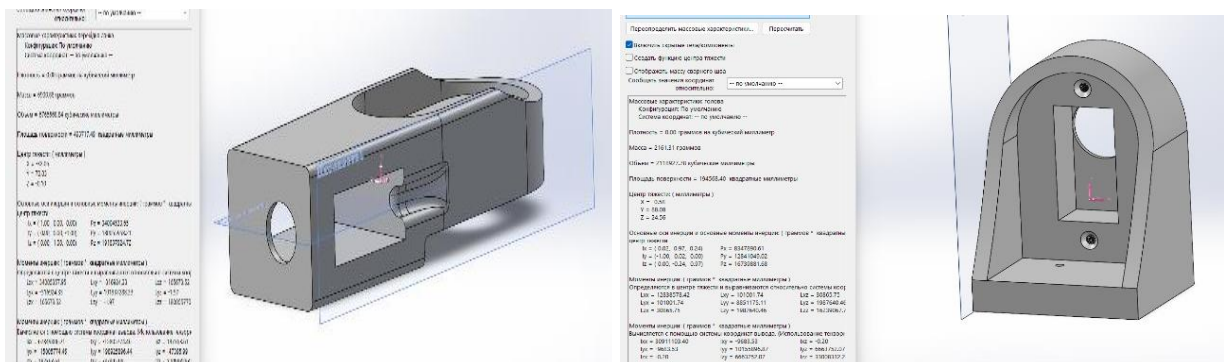


Рисунок 3.11 Характеристика перехідної ланки та зап'ястя

Проведені перевірки на розтяг, стиск, згин і крутіння підтвердили відповідність елементів вимогам міцності — отримані напруження не перевищують допустимих значень 15–70 МПа залежно від типу навантаження.

Додатково перевірено прогин платформи, який становить лише 0,0007 мм, що свідчить про високу жорсткість конструкції та відсутність ексцентриситету під час роботи. Це забезпечує стабільність положення робочого органу й мінімізацію похибки під час позиціонування, що є критичним для системи керування.

Кінематичний аналіз (рис. 3.12) показав, що маніпулятор має достатній робочий діапазон для виконання операцій зі збирання плодів різних розмірів. Робочу зону визначено методом крайніх точок із урахуванням обертання

платформи на 180° та дії “зап’ястного суглоба”, який додає ще один ступінь вільності. Завдяки цьому маніпулятор може працювати в умовах обмеженого простору теплиці, зберігаючи горизонтальне положення захвату завдяки відслідковуючому механізму, який формує сигнали для серводвигуна, що підтримує паралельність між стійкою та захватом.

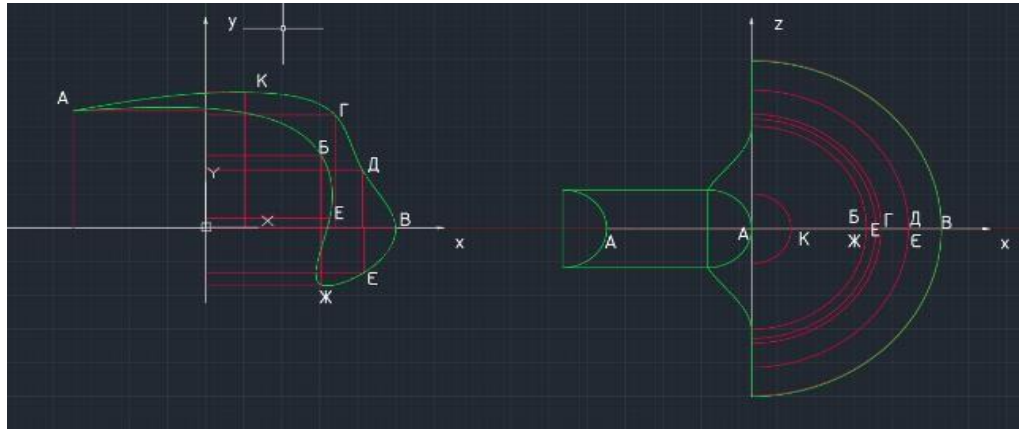


Рисунок 3.12 Схема робочої області маніпулятора

Отримані результати силового й кінематичного аналізів стали основою для вибору оптимальних параметрів системи керування. Відомі значення моментів інерції, мас ланок та навантажень дозволяють коректно підібрати параметри регуляторів типу PID або адаптивних систем, які компенсують інерційні та динамічні збурення під час роботи. Це сприяє зменшенню перерегулювання, підвищенню точності позиціонування та стабільності руху робочого органу.

Таким чином, аналіз силової структури підтвердив, що механічна частина маніпулятора має достатню жорсткість і надійність. Урахування динамічних характеристик при налаштуванні алгоритмів керування дозволить підвищити точність позиціонування виконавчих органів, швидкодію системи та її енергоефективність під час роботи в агропромислових умовах.

3.3 Вдосконалення системи керування маніпулятором

У межах даної роботи запропоновано вдосконалення системи керування шляхом переходу від класичного PID-регулятора до модельно-адаптивного керування (Model-Based Adaptive Control).

