

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ, РОБОТОТЕХНІКИ І МЕХАТРОНИКИ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Автоматизована система керування механічним маніпулятором руки»

«Automated control system of the mechanical hand manipulator»

Виконав: студент 2 курсу, групи 6А
спеціальність 174 – «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Козлов М. Ю.

Керівник: к.т.н., доцент Поливода О.В.

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Херсон – 2025 рік

Херсонський національний технічний університет
Факультет Інженерії та транспорту
Кафедра Автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри автоматизації,
робототехніки і мехатроніки
Селіверстов І.А.
«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту
Козлову Михайлу Юрійовичу

1. Тема проекту: Автоматизована система керування механічним маніпулятором руки
Automated control system of the mechanical hand manipulator
керівник проекту: к.т.н., доцент Поливода О.В.
затверджена наказом вищого навчального закладу від 28.08.2025 р. № 364-с
2. Строк подання студентом проекту «15» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до проекту: довідкова та науково технічна література
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:
 1. Огляд методів та керування механічними маніпуляторами
 2. Розробка математичної моделі дволанкового маніпулятора
 3. Розробка програмно-апаратної системи
 4. Керування роботом-маніпулятором
 5. Програмна Реалізація системи керування маніпулятором
5. Перелік графічного матеріалу:
 1. Класифікація маніпуляторів
 2. Математична модель дволанкового маніпулятора
 3. Оптимізація руху дволанкового маніпулятора
 4. Результати моделювання
 5. Структурна схема
 7. Програмна реалізація

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Поливода О.В., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання

«02» вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Підбір і огляд літератури	15.09.2025	Виконано
2	Розробка математичної моделі дволанкового маніпулятора	30.09.2025	Виконано
3	Розробка програмно-апаратної системи	14.10.2025	Виконано
4	Керування роботом-маніпулятором	3.11.2025	Виконано
5	Програмна реалізація системи керування маніпулятором	17.11.2025	Виконано
6	Оформлення ПЗ	1.12.2025	Виконано
7	Оформлення графічного матеріалу	15.12.2025	Виконано

Студент

_____ (підпис)

Козлов М.Ю

Керівник проекту

_____ (підпис)

Поливода О.В.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 77 сторінок, 13 рисунків. Графічна частина – 6 аркуша формату А1.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці автоматизованої системи керування механічним маніпулятором руки. Тема актуальна через розвиток робототехніки та впровадження автоматизованих систем у промисловості, науці та сервісних сферах, що підвищують продуктивність і точність операцій.

Мета роботи — проєктування та реалізація програмно-апаратної системи керування роботом, створення макета та дослідження принципів автоматизованого управління. Проведено аналіз існуючих маніпуляторів, розроблено математичну модель дволанкового маніпулятора, а також електронну та програмну частини системи.

У роботі розглянуто класифікації маніпуляторів, їх конструктивні елементи, сенсорні системи та методи автоматизації, включаючи дискретне, циклічне та безперервне керування приводами. Опрацьовано траєкторії руху, чисельне моделювання та аналіз кінематичних і динамічних характеристик, що дозволило оцінити ефективність алгоритмів керування.

Розроблено систему на базі сервоприводів, Arduino (Atmega328P), потенціометрів та модулів ESP з камерою. Створено електричну схему, програмну частину, організовано зворотний зв'язок, модернізовано 3D-модель макета.

Експерименти підтвердили працездатність макета: система забезпечує точне позиціонування маніпулятора, стабільну роботу приводів та виконання основної функції — відеозйомку з передаванням даних на сервер. Результати можуть слугувати основою для розвитку автоматизованих робототехнічних комплексів.

МЕХАНІЧНИЙ МАНІПУЛЯТОР, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА
КЕРУВАННЯ, РОБОТОТЕХНІКА, МІКРОКОНТРОЛЕР ARDUINO,
СЕРВОПРИВІД, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ABSTRACT

Master's qualification work: 77 pages, 13 figures. Graphic part - 6 sheets of A1 format.

The qualification work is dedicated to the development of an automated control system for a robotic manipulator arm. The topic is relevant due to the growth of robotics and the implementation of automated systems in industry, science, and service sectors, which increase productivity, accuracy, and safety of operations.

The goal of the work is to design and implement a hardware-software control system for the robot, create a prototype, and study the principles of automated motion control. Existing manipulators were analyzed, a two-link manipulator mathematical model was developed, and the electronic and software components of the system were created.

The study covers manipulator classifications, structural elements, sensor systems, and automation methods, including discrete, cyclic, and continuous drive control. Trajectories, numerical modeling, and analysis of kinematic and dynamic characteristics were conducted to evaluate the efficiency of control algorithms.

The system was developed using servomotors, Arduino (Atmega328P), potentiometers, and ESP modules with a camera. The electrical circuit and software were implemented, feedback was organized, the 3D model of the prototype was updated, and the control system enclosure was designed in SOLIDWORKS.

Experiments confirmed the prototype's functionality: the system provides accurate manipulator positioning, stable drive operation, and performs its main function — video capture with data transmission to a server. The results can serve as a basis for the development of automated robotic complexes.

MECHANICAL MANIPULATOR, AUTOMATED CONTROL SYSTEM,
ROBOTICS, ARDUINO MICROCONTROLLER, SERVO DRIVE,
MATHEMATICAL MODELING

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЧНИМИ МАНІПУЛЯТОРАМИ	12
1.1 Історія розвитку механічних маніпуляторів.....	12
1.2 Класифікація маніпуляторів	14
1.3 Основні конструктивні елементи маніпуляторів.....	18
1.4 Типи приводів та сенсорні системи.....	20
1.5 Системи керування механічними маніпуляторами	21
1.6 Автоматизація процесів керування	22
1.7 Сучасні методи управління роботами	23
1.7.1 Дискретне позиційне управління приводами маніпулятора	24
1.7.2 Циклічне управління приводами маніпуляторів.....	27
1.7.3. Безперервне управління приводами маніпулятора.....	29
1.8 Майбутні тенденції у розвитку роботизованих маніпуляторів.....	30
2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДВОЛАНКОВОГО МАНІПУЛЯТОРА.....	32
2.1 Короткий опис задачі, сутності проблеми, методів дослідження.....	32
2.2 Траєкторії руху маніпуляційного робота	34
2.3 Оптимізація руху дволанкового маніпулятора	37
2.4 Чисельне моделювання рухів маніпулятора	39
3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ	41
3.1. Опис електромеханічної частини промислового робота- маніпулятора.....	41
3.2 Структурна схема системи керування промислового робота- маніпулятора.....	42
3.3. Вибір елементної бази системи керування макета робота- маніпулятора.....	43

3.3.1. Сервоприводи	43
3.3.2 Платформа Arduino. Плати Arduino.....	46
3.3.3 Потенціометри	49
3.3.4. Модулі на базі мікроконтролера ESP з камерою	51
3.3.5 Живлення системи. Блок живлення DELUX ATX-450W (P4)	54
3.3.6. Понижуючі перетворювачі.....	55
3.4. Підключення елементної бази системи керування макета робота-маніпулятора.....	58
3.5. Модернізація готової 3D-моделі макета робота-маніпулятора та конструювання системи керування в середовищі SOLIDWORKS.....	60
3.5.1. Модернізація готової 3D-моделі макета робота-маніпулятора.....	60
3.5.2. Конструювання системи керування.....	63
3.5.3. Конструювання корпусу системи керування макета робота-маніпулятора.....	65
4. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРОМ	67
4.1 Реалізація програмного коду в Arduino IDE	67
4.2 Демонстрація роботи та валідація керування	70
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ПР – промисловий робот;

ШИМ (PWM) – широтно-імпульсна модуляція;

AVR - родина восьмибітових мікроконтролерів фірми Atmel;

UART - тип асинхронного приймача-передавача;

SPI – фактичний послідовний синхронний повнодуплексний стандарт передачі даних;

I2C - послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем;

GND – нульовий потенціал;

SRAM – статична оперативна пам'ять;

EEPROM – постійний запам'ятовувач, що програмується та очищується за допомогою електрики.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		10

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку промисловості, автоматизація виробничих процесів набуває особливої актуальності. Одним із ключових напрямів такої автоматизації є застосування робототехнічних систем, зокрема механічних маніпуляторів — спеціалізованих пристроїв, здатних точно та ефективно виконувати різноманітні дії, що імітують рухи людської руки. Вони використовуються для піднімання, переміщення, складання, зварювання, сортування та інших завдань, які раніше потребували ручної праці. Автоматизовані системи керування механічними маніпуляторами дозволяють значно підвищити точність і швидкість виконання виробничих операцій, мінімізувати вплив людського фактору, зменшити кількість виробничих помилок, а також покращити загальну безпеку на підприємстві. Особливе значення такі системи мають у середовищах, де присутні небезпечні умови праці, токсичні речовини або висока температура, що створює ризики для життя та здоров'я працівників. З огляду на тенденції розвитку Індустрії 4.0, яка передбачає масове впровадження інтелектуальних систем, Інтернету речей та кіберфізичних об'єктів, автоматизовані системи керування маніпуляторами стають невід'ємною частиною сучасних виробництв. Їхнє впровадження відкриває нові можливості для підвищення ефективності, адаптивності та гнучкості технологічних процесів. У даній курсовій роботі розглянуто принципи побудови та функціонування автоматизованої системи керування механічним маніпулятором руки, проаналізовано основні компоненти системи, алгоритми керування та перспективи її подальшого розвитку й застосування.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЧНИМИ МАНІПУЛЯТОРАМИ

1.1 Історія розвитку механічних маніпуляторів

Робототехніка є однією з ключових технологій сучасності, яка стрімко розвивається завдяки появі інноваційних технологій, таких як штучний інтелект, 5G, доповнена реальність та блокчейн [5]. Основна мета створення роботизованих систем – автоматизація важких, небезпечних і рутинних процесів, що дозволяє підвищити ефективність виробництва та зменшити витрати. Термін «робот» походить від чеського слова *robota*, що означає «примусова праця». Вперше це слово з'явилося в 1921 році в п'єсі «R.U.R. (Rossum's Universal Robots)» Карела Чапека. Однак ідея автоматизованих механізмів виникла значно раніше: ще Арістотель розглядав можливість створення автоматизованих пристроїв, а Леонардо да Вінчі у XV столітті розробив концепцію механічного лицаря. У XX столітті розвиток робототехніки набув стрімкого темпу. Основні етапи розвитку мобільної робототехніки включають: 1950-ті роки: ELSIE – перший мобільний робот з електромеханічним управлінням. 1960-ті роки: SHAKEY – перший робот із сенсорними датчиками та камерою, розроблений у Стенфордському науково-дослідному інституті. 1980-ті роки: розвиток автономних систем керування та обробки даних.

Промислові роботи відрізняються від мобільних тим, що зазвичай мають стаціонарну конструкцію та виконують чітко задані операції. Перший промисловий робот – Unimate – був створений у 1954 році Джорджем Деволом і використовувався для переміщення важких об'єктів на заводах General Motors [12]. У 1970-х роках з'явилися більш розвинені роботизовані маніпулятори, оснащені камерами та сенсорами, що дозволило автоматизувати складні процеси. Одночасно розвивалися автономні транспортні системи,

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		12

зокрема AGV (Autonomous Guided Vehicle) – перші автоматизовані транспортні засоби [13].

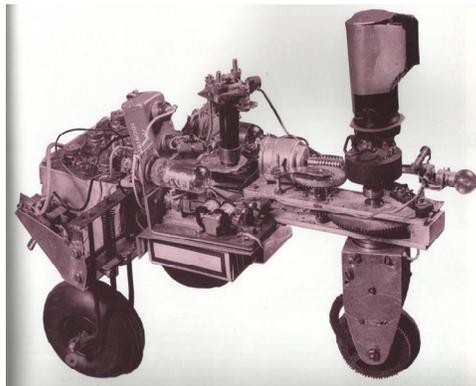


Рисунок 1.1 ELSIE – перший мобільний робот з електромеханічним управлінням



Рисунок 1.2 SHAKEY – перший робот із сенсорними датчиками та камерою

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ

Арк.

13



Рисунок 1.3 ELSIE – Перший промисловий робот – Unimate

На сучасному етапі робототехніка охоплює широкий спектр застосувань – від промислового виробництва до медицини, оборонної сфери та сільського господарства [1]. Інтелектуальні системи керування, поєднані з неймережами та машинним навчанням, дозволяють роботам адаптуватися до змінних умов і приймати рішення в режимі реального часу.

Основні напрями розвитку:

Підвищення точності та автономності завдяки штучному інтелекту.