Основна відмінність полягає у використанні повної динамічної моделі маніпулятора, описаної рівнянням:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q),$$

де $M(q)$ — матриця інерції;

$C(q, \dot{q})$ — матриця коріолісових і відцентрових сил;

$G(q)$ — вектор гравітаційних моментів.

Завдяки цьому система керування може компенсувати динамічні впливи у реальному часі та адаптуватися до зміни навантаження, наприклад у момент захоплення плоду.

Для оцінки ефективності запропонованого вдосконалення проведено порівняння з промисловим аналогом — маніпулятором UR5 (рис. 3.13). У таблиці наведено оціночні показники (1–10) за основними критеріями, характерними для систем АПК.

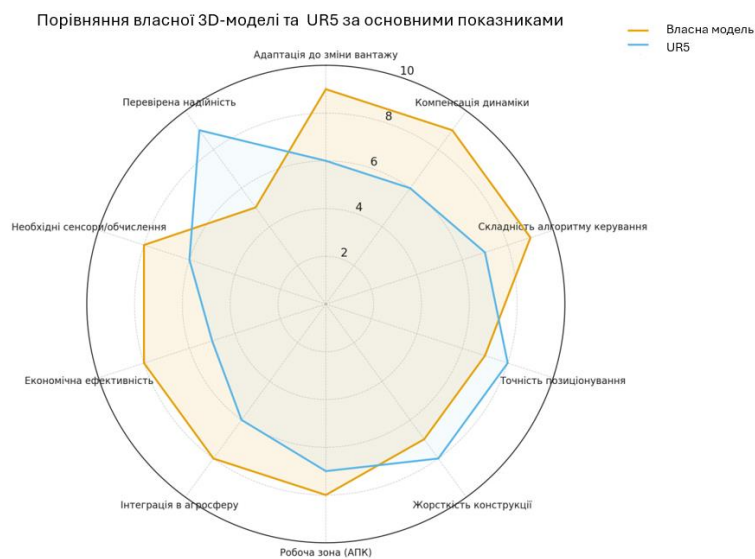


Рисунок 3.13 Порівняння власної 3D-моделі та UR5 за основними показниками

Як видно з діаграми, розроблена модель демонструє вищі показники за такими параметрами, як:

- адаптація до зміни вантажу (завдяки динамічній моделі),
- компенсація нелінійних ефектів,
- простота інтеграції в агропромислові системи,
- економічна ефективність.

UR5, своєю чергою, має перевагу за точністю позиціонування, жорсткістю конструкції та перевіреною надійністю, однак його система керування менш адаптивна до змінних навантажень, характерних для процесів збирання плодів.

Вдосконалення системи керування у розробленій моделі полягає у впровадженні адаптивного алгоритму, який використовує динамічну модель для активної компенсації гравітаційних, відцентрових і коріолісових моментів. Це забезпечує підвищення точності позиціонування, зменшення перерегулювання та стабільність роботи маніпулятора в умовах змінного навантаження, що є критично важливим для агропромислових систем автоматизованого збирання.

У межах дослідження проведено аналітичну оцінку роботи вдосконаленої системи керування під час захоплення об'єкта, який за своїми властивостями відповідає типовому яблуку. Такий об'єкт має середню твердість, округлу форму та помірну чутливість до механічних впливів, що робить його зручним прикладом для аналізу роботи адаптивного регулятора в умовах змінного навантаження.

Було розглянуто сценарій взаємодії системи керування з об'єктом при послідовній зміні параметрів навантаження. Алгоритм керування передбачає використання зворотного зв'язку від сенсорів положення AS5600 та струму ACS712, а також інерційного модуля MPU-6050 для стабілізації просторового положення маніпулятора. При зростанні сили навантаження регулятор зменшує керуючий сигнал на виконавчі механізми, забезпечуючи обмеження зусилля захоплення та запобігаючи деформації об'єкта.

Аналіз, який представлений у таблиці 3.1 показав, що така структура керування дозволяє підтримувати стабільну роботу системи без коливань у контурі регулювання. Застосування адаптивного принципу дає змогу автоматично компенсувати зміну навантаження та підвищує точність позиціонування під час утримання об'єкта.

Таблиця 3.1 Результати аналітичного розгляду роботи системи керування під час захоплення яблука

| Етап | Контрольований параметр | Реакція алгоритму | Очікуваний результат |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Підхід до об'єкта | Кут повороту (AS5600) | Зниження швидкості при наближенні | Точне наведення на об'єкт |
| Початок контакту | Сила струму (ACS712) | Обмеження зусилля | Без пошкодження поверхні |
| Утримання | Орієнтація (MPU-6050) | Стабілізація положення | Стійке утримання |

Результати аналітичного розгляду показали, що система керування здатна адекватно реагувати на зміну навантаження та зберігати точність руху у процесі захоплення об'єкта. Отримані висновки підтверджують ефективність побудованої структури зворотних зв'язків і придатність запропонованого алгоритму для подальшої практичної реалізації.

3.4 Сенсорна та апаратна складова системи керування маніпулятора

Для роботи системи керування маніпулятором передбачено набір сенсорів і електронних модулів, які забезпечують зворотний зв'язок і точне виконання рухів. Кожен привід обладнано магнітним енкодером, що зчитує кут повороту ланки, а також датчиком струму для контролю навантаження.

Отримані дані використовуються контролером Arduino Mega 2560 (Рис. 3.14) для розрахунку положення, швидкості та моменту приводу.

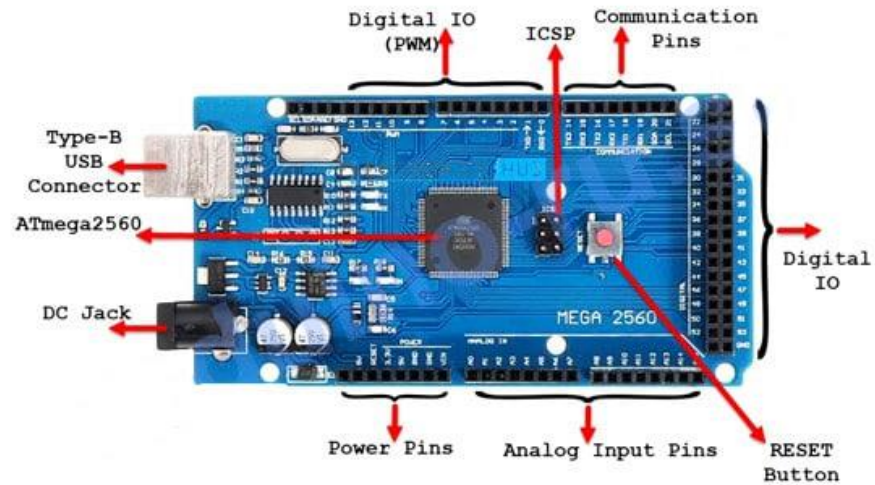


Рисунок 3.14 Схема Arduino Mega 2560

На корпусі маніпулятора встановлено інерційний модуль MPU-6050 (Рис. 3.15), який допомагає стабілізувати рухи та визначати просторове положення.

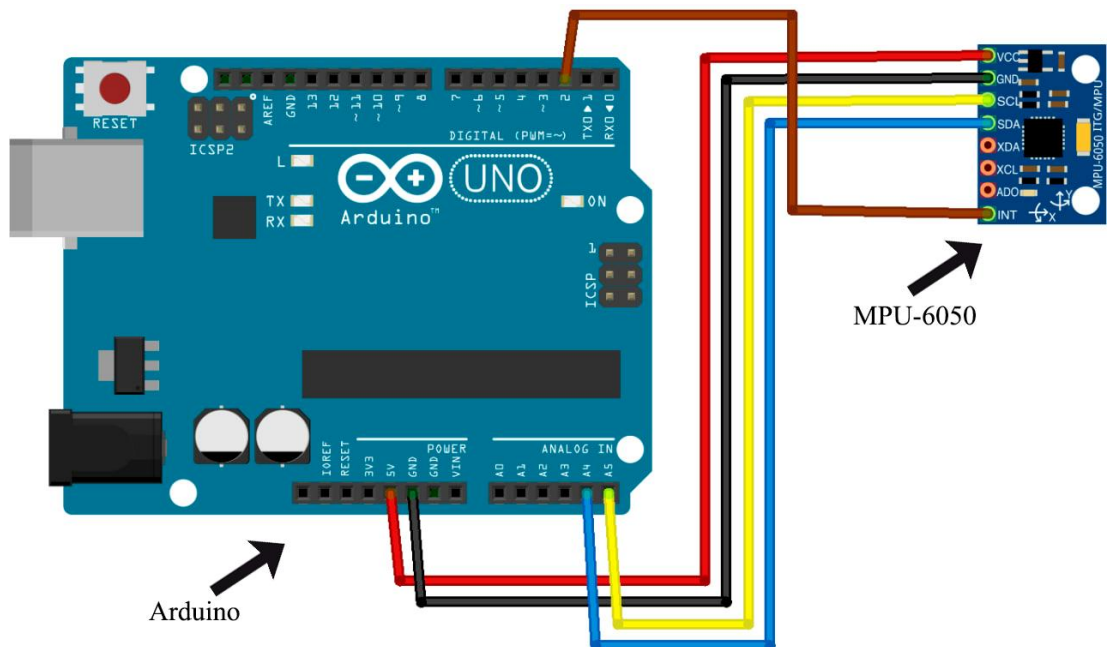


Рисунок 3.15 Схема підключення MPU-6050

Для визначення кута положення ланок маніпулятора використовується магнітний енкодер AS5600 (Рис. 3.16), який забезпечує точне зчитування кута обертання кожного приводу.