Розвиток колаборативної робототехніки, де роботи працюють спільно з людьми.

Інтеграція сенсорних систем і IoT, що забезпечує зворотний зв'язок і оптимізацію виробничих процесів.

Таким чином, автоматизовані маніпулятори та мобільні роботи стають невід'ємною частиною сучасного виробництва, забезпечуючи високу ефективність і безпеку праці.

1.2 Класифікація маніпуляторів

Маніпулятор - це робота-рука, яка взаємодіє з навколишнім середовищем. Він відповідає за функціональність робота, незалежно від того,

піднімає він важкий предмет, збирає невеликий компонент або фарбує автомобіль [6].

Кожен тип має власний набір характеристик — сильні сторони, обмеження та ідеальне робоче середовище.

Декартові маніпулятори

Декартові маніпулятори, також відомі як маніпулятори XYZ, мають три лінійні шарніри, які використовують декартову систему координат — X, Y і Z — для прямолінійного руху вздовж цих осей. Ця проста геометрія робить їх легкими для розуміння та програмування.

Ці маніпулятори часто використовують у 3D-друці, фрезеруванні та лазерному різанні, де потрібні прямі лінії та точність. Здебільшого це декартові маніпулятори, які виконують монотонні завдання, що вимагають високого ступеня точності, як-от розміщення електронних компонентів на друкованій платі.

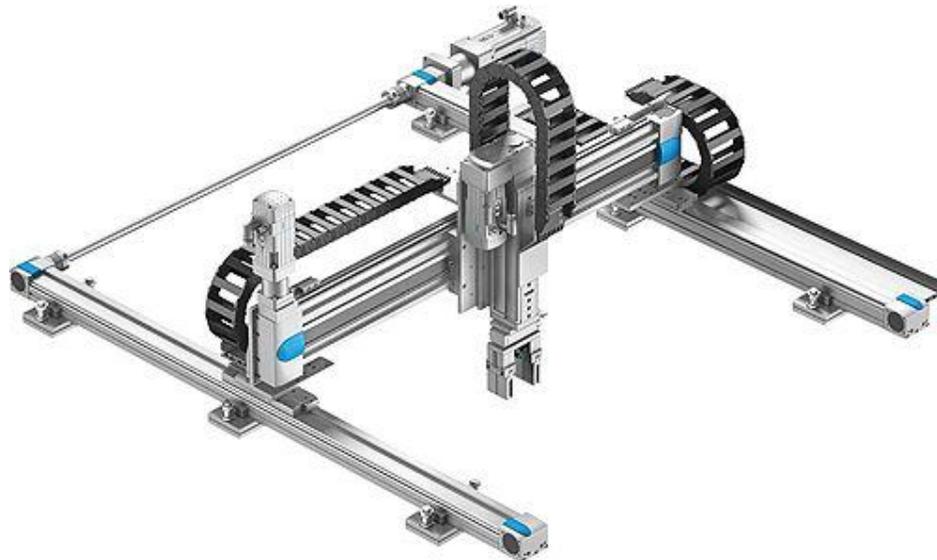


Рисунок 1.4 Декартовий маніпулятор

Циліндричні маніпулятори. На перший погляд циліндричні маніпулятори чимось схожі на руку, що тягнеться з циліндричної основи. Вони мають один поворотний шарнір біля основи та лінійний шарнір, який дозволяє руці рухатися вертикально та радіально. Їхній рух базується на циліндричних координатах — звідси й назва. Ви побачите ці маніпулятори в дії там, де

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		15

потрібна надійна та проста система. Вони часто використовуються в таких задачах, як обробка матеріалів, прості завдання підбору й розміщення та деякі типи обслуговування машин[14].



Рисунок 1.5 Циліндричний маніпулятор

Сферичні (полярні) маніпулятори. На відміну від декартових або циліндричних маніпуляторів, сферичні маніпулятори використовують комбінацію поворотних шарнірів для переміщення в сферичному робочому просторі. Вони мають фіксовану основу і зазвичай два або три обертових суглоби, що дозволяє їм охоплювати широкий діапазон рухів у цій сфері. Ви можете знайти їх у завданнях, які вимагають трохи більше свободи руху, ніж циліндричні, але все ще в обмеженому просторі. Застосування можуть включати зварювання, фарбування розпиленням або основні завдання зі складання.



Рисунок 1.6 Сферичний маніпулятор

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ

Арк.

16

Маніпулятори SCARA. SCARA означає Selective Compliance Assembly Robot Arm, і, як випливає з назви, ці маніпулятори особливо добре підходять для завдань зі складання. Вони мають два паралельні поворотні шарніри, які забезпечують податливість у площині, що робить їх ідеальними для горизонтальних рухів. Ви зазвичай зустрічаєте маніпулятори SCARA в середовищах, які потребують швидких і точних горизонтальних рухів, також для завдань, як високошвидкісне складання, сортування або навіть певні типи завдань пакування.



Рисунок 1.7 Маніпулятори SCARA

Шарнірні маніпулятори, або роботизовані руки, найкраще імітують людську руку, з обертальними суглобами, які можуть коливатися від двох до більше десяти. Вони забезпечують високий ступінь свободи, дозволяючи рухатися в кількох площинах. Вони дуже універсальні, тому їх широко використовують у різних секторах, від охорони здоров'я та досліджень до передового виробництва та навіть розваг. Їх можуть використовувати в завданнях, які вимагають високого рівня спритності, таких як хірургічні процедури, складне збирання та навіть мистецькі спроби, такі як малювання.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		17



Рисунок 1.8 Шарнірний маніпулятор

1.3 Основні конструктивні елементи маніпуляторів

Роботизована рука також відома як маніпулятор. Це частина промислового робота, яка використовується для виконання завдань. Його будова схоже на людську руку і складається з плеча, ліктя і зап'ястя. Плече – це частина роботизованої руки, пов'язана з головним блоком промислового робота. Лікоть – це з'єднана частина руки, яка згинається під час руху, а зап'ястя – це частина руки, яка виконує фактичне завдання. Для гнучкості робота-рука оснащена різними з'єднаннями, які дозволяють їй рухатися в різних напрямках під час роботи. А 6-осьова роботизована рука, наприклад, має більше суглобів, ніж а 4-осьова рука який є менш гнучким. Крім того, конструкції роботизованих рук відрізняються залежно від того, наскільки далеко вони можуть досягати, і корисного навантаження, яке вони можуть витримувати[15]. У наш час роботизована рука вже добре розроблена, багато продаються роботизовані руки на ринку. Роботизовані руки слід розглядати як чудовий варіант для підвищення продуктивності та якості продукту. Кінцевий ефектор – це інструментальний пристрій, прикріплений до зап'ястя роботизованої руки [8]. Він надає роботу більше спритності та дозволяє виконувати конкретні завдання. Це більш зручне рішення, ніж створення

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

унікальної руки робота для кожної ролі. Приклади кінцевих ефекторів включають:

1. Захвати
2. Свердла
3. Зварювальні пістолети
4. Вакуумні присоски (відсмоктуючий інструмент)
5. Двигуни

Частини промислового робота повинні рухатися, оскільки вони не можуть рухатися за власним бажанням. З цієї причини такі частини, як роботизовані руки, оснащені двигунами для полегшення руху. Двигун найкраще можна описати як електронний пристрій, який має лінійні та поворотні приводи, що працюють від електричної, гідравлічної або пневматичної енергії. Коли приводи рухаються на високій швидкості, вони штовхають і повертають роботизовані частини в рух[9].

Подумайте про контролер як про мозок робота. Це центральна операційна система, яка контролює роботу всіх інших частин робота. Він запрограмований за допомогою програмного забезпечення, яке дозволяє йому отримувати, інтерпретувати та виконувати команди. У більш просунутих роботах контролер також може мати «пам'ять», з якої він виконує повторювані завдання, оскільки «пам'ятає», як вони працюють. Штучний інтелект в розумні роботи також вбудовано в контролер через програмне забезпечення[16].

Датчики відіграють важливу роль у функціонуванні роботизованих систем. Вони дозволяють роботу отримувати інформацію про навколишнє середовище та адаптувати свою роботу відповідно до змін.

Основні типи датчиків:

Сенсори руху – визначають переміщення та положення маніпулятора.

Датчики сили та тиску – допомагають регулювати зусилля під час роботи із делікатними об'єктами.

Лазерні та оптичні датчики – використовуються для розпізнавання об'єктів і навігації.

					<i>ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		19

Температурні датчики – контролюють нагрівання компонентів та робочої поверхні.

Завдяки цим датчикам робот може працювати з високою точністю, уникати зіткнень та забезпечувати безпеку під час виконання операцій.

1.4 Типи приводів та сенсорні системи

Приводи з'єднань

З'єднання маніпулятора переміщуються за допомогою приводів, які отримують енергію від певної системи приводу.

Найпоширенішими системами приводу в робототехніці є:

1. Електричний привід
2. Гідравлічний привід
3. Пневматичний привід
4. Типи приводів
5. Електричні двигуни, такі як:
6. Серводвигуни
7. Крокові двигуни
8. Прямопривідні електродвигуни
9. Гідравлічні приводи
10. Пневматичні приводи
11. Механічні системи приводу

Система приводу визначає швидкість руху маніпулятора, потужність робота, динамічні характеристики та, до певної міри, сферу застосування.

Робот потребує системи приводу для руху руки, зап'ястя та корпусу. Вибір системи приводу зазвичай визначає можливості робота. Для активації з'єднань робота використовують три основні типи систем приводу:

1. Електричний привід
2. Гідравлічний привід
3. Пневматичний привід

Найчастіше використовують електричний та гідравлічний приводи.

Електричні системи приводу забезпечують високу швидкість та потужність руху роботів. Привід може здійснюватися за допомогою серводвигунів або крокових двигунів. Цей тип приводу підходить як для обертальних, так і для лінійних з'єднань. Гідравлічні системи приводу зазвичай використовуються у великих роботах. Вони забезпечують більшу потужність та швидкість у порівнянні з електричними системами. Приводи можуть бути як для лінійних, так і для обертальних з'єднань.

Пневматичні приводи застосовуються у невеликих роботах, які мають менше п'яти ступенів свободи. Вони забезпечують хорошу точність і швидкість.

1.5 Системи керування механічними маніпуляторами

Щоб мати можливість захоплювати об'єкти у будь-якому положенні та орієнтації у просторі, необхідно кілька ступенів свободи. Ступінь свободи – це ключовий параметр при проєктуванні системи управління маніпулятором. Чим більше ступенів свободи, тим гнучкішою та універсальнішою є система, але водночас складнішою за конструкцією. Типові спеціалізовані маніпулятори зазвичай мають 2-3 ступені свободи.

Система управління виконує конкретні дії, керуючи двигуном кожного ступеня свободи. Вона також отримує зворотну інформацію від датчиків, формуючи стабільний замкнений контур управління. Основою системи керування зазвичай є мікроконтролери, такі як одночипові мікрокомп'ютери або DSP, а необхідні функції реалізуються за допомогою програмування.

Виконавчі механізми маніпулятора поділяються на руку, руку-маніпулятор (або плече) та корпус: Рука закріплена на передній частині маніпуляторної руки. Усередині руки розташований вал передачі, який передає зусилля на зап'ястя, забезпечуючи його обертання, розтягування, згинання та рух пальців. Конструкція руки маніпулятора імітує людські пальці та

поділяється на три типи: безшарнірний, фіксований шарнірний і вільний шарнірний. За кількістю пальців розрізняють двопальцеві, трипальцеві та чотирьопальцеві конструкції, з яких двопальцеві є найбільш поширеними. Для захоплення різних об'єктів можуть використовуватися різні змінні захоплювачі. Також існують руки без пальців, які зазвичай представлені вакуумними присосками або магнітними захоплювачами. Рука-маніпулятор (або плече) виконує функцію точного позиціонування руки для захоплення та переміщення об'єкта у потрібне місце. Щоб система управління маніпулятором працювала правильно, необхідно точно контролювати три ступені свободи руки.

Корпус є основою, що підтримує руки, джерела живлення та різні виконавчі механізми.

1.6 Автоматизація процесів керування

Мобільна маніпуляція зазнала значної еволюції в останні роки, удосконалюючись у таких важливих аспектах, як сенсорика, локалізація, точність і досяжність. Проте в робототехнічній індустрії все ще існують виклики та значний потенціал для подальшого розвитку. Для досягнення ефективної та безпечної співпраці з роботом необхідний комплексний підхід, що охоплює дизайн, конфігурацію та безпеку: Операційна потужність: мобільні маніпулятори, доступні на ринку, мають обмежену вантажопідйомність маніпуляторної руки. Найпотужнішою на сьогодні є модель Robotnik RB-ROBOUT+, яка інтегрує руку UR20 і здатна працювати з деталями масою до 20 кг. Інтуїтивно зрозумілі інтерфейси: для спрощення взаємодії між людиною та роботом важливо розробляти зручні та доступні інтерфейси[4]. Це можуть бути сенсорні екрани, спрощені панелі керування або навіть системи управління за допомогою жестів чи голосу, що дозволяють операторам легко спілкуватися з роботом без складного навчання. Передові сенсори: оснащення роботів сучасними сенсорами, такими як камери та

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

системи машинного зору, є критично важливим для точної взаємодії з навколишнім середовищем[7]. Такі сенсори дозволяють роботу виявляти перешкоди та адаптувати свою поведінку відповідно до змін у робочому просторі, що є ключовим фактором у динамічних середовищах. Безпечне планування траєкторії: алгоритми планування маршруту відіграють ключову роль у спільній роботі людей і роботів. Вони повинні враховувати присутність людей у середовищі, оптимізувати траєкторію руху робота, щоб уникати зіткнень і мінімізувати ризики травм.

1.7 Сучасні методи управління роботами

У сучасних умовах розвитку робототехніки та автоматизації, управління роботами і маніпуляторами стало одним з найважливіших аспектів для досягнення високої ефективності, точності та гнучкості в роботизованих системах. Маніпулятори, як складова частина роботизованих систем, широко застосовуються в різних галузях промисловості, медицині, науці, а також у новітніх технологіях, таких як дослідження космосу та розвиток автономних транспортних засобів[2].

Управління приводами маніпуляторів — це одна з основних проблем, що стоїть перед інженерами та дослідниками в області робототехніки. Різноманіття задач, які повинні виконувати маніпулятори, вимагає розробки і впровадження різних методів управління. Кожен метод має свої особливості, що впливають на точність, швидкість і енергоефективність роботи системи в цілому.

Одним з основних напрямків розвитку сучасних методів управління є інтеграція та синхронізація різних приводів маніпулятора для забезпечення плавності, точності та безпеки рухів[10]. У даному контексті з'являються різні підходи до управління, серед яких дискретне позиційне, циклічне та безперервне управління приводами, кожне з яких має свої переваги та недоліки в залежності від умов роботи та поставлених завдань.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

У підрозділі 1.7.1 буде розглянуто дискретне позиційне управління приводами маніпулятора, яке є одним з найпоширеніших підходів у роботизованих системах, особливо для завдань, що потребують точного виконання окремих маніпуляцій. У підрозділі 1.7.2 йтиметься про циклічне управління, яке має важливе значення для автоматизованих виробничих ліній, де маніпулятори виконують повторювані цикли. Останній підрозділ 1.7.3 буде присвячений безперервному управлінню, яке застосовується для забезпечення більш складних та динамічних рухів, таких як маніпуляції з нестабільними чи рухомими об'єктами.

Сучасні методи управління приводами маніпуляторів дозволяють значно підвищити ефективність роботизованих систем, зменшити енерговитрати, а також забезпечити високий рівень точності та адаптивності до змінюваних умов. Порівняння цих методів дозволить зрозуміти, як кожен з них може бути використаний для оптимізації робочих процесів та забезпечення найкращих результатів у конкретних ситуаціях[17].

Таким чином, розгляд сучасних методів управління приводами маніпуляторів є необхідним кроком для розуміння технологічних тенденцій в робототехніці та вибору оптимальних підходів для ефективної автоматизації складних задач.

1.7.1 Дискретне позиційне управління приводами маніпулятора

Цей підхід представляє собою другий рівень управління маніпулятором, який у рамках програмного управління забезпечує координацію приводів окремих ступенів рухливості. Завданням цього рівня є переміщення робочого органа маніпулятора за послідовністю точок, визначених дискретною програмною траєкторією з зупинкою в кожній точці у визначені моменти часу t_k . Реалізація цього алгоритму здійснюється через подачу на приводи завдань у вигляді дискретних програм $q_3(t_k)$, що обчислюються за $x_{p3}(t_k)$ шляхом розв'язання оберненої задачі кінематики маніпулятора:

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		24

$$q_3(t_k) = f^t[x_{p3}(t_k)] \quad (1.1)$$

Такі завдання подаються у вигляді послідовності приростів відносних координат:

$$\Delta q_3 = q_3(t_k) - q_3(t_{k-1}) \quad (1.2)$$

та часу виконання кожного кроку:

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1} \quad (1.3)$$

В результаті виконання всіма приводами чергового кроку робочий орган маніпулятора переміщується до наступної точки дискретної програмної траєкторії з визначеною орієнтацією[11].

На відміну від управління окремими приводами, при одночасному керуванні всіма приводами необхідно враховувати їх взаємний вплив через загальну механічну систему маніпулятора, на яку вони впливають. Оскільки йдеться про програмне управління, це взаємне впливання можна врахувати через корекцію програм і налаштування систем управління приводів.[3]

Проаналізуємо, як залежить взаємний вплив приводів від характеру їх відносного руху і як можна мінімізувати цей вплив корекцією рухів. На рис 1.10 двовимірна дискретна траєкторія, що реалізується двома приводами за координатами.

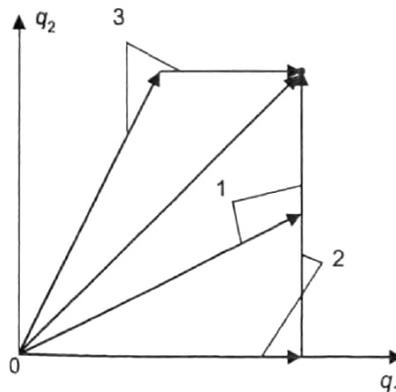


Рисунок 1.10 двовимірна дискретна траєкторія, що реалізується двома приводами

Якщо збільшується швидкість першого приводу відносно другого, траєкторія опускається до ламаної лінії. При збільшенні швидкості другого приводу траєкторія піднімається. Мінімальна довжина траєкторії досягається при пропорційному розподілі швидкостей приводів, що забезпечує їх одночасне завершення руху.

У динаміці, коли приводи гальмують одночасно, взаємний вплив також мінімальний. Проте, якщо один привод починає гальмування раніше іншого, можливі порушення позиціонування через збурення, викликані нерівномірним гальмуванням. Щоб мінімізувати взаємний вплив приводів при позиціонуванні, варто під час програмування встановлювати швидкості пропорційно до запланованих переміщень.

Однак цей аналіз не враховує інерційність приводів. Вплив інерційності та відмінності в динамічних характеристиках приводів можуть призвести до перевищення меж траєкторії, що показано на графіках На рис 1.11 Тому для забезпечення одночасного гальмування приводів може знадобитися корекція програмних швидкостей, що відрізняються від пропорційних переміщень.

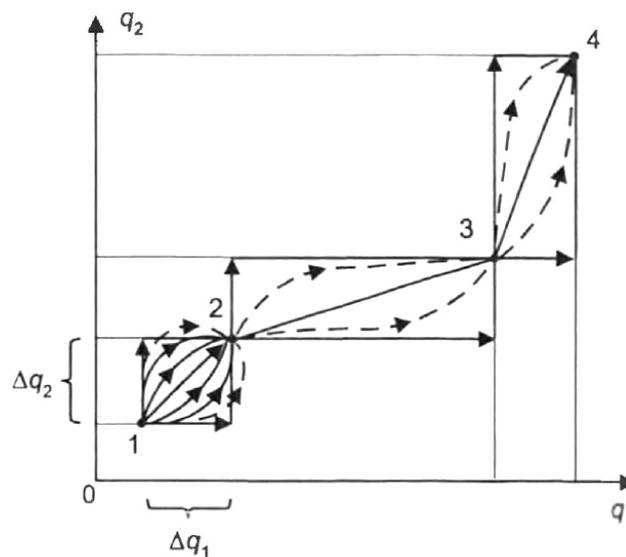


Рисунок 1.11 Вплив інерційності та перевищення меж траєкторії

У випадку мінімізації взаємного впливу система програмного управління маніпулятором може розглядатися як набір автономних систем управління окремими приводами. Якщо під час комп'ютерного моделювання виявляється суттєвий взаємовплив приводів, його можна компенсувати перехресними корекційними зв'язками.

1.7.2 Циклічне управління приводами маніпуляторів

Спільне циклічне управління приводами маніпуляторів. Особливістю спільного управління приводами маніпуляторів є необхідність врахування їх взаємного впливу. Розглянемо це явище для циклічного управління на прикладі маніпулятора з циліндричною системою координат, типової для роботів з таким управлінням. Як було з'ясовано раніше, у такому маніпуляторі має місце взаємний вплив приводів обертання φ і висунення r . На координату r діє відцентрова сила, пропорційна швидкості $\dot{\varphi}$, а на координату φ — коріолісова сила, пропорційна зворотному знаком добутку $\dot{\varphi}$ і r . У результаті, при одночасному обертанні колони маніпулятора і висуненні його стріли відцентрова сила буде прискорювати висунення по r , а коріолісова сила — сповільнювати обертання φ .

З цього випливає, що для підвищення швидкодії при виконанні маніпулятором такого спільного руху, привід стріли потрібно включати якомога пізніше включення приводу обертання колони. У цьому випадку буде максимальний ефект прискорення висунення стріли за рахунок відцентрової сили і мінімальне гальмування обертання колони коріолісовою силою. Іншими словами, умовою максимального швидкодії в цьому випадку буде початок руху по r з подальшим включенням приводу r з затримкою в часі, що забезпечує одночасне завершення обох рухів. При виконанні спільного руху приводів (коли координата r повинна зменшуватися), алгоритм оптимального спільного управління цими приводами буде відповідно іншим[20]. У цьому випадку слід, навпаки, максимально затримати початок обертання колони

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		27

відносно руху стріли. Що стосується приводу підйому z , то, оскільки між ним і приводами φ та γ взаємний вплив відсутній, момент його включення, коли потрібне рух і по z , повинен вибиратися з дотриманням однієї умови: цей рух має завершитися до моменту завершення рухів двох інших приводів, не збільшуючи загальну тривалість циклу руху маніпулятора. Розглянемо тепер особливості оптимального з точки зору швидкодії спільного управління двома подібними маніпуляторами. Нехай це буде, наприклад, операція обслуговування роботом преса холодного штампування рис. 1.12.

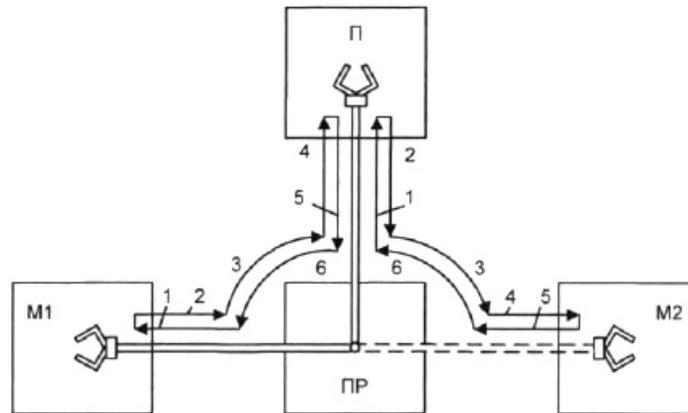


Рисунок 1.12 операція обслуговування роботом преса холодного штампування

Робот ПР лівим маніпулятором бере чергову заготовку з магазину М1 і кладе її в прес. Одночасно правий маніпулятор робота виймає з преса відштамповане виробу і кладе його в магазин М2. При цьому, як показано на рис. 1.12, приводи кожного маніпулятора здійснюють шість рухів:

1. Висунення і захоплення об'єкта маніпулювання.
2. Втягання.
3. Поворот за годинниковою стрілкою.
4. Висунення з звільненням об'єкта.
5. Втягання.
6. Поворот проти годинникової стрілки в початкову позицію.

Одночасно в крайніх позиціях зазвичай вимагається вертикальне переміщення маніпуляторів. Синтез керуючих програм для систем циклічного управління зводиться до визначення величин оптимальних витримок часу між моментами включення приводів і відповідних значень мінімального часу всього циклу роботи при виконанні конкретної технологічної операції. Це здійснюється за допомогою комп'ютерного моделювання на основі математичного опису динаміки маніпуляторів робота. При цьому варіюється величина затримки включення приводів і обчислюється тривалість всього циклу роботи робота. У результаті знаходяться залежність тривалості циклу від величини затримки та оптимальне значення такої затримки, що відповідає мінімальній тривалості циклу.