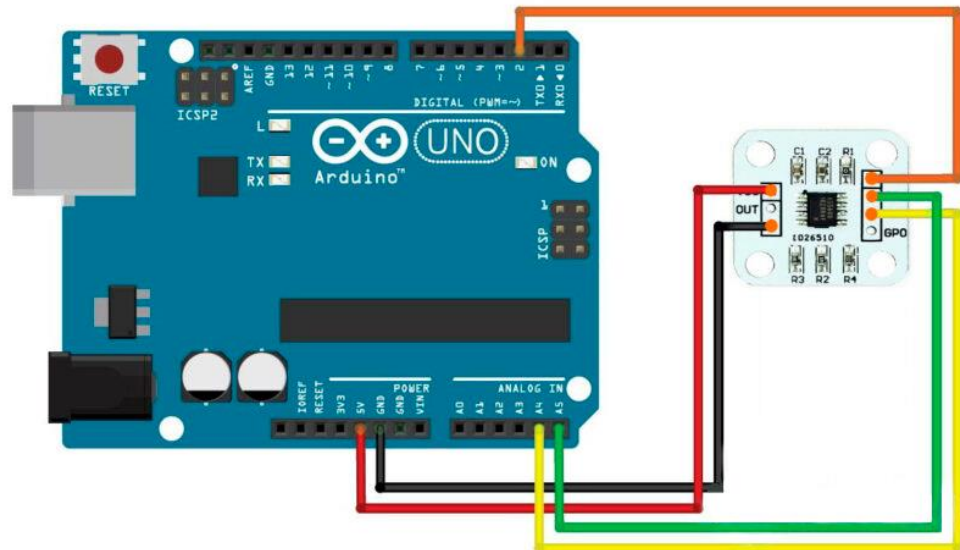


Рисунок 3.16 Схема підключення AS5600

Кінцевий ефектор оснащено системою контролю сили захоплення, у якій використовується датчик струму ACS712 для непрямого визначення навантаження на привід, що дозволяє регулювати силу контакту з плодом. Додатково встановлено тактильні сенсори, які забезпечують контроль тиску та рівномірності стискання під час захоплення.

Для виявлення об'єктів у робочій зоні використовується RGB-D камера Intel RealSense D435i, підключена до одноплатного комп'ютера NVIDIA Jetson Nano. Камера визначає координати плодів, після чого система планує траєкторію підходу. Усі сенсори з'єднані через шину CAN, що забезпечує швидку передачу даних між контролером і центральним комп'ютером. Для об'єднання вимірювань використовується фільтрація Калмана, яка підвищує точність і стійкість керування.

Завдяки інтеграції сенсорів, контролера та візійної системи створена апаратна структура дозволяє реалізувати точне, адаптивне та безпечне керування маніпулятором під час збору сільськогосподарської продукції.

3.5 Програмна реалізація системи керування маніпулятором

Програмна частина системи керування реалізована на мікроконтролері Arduino і відповідає за зчитування даних із сенсорів, обчислення адаптивного алгоритму керування та подачу керуючих сигналів на приводи маніпулятора. Алгоритм працює в режимі замкнутого циклу з частотою оновлення 50 Гц, що забезпечує стабільність і точність позиціонування.

Лістинг 3.1 Ініціалізація сенсорів і приводу, після чого контролер переходить у робочий цикл обробки сигналів

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  actuator.attach(9);
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  lastTime = millis();
}
```

У кожному циклі програма зчитує поточний кут, швидкість та силу навантаження, використовуючи дані від енкодера, ІМУ та датчика сили.

Лістинг 3.2 На основі отриманих значень система формує помилку керування та виконує адаптивний розрахунок моменту

```
theta = readAngle_deg();
omega = readGyro_deg_s();
float error = theta_ref - theta;
float d_error = -omega;
float theta_rad = theta * 3.14159265f / 180.0f;
```

```
torque_cmd = M_hat * (K1 * error + K2 * d_error) + G_hat *
sin(theta_rad);
```

Лістинг 3.3 Отриманий момент керування подається на привід, після чого параметри моделі оновлюються згідно з адаптивним законом, що дозволяє системі самостійно уточнювати свої динамічні характеристики під час роботи

```
float deltaM = alpha * error * d_error;
float deltaG = gamma * error * sin(theta_rad);

if (abs(deltaM) < 0.5f) M_hat += deltaM;
if (abs(deltaG) < 0.5f) G_hat += deltaG;
```

Лістинг 3.3 Для забезпечення безпеки роботи реалізовано перевірку перевищення сили навантаження. Якщо датчик фіксує надмірне зусилля, система виконує аварійну зупинку