1.7.3. Безперервне управління приводами маніпулятора

Це другий рівень управління маніпуляторами, основне завдання якого — координація його приводів для забезпечення руху робочого органа маніпулятора за заданою траєкторією. У випадку безперервного руху це завдання для системи безперервного управління маніпулятором значно складніше, ніж у системах дискретного позиційного управління, оскільки тут необхідно контролювати не тільки положення робочого органа, але й вектор його швидкості, щоб забезпечити необхідну точність його руху за програмною траєкторією.

Алгоритм спільного управління приводами залежить від алгоритмів управління окремими приводами. Якщо приводи мають робастні системи управління, функція рівня спільного управління зводиться до мінімуму — до видачі на приводи програмних траєкторій. Синтез самих цих траєкторій здійснюється на етапі програмування (аналітично, в даному випадку — через розв'язання зворотної задачі кінематики, або експериментально — методами навчання).

Якщо приводи неробастні, але в них передбачена динамічна корекція програмного руху, що дозволяє подавати на них завдання у вигляді програмної траєкторії $q_{i3}(t)$, функція рівня спільного управління доповнюється лише задачею загальної корекції та компенсації взаємного впливу приводів. Те ж стосується й випадку, коли в приводах немає зазначеної динамічної корекції, а вона вводиться в керуючу програму[18].

Нарешті, якщо немає і останнього, функція другого рівня управління доповнюється здійсненням динамічної корекції всієї системи приводів. Розглянемо цей найбільш загальний випадок, тобто способи корекції на загальносистемному рівні, і опишемо способи послідовної корекції за допомогою зворотних зв'язків, які раніше були розглянуті для окремого приводу. Вихідними змінними тут відповідно є вектор положення робочого органа x_r або кінематично зв'язаний з ним вектор $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ і вектор зусилля на робочому органі Q_r .

1.8 Майбутні тенденції у розвитку роботизованих маніпуляторів

Технологічні інновації розширюють сферу застосування роботизованих маніпуляторів. Це також означає, що маніпуляторний механізм автоматизує завдання з дедалі більшою точністю, стабільністю та складністю.

Ще одним важливим напрямком розвитку є збільшення кількості компонентів і виконавчих механізмів (end effectors), які можна інтегрувати в роботизовану руку залежно від автоматизованого завдання. На ринку вже представлено широкий вибір таких рішень.

Тренди в індустрії свідчать про стабільне зростання використання колаборативних мобільних маніпуляторів, що стають ще більш актуальними завдяки їхній універсальності, гнучкості та безпечності.

Таким чином, мобільні роботи-маніпулятори забезпечують низку вагомих переваг з точки зору операційної ефективності, якості продукції та безпеки на робочому місці. Їхня здатність виконувати повторювані завдання з

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

високою точністю робить їх цінними активами у виробничих середовищах із підвищеними вимогами. Крім того, інтеграція передових сенсорів та систем машинного зору дозволяє виявляти й виправляти помилки в реальному часі, що суттєво знижує рівень браку та пов'язані з цим витрати. З точки зору безпеки, роботизовані маніпулятори можуть виконувати небезпечні або монотонні завдання, захищаючи працівників від травм і покращуючи умови праці. З наближенням епохи Індустрії 4.0 очікується, що попит на роботизовані маніпулятори продовжить зростати, особливо в таких галузях, як автомобільна промисловість, електроніка та логістика. Завдяки постійному розвитку матеріалів, механічного дизайну та систем керування, роботизовані маніпулятори відіграватимуть ще важливішу роль в оптимізації виробничих процесів, створюючи більш безпечні та ефективні робочі середовища.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		31

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДВОЛАНКОВОГО МАНІПУЛЯТОРА

Розглядається нелінійна задача керування рухом дволанкового маніпуляційного робота. Вільна механічна система має два перших інтеграли, які перебувають в інволюції. Для аналітичної інтеграції системи нелінійних диференціальних рівнянь використано методи класичної механіки.

Визначається траєкторія, що з'єднує початкове та кінцеве положення дволанкового маніпуляційного робота у просторі конфігурацій. Імпульсні керуючі дії в початковий момент часу надають роботу необхідну енергію для виходу на цю траєкторію. Для гасіння швидкостей робота в кінцевому положенні також застосовуються імпульсні керування[19].

Під час комп'ютерного моделювання запропонованої процедури переміщення робота узагальнені імпульсні керування апроксимуються прямокутними імпульсами.

2.1 Короткий опис задачі, сутності проблеми, методів дослідження

Дволанковий маніпулятор є важливою складовою багатоланкових маніпуляторів антропоморфного типу. У таких системах два основні ланки «руки» — плече та передпліччя — значно перевищують за розмірами інші елементи, що утворюють «кисть». Основні ланки забезпечують транспортні рухи, тоді як ланки кисті визначають орієнтацію захопленого об'єкта. Розглядається дволанковий маніпулятор, який складається з двох абсолютно твердих тіл, що здійснюють плоскопаралельний рух (рис. 2.1). Перше тіло за допомогою циліндричного шарніра O з'єднане з нерухомою основою, а друге — за допомогою шарніра O_1 — з першим тілом. На кінці другого тіла в точці O_2 розміщено захоплювач, у якому фіксується переміщуваний об'єкт (вантаж).

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Лінійні розміри захоплювача та вантажу вважаються малими порівняно з довжиною ланок, тому під час дослідження транспортних рухів систему можна вважати матеріальною точкою. Маніпулятор має два незалежні приводи, розташовані у шарнірах O та O_1 , які створюють керуючі моменти M_1 та M_2 . Нехай координати захоплювача у декартовій системі — x та y . Закон руху визначається функціями $x(t)$ та $y(t)$. У початковий момент часу $t = 0$ захоплювач перебуває в положенні $x(0) = x_0$, $y(0) = y_0$ із нульовими швидкостями $\dot{x}(0) = 0$, $\dot{y}(0) = 0$. Необхідно перемістити його у момент часу $t = T_k$ до положення $x(T_k) = x_t$, $y(T_k) = y_t$ із нульовою швидкістю $\dot{x}(T_k) = 0$, $\dot{y}(T_k) = 0$. Задача керування полягає у знаходженні програмних законів зміни моментів $M_1(t)$ та $M_2(t)$, що забезпечують переведення захоплювача маніпулятора з початкового положення рівноваги у задане кінцеве.

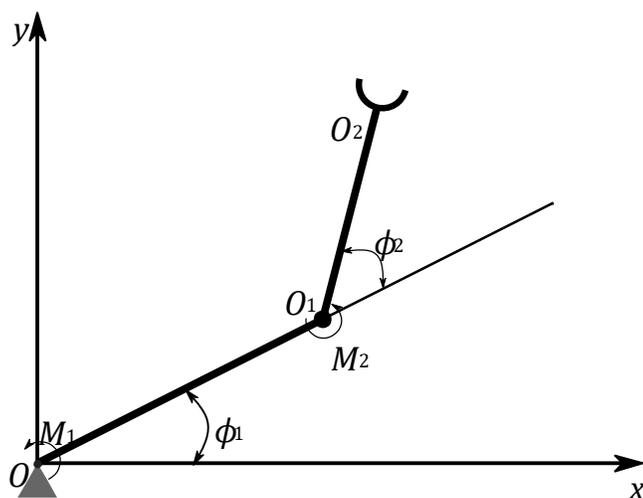


Рисунок 2.1 Дволанковий маніпулятор

Основними критеріями ефективності функціонування є:

- час виконання транспортної операції;
- енергетичні витрати;
- точність досягнення кінцевого положення.

2.2 Траєкторії руху маніпуляційного робота

Для опису руху маніпуляційного робота, зображеного на рис. 2.1, зручно використовувати узагальнені координати — кути φ_1 і φ_2 .

- φ_1 — кут між віссю Ox нерухомої системи координат і прямою OO_1 , що з'єднує циліндричні шарніри, визначає рух першої ланки маніпулятора.

- φ_2 — кут між прямими OO_1 і O_1O_2 , що з'єднує другий шарнір із захоплювачем, визначає відносний рух другої ланки відносно першої.

Елементарна робота сил на віртуальних переміщеннях визначається формулою:

$$\delta A = M_1 \delta \varphi_1 + M_2 \delta \varphi_2 \quad (2.1)$$

де M_1 , і M_2 — узагальнені сили.

Декартові координати захоплювача:

$$x = L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos (\varphi_1 + \varphi_2), \quad y = L_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin (\varphi_1 + \varphi_2)$$

де $L_1 = |OO_1|$ - довжина першої ланки, $L_2 = |O_1O_2|$ - довжина другої ланки.

Припускаємо, що $L_2 < L_1$.

Робоча зона маніпулятора визначається нерівністю:

$$L_1 - L_2 \leq \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \leq L_1 + L_2 \quad (2.2)$$

Для спрощення аналітичного інтегрування використовують полярні координати:

$$x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi \quad (2.3)$$

У полярних координатах узагальнені сили визначаються відповідними формулами .

$$M_{\varphi} = M_1 \quad (2.4)$$

$$M_r = \frac{r^2(M_1 - 2M_2) - (L_1^2 - L_2^2)M_1}{r\sqrt{(r^2 - (L_1 - L_2)^2)((L_1 + L_2)^2 - r^2)}} \quad (2.5)$$

Детальні доведення та взаємозв'язки між старими (φ_1, φ_2) та новими r, φ координатами

Для подальшого аналізу обмежимося безінерційним маніпулятором, коли маса маніпулятора значно менша за масу вантажу $m \ll M$. Вся маса системи зосереджена в точці O_2 . Рух відбувається у горизонтальній площині, тому потенціальна енергія робота постійна.

Кінетична енергія системи визначається формулами

$$T = \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = \frac{m}{2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2) \quad (2.6)$$

Узагальнені імпульси — формулами

$$P_r = \frac{\partial T}{\partial \dot{r}} = m\dot{r} \quad (2.7)$$

$$P_{\varphi} = \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = mr^2\dot{\varphi} \quad (2.8)$$

Функція Гамільтона:

$$H = H(r, \varphi, p_r, p_{\varphi}) = T | (\dot{r}, \dot{\varphi}) \rightarrow (p_r, p_{\varphi}) = \frac{1}{2m} \left(p_r^2 + \frac{1}{r^2} p_{\varphi}^2 \right) \quad (2.9)$$

Система канонічних рівнянь Гамільтона має вигляд:

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		35

$$\dot{r} = \frac{1}{m} p_r \quad (2.10)$$

$$\dot{\phi} = \frac{1}{mr^2} p_\phi \quad (2.11)$$

$$\dot{p}_r = \frac{1}{mr^3} p_\phi^2 + M_r \quad (2.12)$$

$$\dot{p}_\phi = M_\phi \quad (2.13)$$

Вона суттєво нелінійна. Для її дослідження застосовуються методи інтегрування гамільтонових систем, які мають чотири незалежні перші інтеграли.

$$\dot{r} = \frac{1}{m} p_r \quad (2.14)$$

$$\dot{\phi} = \frac{1}{mr^2} p_\phi \quad (2.15)$$

$$\dot{p}_r = \frac{1}{mr^3} p_\phi^2 \quad (2.16)$$

$$\dot{p}_\phi = 0 \quad (2.17)$$

Застосування методу Ейлера дозволяє обчислити функцію Гамільтона–Якобі (1.8) та отримати явні форми додаткових перших інтегралів (1.6, 1.7). Нехай задані початкове положення r_0 , ϕ_0 та кінцеве r_T , такі що $r_0 \neq r_T$. Тоді траєкторія, що з'єднує початкове і кінцеве положення, визначається формулою:

$$|\arctg(rp + \sqrt{r^2 p^2 - 1}) - \arctg(r_0 p + \sqrt{r_0^2 p^2 - 1})| = \frac{1}{2} |\phi - \phi_0| \quad (2.18)$$

де параметр p задовольняє умову:

$$|\arctg(r_T p + \sqrt{r_T^2 p^2 - 1}) - \arctg(r_0 p + \sqrt{r_0^2 p^2 - 1})| = \frac{1}{2} |\varphi_T - \varphi_0| \quad (2.19)$$

Формула задає закон руху вантажу по траєкторії в координатному просторі.

$$T_k = \frac{m |\sqrt{r_T^2 p^2 - 1} - \sqrt{r_0^2 p^2 - 1}|}{p^2 |p_\varphi^0|} \quad (2.20)$$

2.3 Оптимізація руху дволанкового маніпулятора

Перейдемо до постановки задачі керування для системи канонічних рівнянь. Припустимо, що в початковий момент часу $t=0$ вантаж перебуває в положенні

$$r(0)=r_0 \in [L_1-L_2, L_1+L_2], \varphi(0)=\varphi_0 \in [0, \pi],$$

і має нульові узагальнені імпульси $p_r(0)=0, p_\varphi(0)=0$.

Потрібно забезпечити його переміщення у кінцеве положення

$$r(T_k)=r_T \in [L_1-L_2, L_1+L_2], \varphi(T_k)=\varphi_T \in [0, \pi],$$

де також $p_r(T_k)=0, p_\varphi(T_k)=0$.

Таким чином, задача керування для системи полягає у знаходженні програмних законів зміни керуючих моментів $M_1(t), M_2(t)$ які забезпечують переведення вантажу з початкового положення рівноваги у кінцеве.

За відсутності керуючих моментів початковий і кінцевий стани системи є положеннями рівноваги. Тому без зовнішніх дій перехід між ними неможливий. Покажемо, що зовнішні впливи на систему можна звести до передачі їй імпульсів у початковий та кінцевий моменти часу.

Розглянемо клас програмних керувань, що визначаються виразами

$$M_1(t) = S_1^0 \delta(t) + S_1^T \delta(T_k - t) \quad (2.21)$$

$$M_2(t) = S_1^0 \delta(t) + S_1^T \delta(T_k - t) \quad (2.22)$$

де $\delta(t)$ - функція Дірака.

Якість роботи маніпуляційного робота визначається часом переходу з початкового в кінцеве положення рівноваги та енергетичними витратами на цю операцію.

Введемо показник якості у вигляді:

$$J(M_1, M_2) = E(M_1, M_2) + k T_k(M_1, M_2),$$

де $E(M_1, M_2)$ - енергія, необхідна для переходу, $T_k(M_1, M_2)$ - час переходу, k - ваговий коефіцієнт.

У класі допустимих імпульсних керувань потрібно знайти такі M_1^0 , M_2^0 , для яких функціонал приймає мінімальне значення.

У класі імпульсних керувань оптимальні керування, що реалізують переведення системи із початкового положення рівноваги у кінцеве, визначаються виразами

$$M_1^0(t) = |p_\varphi^0| \operatorname{sign}(\varphi_T - \varphi_0) (\delta(t) - \delta(T_k - t)) \quad (2.23)$$

$$M_2^0(t) = \frac{|P_\varphi^0|}{2} \operatorname{sign}(\varphi_T - \varphi_0) (\delta(t) (1 - (L_1^2 - L_2^2) r_0^{-2}) - \delta(T_k - t) (1 - (L_1^2 - L_2^2) r_T^{-2})) + \frac{|P_\varphi^0|}{2} \operatorname{sign}(r_T - r_0) (\delta(T_k - t) r_T \sqrt{(p^2 - r_T^{-2}) (1 - (L_1 - L_2)^2 r_T^{-2}) ((L_1 + L_2)^2 r_T^{-2} - 1)} - \delta(t) r_0 \sqrt{(p^2 - r_0^{-2}) (1 - (L_1 - L_2)^2 r_0^{-2}) ((L_1 + L_2)^2 r_0^{-2} - 1)}) \quad (2.24)$$

де параметр p^0 фр визначається формулою

$$|p_\varphi^0| = \left(\frac{km^2}{2p^4} \left| \sqrt{r_T^2 P^2 - 1} - \sqrt{r_0^2 P^2 - 1} \right| \right)^{1/3} \quad (2.25)$$

2.4 Чисельне моделювання рухів маніпулятора

Під час чисельного моделювання системи використовувалися такі значення параметрів: $m = 1$, $L_1 = 0,5$, $L_2=1,2$ Початкове положення визначалося координатами r_0, φ_0 , а кінцеве — координатами r_T, φ_T .

Для знаходження оптимальних імпульсних керувань використовувалися формули, наведені у формулюванні теореми 2.1. Ідеальні імпульсні керування апроксимувалися прямокутними імпульсами.

Основні результати чисельного моделювання наведені в таблиці 1.

Відповідним постановкам задач із таблиці відповідають пронумеровані траєкторії руху механічної системи на площині (x,y) (x,y) , зображені на рис. 2

Таблиця 1. Результати чисельного моделювання

№	(r_0, φ_0)	(r_T, φ_T)	k	p_φ	$T_k(M_1, M_2)$	$E(M_1, M_2)$	$J(M_1, M_2)$
1	(1,3, 0)	(1,65, $\pi/5$)	0,25	3	0,42	5,332	5,437
				0,643 *	1,96	0,245	0,735
				0,6	2,101	0,213	0,739
2	(0,75, $\pi/6$)	(1,5, $\pi/2$)	1	1	0,974	1,778	2,752
				0,65 *	1,5	0,75	2,25
				0,5	1,949	0,444	2,393
3	(0,75, $\pi/3$)	(1,65, $2\pi/3$)	1,25	1	1,072	1,783	3,123
				0,722 *	1,486	0,928	2,785
				0,5	2,143	0,446	3,125

* — оптимальне керування для заданого вагового коефіцієнта k .

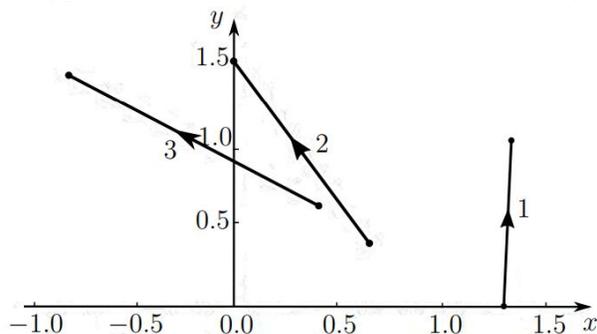


Рисунок 2.2 Проекції траєкторій руху системи на площину (x,y) .

У даному розділі роботи представлено імпульсні керування, які дозволяють переводити маніпулятор із заданого початкового положення рівноваги в кінцеве положення рівноваги. Запропоновано оптимальне значення імпульсу, що мінімізує критерій якості, який враховує як час роботи маніпулятора, так і енергетичні витрати під час виконання руху. Проведені чисельні обчислення підтвердили ефективність запропонованого методу імпульсного керування. При заміні ідеальних імпульсів на прямокутні система переходить до релейних програмних керувань. Запропонований у роботі підхід планується застосувати для визначення програмних імпульсних керувань інерційного маніпуляційного робота.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ

3.1. Опис електромеханічної частини промислового робота-маніпулятора

На рисунку 3.1 подано тривимірну модель макета.

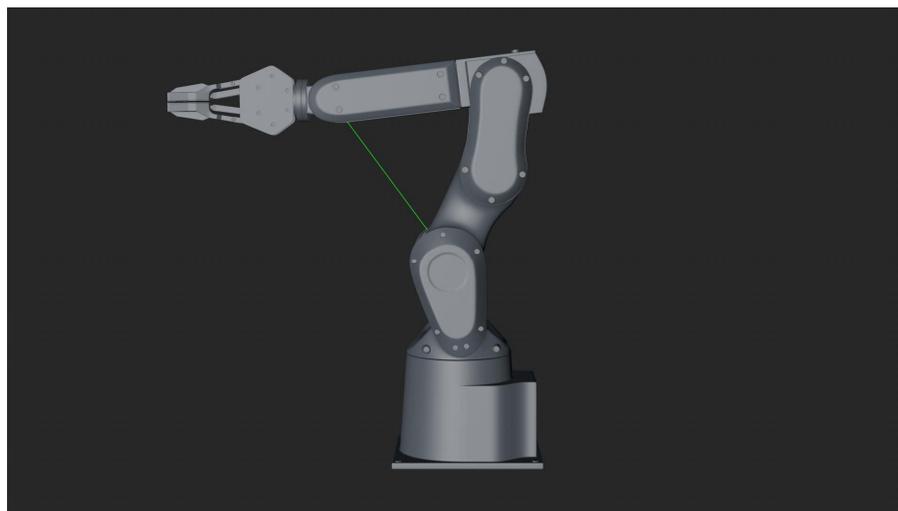


Рисунок 3.1 – 3D-модель макета промислового робота-маніпулятора з відображенням елементної бази

На наведеному зображенні сервісний модуль та блок живлення не показані. У ролі виконавчих механізмів застосовуються сервоприводи. Основою конструкції є жорстка металева платформа, яка слугує опорою та забезпечує стійкість усієї системи. До неї приєднані секції руки робота — плече, передпліччя та зап'ястя, що разом формують робочу частину маніпулятора. Елементи руки виготовлені з легких та міцних матеріалів, що дозволяє досягти оптимального співвідношення між вагою та міцністю. Кожна секція з'єднана за допомогою сервоприводів, які забезпечують точне керування рухами та плавність переміщення в потрібних напрямках.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ

Арк.

41

Монтаж сервоприводів і окремих частин маніпулятора здійснюється через стандартні кріпильні отвори та гвинтові з'єднання, що гарантує надійність конструкції й зручність її складання. Всі механічні вузли спроектовано таким чином, щоб зменшити люфти та забезпечити максимальну жорсткість під час роботи робота-маніпулятора.

3.2 Структурна схема системи керування промислового робота-маніпулятора

На рисунку 3.2 наведено структурну схему системи керування роботом-маніпулятором.

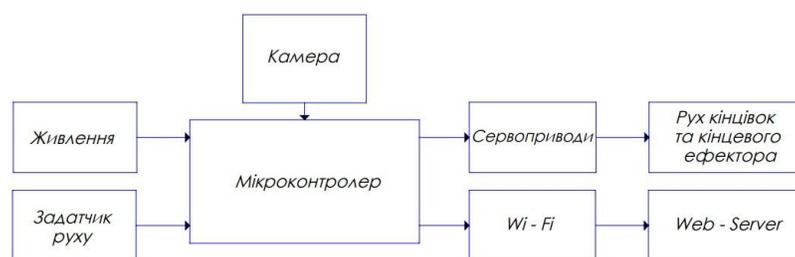


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи керування робота-маніпулятора

Подана схема відображає принцип роботи системи керування маніпулятора. Від блока живлення на понижувальний перетворювач подається напруга 12 В. Перетворювач знижує її до 5 В, необхідних для живлення потенціометрів, мікроконтролера та сервоприводів.

Сигнали з потенціометрів надходять на мікроконтролер, який здійснює їх обробку та формує керуючі команди для сервоприводів. Останні забезпечують рух окремих ланок маніпулятора та кінцевого ефектора.

Наступним етапом роботи системи є передавання інформації від мікроконтролера до Wi-Fi модуля. Живлення для цього модуля становить 3.3 В і подається безпосередньо від мікроконтролера. Далі сформований сигнал через Wi-Fi модуль надходить на WEB-сервер, що забезпечує можливість дистанційного моніторингу та керування роботизованою системою.

3.3. Вибір елементної бази системи керування макета робота-маніпулятора

3.3.1. Сервоприводи

Сервопривід - це спеціалізований електромеханічний вузол, призначений для керування положенням, швидкістю або зусиллям виконавчого механізму відповідно до заданих команд. До його складу входить двигун, датчик зворотного зв'язку та електронний блок керування, який забезпечує точне підтримання параметрів роботи.

Нижче наведено найбільш поширені типи сервоприводів, що застосовуються у робототехнічних системах. Під час вибору серводвигунів враховують ключові характеристики: величину крутного моменту, швидкодію, масогабаритні параметри та максимально допустимий струм живлення.

HS-422. Сервопривід середнього класу від компанії Hitec. Модель має пластикові шестерні та стандартні розміри, завдяки чому широко використовується в навчальних і дослідницьких робототехнічних комплексах. Перевагами є прийнятна точність і стабільність роботи. Недоліком є менша міцність пластикових передач та обмежений крутний момент, що ускладнює застосування в системах із підвищеним навантаженням.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

MG996R. Потужний сервопривід із металевими шестернями, який здатний забезпечувати високий крутний момент. Модель характеризується підвищеною довговічністю та стійкістю до значних навантажень, тому часто використовується у промислових та експериментальних роботах. Основні недоліки — підвищене енергоспоживання та вища ціна у порівнянні з аналогами на пластикових шестернях.

TowerPro MG995. Сервопривід, близький за характеристиками до MG996R, однак із трохи нижчим крутним моментом. Завдяки металевим шестерням він має достатній запас міцності, але іноді спостерігається нестабільна якість між партіями, що може впливати на точність та довговічність при роботі.

TowerPro SG90. Компактний мікросервопривід із пластиковими шестернями, який застосовується у легких конструкціях, де не потрібна велика сила. Його основними перевагами є низька вартість, малі габарити та вага. Водночас його можливості обмежуються мінімальним крутним моментом і меншою міцністю пластикових деталей, що не дозволяє використовувати його у навантажених вузлах. На рисунку 2.3 продемонстровано приклади зазначених сервоприводів.