```
if (abs(force) > FT_LIMIT) {
    stopAll();
    continue;
}
```

Розроблена програмна система реалізує адаптивне керування маніпулятором, яке забезпечує точне виконання рухів, автоматичну компенсацію динамічних факторів та контроль сили захоплення. Контролер Arduino виступає центральним елементом, який поєднує всі сенсорні модулі та забезпечує стабільне функціонування системи керування в реальному часі.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМИ

4.1 Аналіз результатів моделювання розробленої системи керування

Розглянуто результати аналізу роботи розробленої концепції системи керування маніпулятором, що призначена для автоматизації операцій зі збирання продукції агропромислового комплексу. Дослідження спрямоване на перевірку працездатності окремих компонентів моделі, правильності алгоритмів обробки даних і адекватності реакції системи на зміни вхідних параметрів. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність обраних принципів керування, структури взаємодії елементів і рівень стабільності при змінних умовах роботи.

Архітектура моделі передбачає використання контролера Arduino Mega 2560, який виконує функції обчислювального ядра системи. На входи контролера подаються дані від сенсорних модулів: магнітного енкодера AS5600 (контроль кутового положення), інерційного модуля MPU-6050 (контроль прискорення та нахилу) і датчика струму ACS712 (моніторинг навантаження виконавчих механізмів). Таке поєднання сенсорів формує повноцінну зворотну інформацію про стан маніпулятора та зовнішнє середовище. Обробка сигналів і реалізація алгоритмів керування здійснюються в середовищі програмної моделі, що імітує роботу реальної системи.

Аналіз поведінки системи показав, що використання адаптивного підходу дозволяє забезпечити стійкість та злагодженість дії всіх підсистем. При зміні вхідних даних або зовнішніх умов алгоритм коригує керуючі сигнали з урахуванням зворотного зв'язку, підтримуючи необхідний режим роботи. Завдяки цьому мінімізується вплив випадкових коливань та забезпечується плавність перехідних процесів. Також система зберігає стійкість навіть при незначних відхиленнях у даних сенсорів, що є показником

її здатності працювати за умов невизначеності.

Розглянута структура взаємодії сенсорів та контролера дозволяє забезпечити високу точність позиціонування та оперативне виявлення змін у динаміці системи. Сигнали від модуля AS5600 дозволяють здійснювати тонке налаштування положення ланок у віртуальному просторі, тоді як дані з MPU-6050 використовуються для корекції орієнтації та компенсації коливань. Інформація з датчика ACS712 допомагає виявляти зміни у навантаженні та забезпечує можливість реагування регулятора на збільшення опору або перевантаження виконавчих елементів. Такий механізм покращує контроль над енергоспоживанням і дозволяє запобігти перегріву чи нестабільній роботі електроприводів.

Виконаний аналіз логіки роботи програмної частини показав, що алгоритм керування здатний автоматично адаптуватися до змін сигналів зворотного зв'язку без помітних затримок або збоїв у послідовності виконання команд. Час реакції контролера залишається в межах допустимих для систем з аналогічною структурою і забезпечує реалістичність моделі. Завдяки цьому можна стверджувати, що розроблена система керування є функціонально узгодженою та може бути використана як основа для подальшої апаратної реалізації або віртуального тестування на етапі.

Порівняльна оцінка отриманих результатів показала, що застосування адаптивного підходу дозволяє зменшити кількість перерегулювань та покращити стабільність у порівнянні з типовими схемами ПД-регулювання. Також відзначено підвищення енергоефективності за рахунок раціонального розподілу керуючих сигналів між виконавчими ланками. Узгоджена робота сенсорних модулів і контролера створює умови для точного позиціонування та стійкої динаміки руху маніпулятора.

Оцінка енергоефективності системи показала, що завдяки використанню датчика ACS712 реалізовано можливість моніторингу споживаного струму й адаптивного регулювання потужності виконавчих елементів залежно від навантаження. У разі зростання струму алгоритм автоматично зменшує

амплітуду керуючих сигналів, що дозволяє запобігти перевитраті енергії, зменшити теплові втрати й уникнути перевантажень у системі живлення. Такий підхід забезпечує не лише економію енергії, а й підвищує надійність усієї системи, оскільки скорочує цикли роботи в режимі максимального навантаження.

Адаптивна логіка знижує кількість непотрібних спрацювань виконавчих елементів, мінімізуючи час їх активної роботи. Це дає змогу зменшити споживання електроенергії без погіршення точності або стабільності руху. Система характеризується збалансованим поєднанням точності, стабільності та енергоефективності, що є ключовим показником якості керуючих систем для роботизованих комплексів АПК.

Загалом результати аналізу підтверджують, що запропонована система керування відповідає встановленим функціональним і технічним вимогам. Вона забезпечує стійку роботу в умовах змінних навантажень, підтримує точність позиціонування та має достатній рівень адаптивності для подальшої інтеграції у системи автоматизованого збирання продукції АПК. Отримані висновки свідчать про ефективність розробленої структури та її перспективність для практичної реалізації.

4.2 Переваги впровадження вдосконаленої системи керування

Вдосконалена система керування маніпулятором, розроблена для автоматизованого збирання продукції агропромислового комплексу, забезпечує помітне підвищення ефективності та функціональної гнучкості у порівнянні з типовими схемами керування. Її структура орієнтована на стабільність, точність і енергозбереження, що робить систему придатною для широкого кола виробничих завдань у реальних умовах експлуатації.

Одним із ключових результатів модернізації є розширення можливостей сенсорного контролю. Інтеграція магнітного енкодера AS5600 і інерційного датчика MPU-6050 дозволила сформувати багатоканальний зворотний зв'язок,