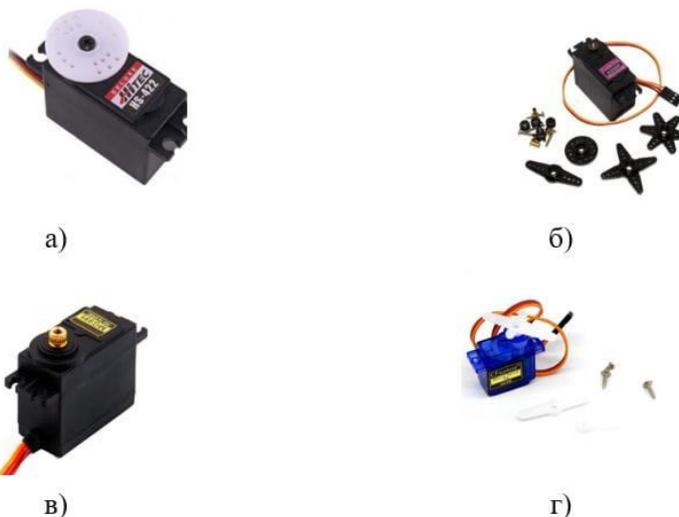


Рисунок 3.3 – Приклади сервоприводів: HS-422 (а), Megomoki MG996R (б), TowerPro MG995 (в), TowerPro SG90 (г)

У таблиці 3.1 подано основні технічні параметри вибраних моделей:
HS-422, Megomoki MG996R, TowerPro MG995, TowerPro SG90.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики сервоприводів

Назва сервопривода	HS-422	Megomoki MG996R	TowerPro MG995	TowerPro SG90
Робоча напруга	4.8 - 6.0 В	4.8 - 7.2 В	4.8 - 7.2 В	4.8 - 6.0 В
Крутний момент	3.7 кг/см(4.8 В)	11 кг/см (4.8 В)	10 кг/см (4.8 В)	1.8 кг/см (4.8 В)
	4.1 кг/см (6 В)	12 кг/см (6.6 В)		2.5 кг/см (6.0 В)
Швидкість	0.21 с/60° (4.8 В)	0.17 с/60° (4.8 В)	0.20 с/60° (4.8 В)	0.12 с/60° (4.8 В)
	0.16 с/60° (6.0 В)	0.13 с/60° (6.6 В)	0.16 с/60° (6.6 В)	0.10 с/60° (6.0 В)
Розміри	39.8 x 19.8 x 36.3 мм	40.7 x 19.7 x 42.9 мм	40.7 x 19.7 x 42.9 мм	23 x 12.2 x 29 мм
Кут повороту	180°	120° - 180°	120° -180°	180°
Вага	45.5 г	55 г	55 г	9 г
Максимальний струм	180 мА (В)	1.2 А (В)	1.2 А (В)	750 мА (5 В)

Проведений аналіз показує, що оптимальним варіантом для робота-маніпулятора є сервопривід Megomoki MG996R, оскільки він має високий крутний момент (до 12 кг/см), достатню швидкодію та високу механічну міцність. Такі характеристики забезпечують надійну роботу маніпулятора при виконанні складних рухових операцій.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ

Арк.

45

3.3.2 Платформа Arduino. Плати Arduino

Arduino - це апаратно-програмна платформа з відкритим кодом, призначена для швидкої розробки електронних пристроїв. Вона дозволяє зчитувати різноманітні сигнали з датчиків (освітленість, натискання кнопки, дані від мережевих сервісів тощо) та формувати відповідні керуючі дії — запуск двигунів, керування світлодіодами або передавання інформації через Інтернет. Програмування контролерів Arduino здійснюється за допомогою мови, що базується на Wiring, та середовища Arduino IDE, створеного на основі Processing.

Arduino Due - це одна з найпотужніших плат сімейства, виконана на мікроконтролері AT91SAM3X8E (архітектура ARM Cortex-M3). Плата оснащена 54 цифровими входами/виходами (12 з підтримкою ШІМ), 12 аналоговими входами, чотирма апаратними UART та USB OTG. Працює від напруги 3.3 В, що потребує використання узгоджувальних перетворювачів під час взаємодії з 5-вольтовими модулями.

Arduino Nano - компактна плата на базі ATmega328P, за функціональністю майже повністю відповідає Arduino Uno, але має менші габарити. Містить 14 цифрових входів/виходів (6 з можливістю ШІМ), 8 аналогових входів та живиться від 5 В. Використовується там, де важливий мінімальний розмір пристрою.

Arduino Mega 2560 - контролер з великою кількістю виводів, створений для проектів, що потребують розширених можливостей керування. Побудований на ATmega2560 та включає 54 цифрових входи/виходи, 16 аналогових входів і 4 апаратні послідовні порти. Підходить для складних систем із численними периферійними модулями.

Arduino Leonardo - плата, що працює на мікроконтролері ATmega32u4. Містить 20 цифрових входів/виходів (7 із підтримкою ШІМ) та 12 аналогових входів. Її особливість - вбудований USB-контролер, що

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		46

У таблиці 3.2 наведено порівняльні технічні характеристики наведених плат Arduino.

Таблиця 3.2 – Порівняльні технічні характеристики наведених плат Arduino

Параметр	Arduino Due	Arduino Nano	Arduino Mega 2560	Arduino Leonardo	Arduino Pro	Arduino UNO
Мікроконтролер	AT91SAM3X8E	ATmega328P	ATmega2560	ATmega32u4	ATmega328P	ATmega328P
Архітектура	ARM Cortex-M3	AVR	AVR	AVR	AVR	AVR
Робоча напруга	3.3 В	5 В	5 В	5 В	3.3 або 5 В	5 В
Цифрові входи/виходи	54 (12 ШІМ)	14 (6 ШІМ)	54 (15 ШІМ)	20 (7 ШІМ)	14 (6 ШІМ)	14 (6 ШІМ)
Аналогові входи	12	8	16	12	6	6
Швидкість такту	84 МГц	16 МГц	16 МГц	16 МГц	16 МГц	16 МГц
Флеш-пам'ять	512 КБ	32 КБ	256 КБ	32 КБ	32 КБ	32 КБ
SRAM	96 КБ	2 КБ	8 КБ	2.5 КБ	2 КБ	2 КБ
EEPROM	Немає	1 КБ	4 КБ	1 КБ	1 КБ	1 КБ
USB	1x Native, 1x Programming	Mini USB	USB Type B	Micro USB	Mini USB	USB Type B

На рисунку 3.5 наведено приклади різних моделей потенціометрів.

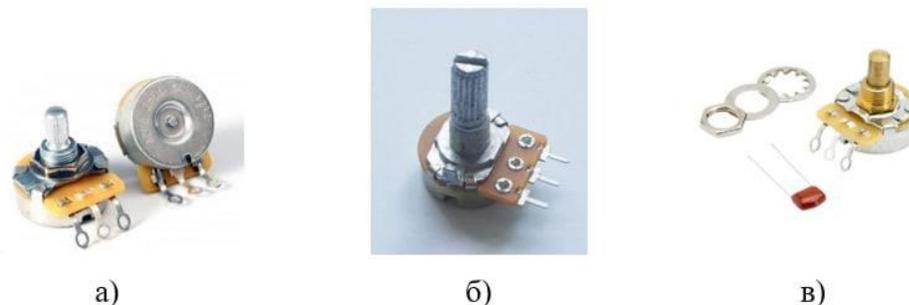


Рисунок 3.5 – Приклади потенціометрів: CTS 450G 10k (а), B250K (б), Fender 099-0833-000 (в)

У таблиці 3.3 представлені основні технічні характеристики потенціометрів CTS 450G, B250K та Fender 099-0833-000.

Таблиця 3.3. Технічні характеристики CTS 450G, B250K, Fender 099-0833-000

Параметр	CTS 450G	B250K	Fender 099-0833-00
Опір	10 kOm	250 kOm	250 kOm
Рівень напруги	750 В	230 В	250 В
Довжина валу	22.2 мм	20 мм	22 мм

Для керування сервоприводом робота-маніпулятора ключовими параметрами є опір потенціометра та допустима робоча напруга. Враховуючи ці характеристики, потенціометр B250K з опором 250 kOm та напругою 230 В є найбільш придатним варіантом серед розглянутих. Він забезпечує достатньо високий опір для точного керування та напругу, безпечну для застосування з сервоприводом.

3.3.4. Модулі на базі мікроконтролера ESP з камерою

Модуль ESP32 компанії Espressif Systems — це високопродуктивний мікроконтролер із вбудованими Wi-Fi та Bluetooth, який широко використовується у проектах IoT, автоматизації та робототехніки. ESP32-CAM - компактний модуль на базі ESP32 із вбудованою камерою для захоплення зображень і відео[21]. Підтримує Wi-Fi і Bluetooth, а також слот для microSD для зберігання даних. Модуль підходить для відеоспостереження, розпізнавання облич і віддаленого моніторингу. Основними перевагами є мала вартість і компактні розміри, але обмежений обсяг оперативної пам'яті може впливати на продуктивність у складних задачах. ESP-EYE модуль на базі ESP32 з камерою для проектів штучного інтелекту, таких як розпізнавання облич та голосові інтерфейси. Оснащений 2-мегапіксельною камерою, мікрофоном, 8 МБ PSRAM та 4 МБ флеш-пам'яті. Його переваги - висока продуктивність і можливості AI, однак вища вартість може бути обмежуючим фактором для бюджетних проектів. M5Stack ESP32 Camera Module - камера-модуль, інтегрований у платформу M5Stack, із підтримкою Wi-Fi, Bluetooth та microSD. Переваги включають зручність інтеграції з іншими модулями M5Stack і розширюваність. Обмежений обсяг оперативної пам'яті є типовим недоліком. TTGO T-Camera Plus ESP32 - багатофункціональний модуль з камерою, оснащений 1.3-дюймовим OLED-дисплеєм, датчиком руху PIR, мікрофоном та слотом для microSD. Основні переваги - багатофункціональність і наявність дисплея для відображення даних, що робить його зручним для проектів «розумного дому»[23]. Недоліками є складність налаштування для новачків та підвищене енергоспоживання через додаткові компоненти. На рисунку 2.6 наведено приклади модулів ESP32 з камерою.

					<i>ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		51

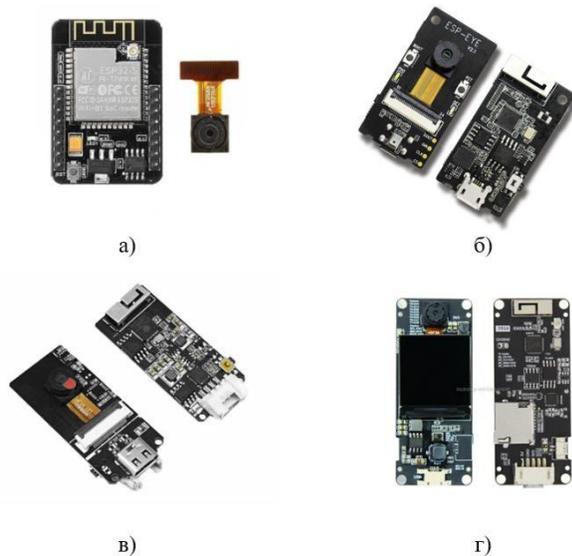


Рисунок 3.6 Приклади модулів на основі мікроконтролера ESP з камерою: ESP32-CAM (а), ESP-EYE (б), M5Stack ESP32 Camera Module (в), TTGO T-Camera Plus ESP32 (г) .

В табл.3.4 представлено технічні характеристики модулів на базі ESP32: ESP32-CAM, ESP-EYE, M5Stack ESP32 Camera Module, TTGO T-Camera Plus ESP32.

Таблиця 3.4 - Технічні характеристики модулів на базі ESP32: ESP32-CAM, ESP-EYE, M5Stack ESP32 Camera Module, TTGO T-Camera Plus ESP32

Модуль	ESP32-CAM	ESP-EYE	M5Stack ESP32 Camera Module	TTGO T-Camera Plus ESP32
Мікроконтролер	ESP32-D0WDQ6	ESP32-D0WD	ESP32	ESP32-D0WDQ6

Камера	OV2640, 2 Мп	OV2640, 2 Мп	OV2640, 2 Мп	OV2640, 2 Мп
Пам'ять	520 КБ SRAM, 4 МБ флеш- пам'яті	520 КБ SRAM, 4 МБ флеш- пам'яті	520 КБ SRAM, 4 МБ флеш- пам'яті	8 МБ PSRAM, 4 МБ флеш- пам'яті
Інтерфейси	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2, UART, SPI, I2C, PWM	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2, UART, SPI, I2C, PWM	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.0, UART, SPI, I2C	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2, UART, SPI, I2C, OLED Display, BME280 Sensor
Гнізда для розширення	microSD (до 4 ГБ)	N/A	N/A	microSD (до 16 ГБ)
Живлення	5 В – 3.3 В	5 В – 3.3 В	5 В	5 В
Розміри	27 x 40.5 мм	41 x 21 мм	54 x 54 x 16 мм	50 x 25 мм

Провівши порівняння технічних характеристик модулів на базі ESP32, ESP32-CAM виявився найбільш доцільним вибором для даного проекту. Його компактні розміри (27 × 40,5 мм) роблять модуль зручним для інтеграції в систему робота-маніпулятора. Модуль відрізняється економічною вартістю, що забезпечує вигідність його застосування. Серед важливих переваг — наявність слоту для картки microSD обсягом до 4 ГБ, що дозволяє зберігати велику кількість зображень та відео безпосередньо

									Арк.
									53
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ				

на платі. ESP32-CAM підтримує різноманітні інтерфейси: Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2, UART, SPI, I²C, PWM, що забезпечує гнучке підключення до різних сенсорів та периферійних пристроїв[27]. У порівнянні з іншими модулями, такими як ESP-EYE, M5Stack ESP32 Camera Module та TTGO T-Camera Plus ESP32, ESP32-CAM пропонує оптимальне поєднання компактності, функціональності та вартості, що робить його найдоцільнішим вибором для реалізації системи керування робота-маніпулятора.

3.3.5 Живлення системи. Блок живлення DELUX ATX-450W (P4)

Даний блок живлення є типовим представником бюджетних блоків живлення, які використовуються для стандартних настільних ПК.

На рис.3.7 представлено блок живлення DELUX ATX-450W (P4).



Рисунок 3.7 Блок живлення DELUX ATX-450W (P4)

В табл. 3.5 представлено технічні характеристики блоку живлення DELUX ATX-450W (P4).

Це поєднання компонентів забезпечує надійне та ефективне живлення робота-маніпулятора, що дозволяє йому працювати стабільно та виконувати складні операції з високою точністю.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

Таблиця 3.5 Технічні характеристики блоку живлення DELUX ATX-450W (P4)

Характеристика	Значення
Модель	DELUX ATX-450W (P4)
Форм - фактор	ATX
Максимальна потужність	450 Вт
Вхідна напруга	230 В
Частота	50-60 Гц
Вхідний струм	4А
+3 В Лінія	20 А
+5 В Лінія	30 А
12 В Лінія	18 А
-12 В Лінія	2.5 А
Охолодження	Вбудований вентилятор
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	Близько 70-75%
Габарити	158мм x 150 мм x 85 мм
Вага	1.45 кг

3.3.6. Понижуючі перетворювачі

Понижуючий перетворювач напруги призначений для зниження вхідної високої напруги до стабільного, безпечного рівня для живлення електронних компонентів. Основні складові перетворювача включають ключовий транзистор, діод, фільтр та навантаження. Енергія передається від джерела живлення до навантаження невеликими порціями, що забезпечує стабільність вихідної напруги[29].

Хоча такі перетворювачі зазвичай більші за розмірами та мають більші пульсації напруги у порівнянні з лінійними стабілізаторами, їх

головною перевагою є високий коефіцієнт корисної дії (ККД), що робить їх економічно та енергетично вигідними.

На рисунку 3.8 наведено приклади понижуючих перетворювачів напруги.

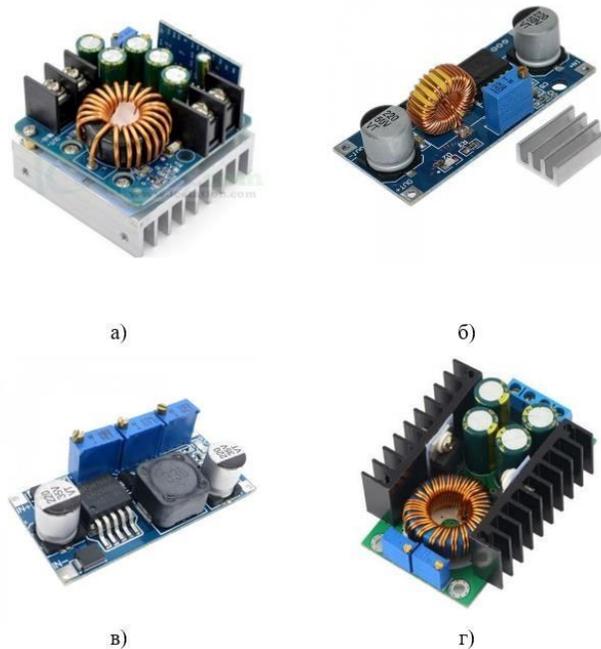


Рисунок 3.8 Приклади понижуючих перетворювачів: DC-DC 400W High Power Supply Step Down Module CVCC (а), XL4015 5A (б), LM2596S (в), 300W 9A 38V DC-DC (г)

В табл. 3.6 представлено технічні характеристики понижуючих перетворювачів: DC-DC 400W High Power Supply Step Down Module CVCC [49], XL4015 5A [50], LM2596S [51], 300W 9A 38V DC-DC [52]

Провівши порівняння технічних характеристик, для живлення системи обрано понижуючий перетворювач 300W 9A 38V DC-DC. Цей модуль є оптимальним вибором завдяки стабільній фіксованій вихідній напрузі та потужності 300 Вт. Для коректної роботи системи необхідний струм у межах 6–10 А, і обраний перетворювач повністю задовольняє ці вимоги, забезпечуючи надійне живлення компонентів робота-маніпулятора.

Таблиця 3.6 Технічні характеристики понижуючих перетворювачі

Характеристика	DC-DC 400W High Power Supply Step Down Module CVCC	XL4015 5A	LM2596S	300W 9A 38V DC-DC
Вхідна напруга	4.5 – 60 В	4 – 40 В	4 – 40 В	20 - 60 В
Вихідна напруга	0.8 – 60 В	0.8 – 38 В	0.5 – 37 В	0 – 38 В
Максимальний струм	40 А	5 А	3 А	9 А
ККД	>95%	>92%	>92%	>90%
Пульсації вихідної напруги	<50 мВ	<50 мВ	<30 мВ	<50 мВ
Частота перемикавання	150 кГц	180 кГц	150 кГц	100 кГц
Вага	250 г	50 Г	30 Г	200 Г
Розміри	100 x 65 x 30 мм	60 x 30 x 18 мм	40 x 23 x 17 мм	100 x 60 x 30 мм

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ

Арк.

57

3.4. Підключення елементної бази системи керування макета робота-маніпулятора

Перед початком підключення компонентів була створена загальна електрична схема в середовищі розробки EasyEDA. Креслення схеми наведено у додатку Б.

На рисунку 3.9 показано електричну схему підключення елементної бази системи керування робота-маніпулятора, яка ілюструє взаємозв'язок між сервоприводами, Arduino, ESP32, потенціометрами та понижуючим перетворювачем.

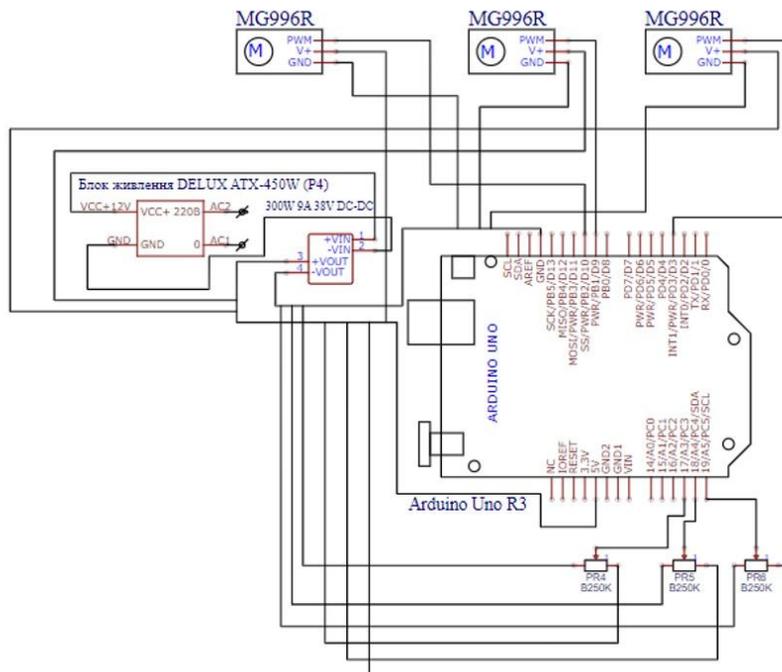


Рисунок 3.9 Електрична схема підключення системи керування робота-маніпулятора

Easy EDA - інтегроване програмне забезпечення для електронного проектування (EDA), яке дозволяє користувачам створювати електронні схеми, проектувати друковані плати (PCB) і моделювати електронні схеми

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

онлайн. Це рішення для спільного проектування, що підтримує командну роботу і обмін проектами. [22]

На першому етапі від блоку живлення DELUX ATX-450W (P4), було подано живлення 12 В на понижувач напруги 300W 9A 38V DC-DC на входи V INPUT + V INPUT - . Далі від понижувача напруги на макетну плату, з виходів V OUTPUT + та V OUTPUT - подається 5 В та земля GND відповідно. Далі від макетної плати на плату Arduino Uno подається напруга 5 В та земля GND. Оскільки підключення живлення було виконано, наступним кроком було підключення потенціометрів B250k до плати Arduino Uno. Потенціометри закріплювались на макетній платі за допомогою вбудованих пінів, сигнальні піни потенціометрів було приєднано на аналогові входи плати Arduino Uno A3-A5. На рис.2.10 представлено підключення сигнальних пінів потенціометрів B250k на аналогові входи плати Arduino Uno A3-A5.

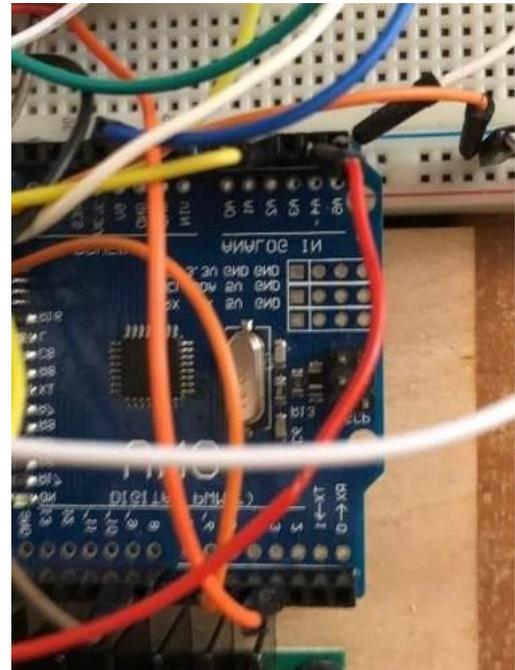


Рисунок 3.10 Підключення сигнальних пінів потенціометрів B250k на аналогові входи плати Arduino Uno A3-A5: вигляд 1(а), вигляд 2(б)

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ

Арк.

59

Живлення та земля на потенціометри подавалась з макетної плати. Після виконання даного кроку до плати Arduino UNO на цифрові піни D10, D6, D3, було підключено сигнальні піни сервоприводів MG996R, живлення 5 В та земля GND, була підключена до макетної плати на загальну землю GND та живлення 5В.

Після завершення підключення сервоприводів було проведено перевірку правильності підключення всіх компонентів системи керування та підготовлено систему до конструювання макета робота-маніпулятора.