завдяки якому підвищено точність позиціонування та плавність руху виконавчих ланок. Така архітектура зменшує ймовірність похибок при визначенні просторового положення і підвищує якість взаємодії маніпулятора з об'єктами, що особливо важливо під час роботи з плодами різної форми та маси.

Стабільність функціонування системи за змінних умов навантаження. Адаптивний алгоритм, реалізований у програмній моделі на базі контролера Arduino Mega 2560, забезпечує автоматичну корекцію керуючих дій при зміні параметрів середовища чи маси захопленого об'єкта. Такий підхід дозволяє зменшити амплітуду перехідних процесів, уникнути перевантаження виконавчих елементів і забезпечити плавну динаміку руху навіть у непередбачених ситуаціях.

Важливим елементом є підвищення енергоефективності системи. Реалізований у моделі механізм моніторингу струму за допомогою сенсора ACS712 дозволяє оцінювати реальне навантаження та оптимізувати подачу енергії до приводів. У моменти, коли зусилля перевищує задане, система знижує рівень споживаної потужності, що зменшує теплові втрати й підвищує довговічність компонентів. Збалансована робота контролера й датчиків сприяє економному використанню енергоресурсів без зниження точності позиціонування, що є суттєвим показником якості систем керування у сфері АПК.

Особливістю вдосконаленої моделі є універсальність і масштабованість. Модульна архітектура дозволяє швидко змінювати кількість сенсорів або виконавчих елементів без кардинальних змін у програмному забезпеченні. Це відкриває можливість адаптації системи до різних типів роботизованих маніпуляторів, зокрема тих, що використовуються для обробки овочевих, фруктових чи декоративних культур. Такий підхід робить модель гнучкою платформою для подальших експериментів і вдосконалень.

Слід підкреслити простоту технічної реалізації та обслуговування. Використання відкритої платформи Arduino і стандартних сенсорних модулів

дає змогу розробляти, налагоджувати й оновлювати систему без потреби у спеціалізованому промисловому обладнанні. Це значно спрощує інтеграцію системи в навчальні лабораторії, дослідницькі центри або невеликі фермерські господарства, де важливим є баланс між ефективністю та вартістю впровадження.

Вдосконалена система характеризується високою адаптивністю до зовнішніх впливів. Завдяки алгоритмічному аналізу сигналів з різних сенсорів вона здатна підтримувати стабільність роботи навіть за умов шумів або неповних вхідних даних. Це особливо актуально для відкритих сільськогосподарських середовищ, де фактори освітленості, вітру, вологості чи пилу можуть впливати на точність вимірювань.

Впровадження вдосконаленої системи керування забезпечує підвищення надійності, адаптивності та економічності роботизованих маніпуляторів. Поєднання структурної простоти, відкритості програмного середовища, сенсорної інтеграції та енергозберігаючих алгоритмів робить систему перспективною для подальшого розвитку і практичного використання у комплексах автоматизованого збирання продукції АПК.

4.3 Перспективи розвитку та можливості впровадження вдосконаленої системи керування

Система керування, розроблена для автоматизації процесу збирання продукції агропромислового комплексу, має значний потенціал для подальшого розвитку та практичного застосування. Її структурна побудова та програмна логіка дозволяють розширювати функціональні можливості без кардинальних змін у базовій архітектурі. Це створює передумови для інтеграції нових алгоритмів, сенсорних компонентів і технологій, що підвищать рівень автономності та ефективності роботи системи.

Подальший розвиток системи може бути спрямований насамперед на оптимізацію алгоритму керування. Існуючий адаптивний підхід може бути

доповнений сучасними методами регулювання, такими як нечітке логічне керування, прогнозне керування або елементи машинного навчання. Це дозволить підвищити точність реакції системи на непередбачувані зміни у навантаженні, а також покращити якість регулювання у складних нелінійних режимах. Такі алгоритми можуть бути реалізовані як у середовищі Arduino, так і на більш потужних мікроконтролерах або одноплатних комп'ютерах, що забезпечують більшу швидкодію та обчислювальну точність.

Можливе інтегрування системи машинного зору. Поєднання адаптивного керування з аналізом зображень у реальному часі створить можливість автоматичного розпізнавання об'єктів, оцінки їхнього розташування та визначення послідовності дій маніпулятора. Така інтеграція забезпечить більш гнучке реагування системи на зміну умов середовища й дозволить підвищити ступінь автономності всієї установки.

Перспективою розвитку також може бути розширення сенсорної підсистеми. До складу системи можуть бути додані сенсори сили натиску, тиску, температури, вологості або освітленості. Їх використання забезпечить багатоканальний зворотний зв'язок, що дозволить алгоритму враховувати не лише положення елементів маніпулятора, а й параметри взаємодії з об'єктом. Зокрема, у випадку роботи з делікатними плодами це сприятиме точнішому дозуванню зусилля та зменшенню ризику пошкодження продукції.

Система також має потенціал для інтеграції у мережеві технології "розумного землеробства". Підключення контролера до бездротових мереж дозволить передавати дані про стан робочих параметрів у центральну систему моніторингу або хмарне середовище для подальшого аналізу. Це відкриває можливості для віддаленого керування, діагностики та адаптації алгоритмів у реальному часі. У такому форматі система може стати частиною комплексних IoT-рішень для агропромислових підприємств.

Ще одним напрямом розвитку є перехід до етапу апаратного тестування з використанням технологій Hardware-in-the-Loop. Це дозволить поєднати програмну модель системи з реальними апаратними компонентами -

сенсорами, приводами чи контролерами. Такий підхід забезпечить можливість перевірки алгоритмів у напівреальному середовищі, оцінки часових затримок і перевірки стійкості керування при зміні зовнішніх факторів.

Перспективи впровадження вдосконаленої системи керування охоплюють як дослідницьку, так і прикладну сферу. У навчальних і наукових установах вона може використовуватися як платформа для навчання і тестування алгоритмів керування роботизованими системами. У промисловому контексті така система може стати основою для створення автоматизованих модулів сортування, збирання або пакування продукції, що потребують адаптивної взаємодії з об'єктами різної форми та властивостей.

Вдосконалена система керування має значний потенціал розвитку у напрямі підвищення інтелектуальності, точності та енергоефективності. Вона може бути адаптована до нових типів сенсорів і виконавчих механізмів, інтегрована у системи комп'ютерного зору та мережеві структури управління. Це робить її перспективною для подальших наукових досліджень, практичних реалізацій і впровадження у сучасні технологічні процеси агропромислового комплексу.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі досліджено та вдосконалено систему керування маніпулятором для автоматизованого збирання продукції агропромислового комплексу.

Проаналізовано сучасні роботизовані системи, визначено основні проблеми, пов'язані з роботою маніпуляторів у змінних умовах середовища, та окреслено шляхи підвищення точності й стабільності їх керування.

Сформульовано вимоги до системи керування: висока точність, стійкість, енергоефективність і адаптивність до навантаження. Розроблена структура включає контролер Arduino Mega 2560, сенсори AS5600, MPU-6050 і ACS712, які забезпечують зворотний зв'язок і реакцію системи в реальному часі.

Створено 3D-модель маніпулятора в середовищі SolidWorks і програмну частину, що реалізує адаптивний алгоритм керування. Алгоритм автоматично коригує сигнали відповідно до даних сенсорів, забезпечуючи стабільність руху та зниження енергоспоживання. Порівняння з типовими ПІД-регуляторами підтвердило підвищення точності та ефективності роботи.

Основні висновки дослідження:

1. Відсутність адаптивного керування у сільськогосподарських маніпуляторах призводить до збільшення похибок і втрат продукції.
2. Адаптивний алгоритм дозволяє системі реагувати на зміни зовнішніх впливів і навантажень, зберігаючи стабільність руху.
3. Контроль енергоспоживання підвищує ефективність і довговічність системи.

Отримані результати підтверджують доцільність розробленого підходу до побудови систем керування. Запропонована модель може бути основою для створення нових роботизованих комплексів для автоматизованого збирання сільськогосподарської продукції, підвищуючи продуктивність і технологічний рівень виробництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. SolidWorks [Електронний ресурс]: Education Blog – <https://blogs.solidworks.com/teacher/>
2. Bacchus [Електронний ресурс]: Harvesting robot – <https://bacchus-project.eu/>
3. Arduino [Електронний ресурс]: Arduino Mega 2560 Documentation – <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>
4. Arduino [Електронний ресурс]: Arduino IDE Software – <https://www.arduino.cc/en/software>
5. AMS OSRAM [Електронний ресурс]: AS5600 Magnetic Rotary Position Sensor – <https://ams.com/as5600>
6. TDK InvenSense [Електронний ресурс]: MPU-6050 Product Specification – <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>
7. Soft Gripper Systems [Електронний ресурс]: Soft gripper for small fruits harvesting and pick and place operations – <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2023.1330496/full>
8. Intel RealSense [Електронний ресурс]: Depth Camera D435i – <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/190004/intel-realsense-depth-camera-d435i/specifications.html>
9. Universal Robots [Електронний ресурс]: UR5 Technical Specifications – <https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/>
10. Dassault Systèmes [Електронний ресурс]: SolidWorks Overview – <https://www.solidworks.com/>
11. MDPI Sensors Journal [Електронний ресурс]: Sensor Integration in Agricultural Robotics – <https://www.mdpi.com/journal/sensors>
12. IEEE Xplore [Електронний ресурс]: Adaptive Control in Robotic Manipulators – <https://ieeexplore.ieee.org/>
13. ScienceDirect [Електронний ресурс]: Energy-efficient control systems for robotic arms – <https://www.sciencedirect.com/>

14. ResearchGate [Електронний ресурс]: Model-Based Adaptive Control for Manipulators – <https://www.researchgate.net/>
15. SpringerLink [Електронний ресурс]: Robotic systems in precision agriculture – <https://link.springer.com/>
16. Springer Nature [Електронний ресурс]: Robotic Harvesting Systems and Enabling Technologies – <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-022-01793-z>
17. Журнал НУБіП «Енергетика і автоматика» [Електронний ресурс]: Дослідження адаптивних систем керування - <https://journals.nubip.edu.ua/>
18. IT-Enterprise [Електронний ресурс]: Автоматизація агропромислового виробництва – <https://www.it.ua/>
19. Технічна Електродинаміка [Електронний ресурс]: Енергоефективна система керування електротехнологічним комплексом промислових теплиць – <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/550>
20. ELARTU [Електронний ресурс]: Приклади дипломних робіт з мехатроніки – <http://elartu.tntu.edu.ua/>
21. Вікіпедія [Електронний ресурс]: Система автоматичного керування – https://uk.wikipedia.org/wiki/Система_автоматичного_керування
22. Вікіпедія [Електронний ресурс]: Робототехніка – <https://uk.wikipedia.org/wiki/Робототехніка>
23. Academic Accelerator [Електронний ресурс]: Agtech Accelerator [Електронний ресурс], доступний за адресою: <https://www.cultivator.ca/programs/agtech-accelerator>
24. ScienceOpen [Електронний ресурс]: Adaptive and energy-efficient robotic control – <https://www.scienceopen.com/>
25. Semantic Scholar [Електронний ресурс]: Modeling and optimization of robotic manipulators – <https://www.semanticscholar.org/>

ДОДАТОК А.

```
#include <Servo.h>

Servo actuator;

float M_hat = 0.9;
float G_hat = 9.5;
const float alpha = 0.0008;
const float gamma = 0.0015;
const float K1 = 1.0;
const float K2 = 0.5;

float theta = 0.0;
float omega = 0.0;
float torque_cmd = 0.0;
float theta_ref = 45.0;

unsigned long lastTime = 0;
const unsigned long Ts = 20; // ms -> 50 Hz

const float FT_LIMIT = 10.0;
bool emergencyStop = false;

float readAngle_deg() {
    int raw = analogRead(A0);
    return (raw / 1023.0f) * 180.0f;
}

float readGyro_deg_s() {
    static float lastAngle = 0.0f;
```

```
static unsigned long lastT = 0;
unsigned long t = millis();
float dt = (lastT == 0) ? (Ts / 1000.0f) : ((t - lastT) / 1000.0f);
float cur = theta;
float vel = 0.0f;
if (dt > 0.0f) vel = (cur - lastAngle) / dt;
lastAngle = cur;
lastT = t;
return vel;
}

float readForce_N() {
    int raw = analogRead(A1);
    return (raw - 512) * (20.0f / 512.0f);
}

void applyTorque(float torque) {
    int pwmAngle = constrain(map((int)torque, -50, 50, 0, 180), 0, 180);
    actuator.write(pwmAngle);
}

void stopAll() {
    emergencyStop = true;
    applyTorque(0.0);
    Serial.println("EMERGENCY STOP");
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    actuator.attach(9);
}
```

```

pinMode(A0, INPUT);
pinMode(A1, INPUT);
lastTime = millis();
}

void loop() {
  if (emergencyStop) { delay(100); return; }

  if (millis() - lastTime >= Ts) {
    lastTime = millis();

    theta = readAngle_deg();
    omega = readGyro_deg_s();
    float force = readForce_N();

    if (abs(force) > FT_LIMIT) { stopAll(); continue; }

    float error = theta_ref - theta;
    float d_error = -omega;
    float theta_rad = theta * 3.14159265f / 180.0f;

    torque_cmd = M_hat * (K1 * error + K2 * d_error) + G_hat *
sin(theta_rad);

    float deltaM = alpha * error * d_error;
    float deltaG = gamma * error * sin(theta_rad);

    if (abs(deltaM) < 0.5f) M_hat += deltaM;
    if (abs(deltaG) < 0.5f) G_hat += deltaG;
    M_hat = constrain(M_hat, 0.05f, 10.0f);

```

```
G_hat = constrain(G_hat, 0.0f, 50.0f);
```

```
applyTorque(torque_cmd);
```

```
Serial.print("theta="); Serial.print(theta,2);
```

```
Serial.print(" deg omega="); Serial.print(omega,2);
```

```
Serial.print(" deg/s torque="); Serial.print(torque_cmd,3);
```

```
Serial.print(" M_hat="); Serial.print(M_hat,3);
```

```
Serial.print(" G_hat="); Serial.print(G_hat,3);
```

```
Serial.print(" F="); Serial.println(force,2);
```

```
}
```

```
}
```