3.5. Модернізація готової 3D-моделі макета робота-маніпулятора та конструювання системи керування в середовищі SOLIDWORKS

3.5.1. Модернізація готової 3D-моделі макета робота-маніпулятора

SOLIDWORKS — це сучасне програмне забезпечення, яке використовується інженерами для створення 3D-моделей, проведення аналізу конструкцій та підготовки їх до виробництва. Інструмент дозволяє підвищити точність розробок, пришвидшити процес конструювання та полегшити співпрацю між спеціалістами. SOLIDWORKS широко застосовується у машинобудуванні, авіаційній та космічній промисловості, автомобільному виробництві, дизайні та інженерних проєктах . Модернізація 3D-моделі макета робота-маніпулятора виконувалась на базі вже існуючої конструкції . На рисунку 3.12 показано 3D-модель макета робота-маніпулятора.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

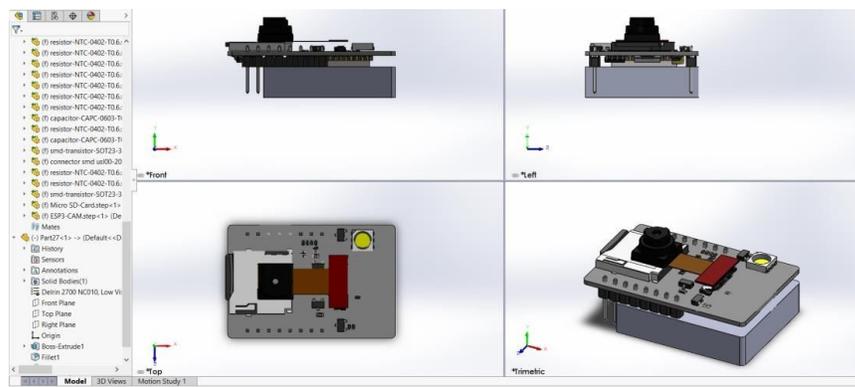


Рисунок 3.14 – Результат з’єднання кріплення з модулем ESP32-CAM

Після об’єднання кріплення з модулем конструкцію було прикріплено до кінцевого ефектора робота-маніпулятора. З’єднання здійснювалось із використанням вбудованих прив’язок SOLIDWORKS: паралельної прив’язки компонентів та прив’язки співпадіння[25].

На рисунку 3.15 показано результат інтеграції ESP32-CAM із кінцевим ефектором робота-маніпулятора.

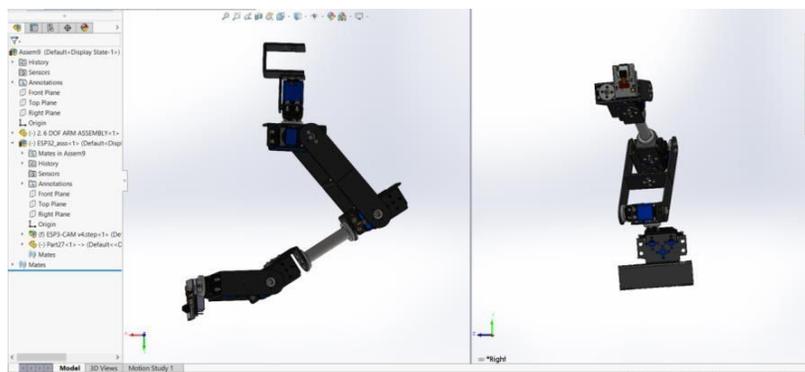


Рисунок 3.15 – Результат підключення ESP32-CAM до кінцевого ефектора робота-маніпулятора.

Після монтажу конструкції було виконано перевірку на коректність зібрання та відповідність всіх компонентів проектним вимогам.


```

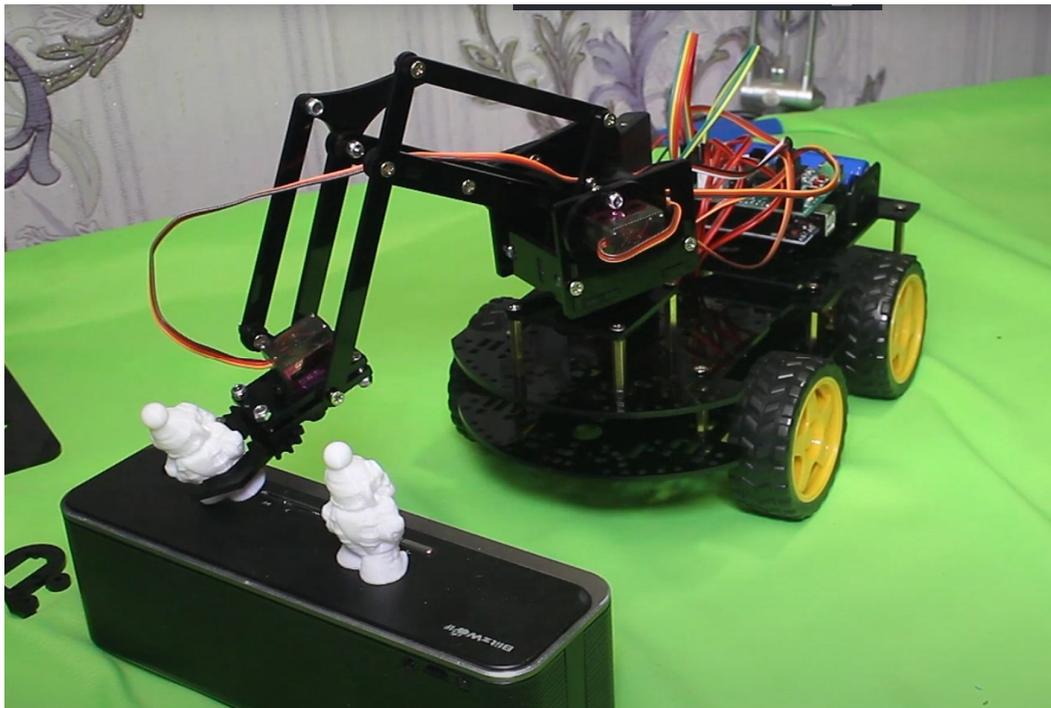
62
63     controlMotors(speed, turn);
64     smoothServoMove(servoA0, servoPosA0, servoControlA0);
65         smoothServoMove(servoA2, servoPosA2, servoControlA2);
66         smoothServoMove(servoA3, servoPosA3, servoControlA3);
67         smoothServoMove(servoA4, servoPosA4, servoControlA4);
68     }
69 }

```

На рисунку 4.5 наведено приклад виклику функції smoothServoMove().

Завершальна частина програми містить перевірку, чи пройшов встановлений часовий інтервал (printInterval) з моменту попереднього виведення даних. Якщо умова виконується, оновлюється значення змінної lastPrintTime, а в серійну консоль надсилаються значення потенціометрів та відповідні цільові кути сервоприводів. Такий механізм дозволяє уникнути надмірної кількості повідомлень у консолі та полегшує процес налагодження.

4.2 Демонстрація роботи та валідація керування



Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

На рисунку 4.6 показано макет робота-маніпулятора

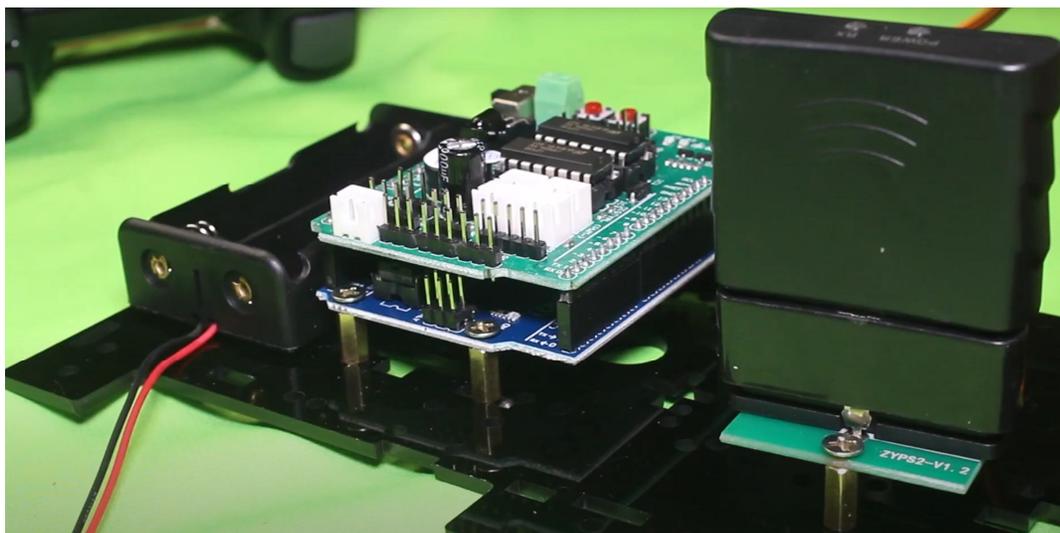


Рисунок 4.7 Під'єднаний макет робота-маніпулятора до блоку живлення

Модуль ESP32-CAM, встановлений на кінцевому ефекторі, передає відеосигнал з камери OV2640 на стрімінговий веб-сервер, доступний за локальною IP-адресою.

Мініатюрний модуль ширококутної камери OV2640 з кутом огляду 160° та роздільною здатністю 2 Мп, який використовується у складі плати ESP32-CAM, характеризується компактними габаритами та водночас високими функціональними можливостями. Незважаючи на невеликий фізичний розмір, дана камера забезпечує достатню якість зображення для задач відеоспостереження, моніторингу та аналізу навколишнього середовища. Використання гнучкого шлейфа дозволяє встановлювати оптичний модуль у важкодоступних місцях та сприяє більш зручній інтеграції в робототехнічні системи.

Для підвищення якості отриманого відео на сервері передбачені налаштування, доступні через вбудований веб-інтерфейс.

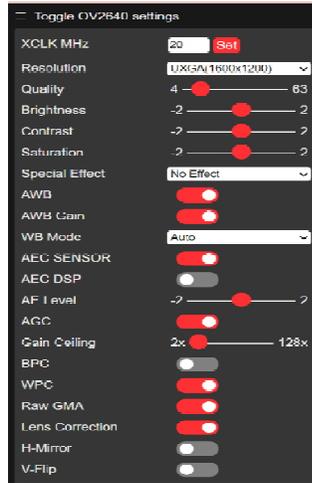
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ

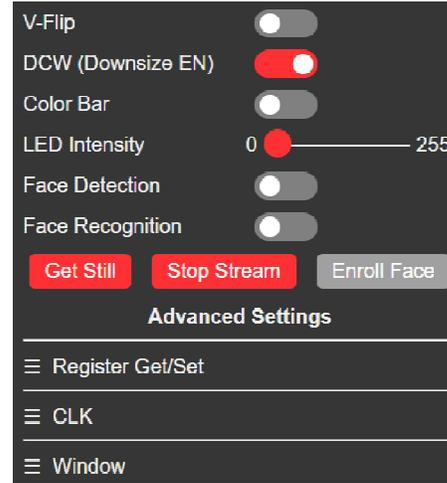
Арк.

71

На рисунку 2.31 представлено інтерфейс керування параметрами зйомки.



а)



б)

Рисунок 4.8 Інтерфейс керування процесом зйомки на сервері

Під час роботи були використані такі параметри налаштування:

- Resolution — для вибору роздільної здатності камери;
- Contrast — для коригування контрастності зображення;
- Start/Stop Stream — кнопка запуску або зупинки відеопотоку.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було створено робочий макет промислового робота-маніпулятора. Проведено огляд сучасних конструкцій маніпуляторів, їх функціональних можливостей та технічних параметрів. Аналіз доступних рішень дав змогу сформувавши оптимальну конфігурацію макета, яка відповідає вимогам поставленого завдання.

У середовищі EasyEDA розроблено електричну схему, а керування маніпулятором реалізовано за допомогою програмного забезпечення на базі Arduino IDE та мікроконтролера Atmega328P. Такий підхід забезпечив стабільну роботу системи та коректну взаємодію всіх її компонентів. Додаткове використання сенсорних елементів підвищило точність позиціонування та забезпечило надійний зворотний зв'язок для обробки даних.

Проведені випробування підтвердили працездатність створеного макета: система успішно виконує основну функцію — здійснює відеозйомку навколишнього середовища та передає отриману інформацію на сервер для подальшого аналізу. Це розширює можливості застосування маніпулятора не лише у виробничих процесах, а й у дослідницьких, моніторингових та інших прикладних задачах.

Отримані результати можуть слугувати основою для подальших розробок у галузі роботизованих систем. Вони сприяють удосконаленню засобів автоматизації, підвищенню ефективності роботи обладнання та зменшенню витрат у промисловому секторі. Виконана робота демонструє важливість використання сучасних мікроконтролерів, сенсорів і програмних рішень під час створення надійних та високопродуктивних робототехнічних комплексів.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

9. Вступ до систем приводу роботів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.brainkart.com/article/Introduction-Robot-Drive-Systems_5132/

10. Повний огляд маніпуляторів: переваги та сфери застосування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://robotnik.eu/complete-guide-to-manipulator-robots-benefits-and-applications/>

11. Конспект лекцій з дисципліни «Роботи та маніпуляції» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/ptm/metod/rm/%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B8%20%D1%82%D0%B0%20%D0%9C%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%BF_%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82.pdf.

12. Історія розвитку робототехніки. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://nanitrobot.com/history-robotics/>.

13. Allison Marsh. In 1961, the First Robot Arm Punched In The era of industrial robots began with Unimate, at a GM plant in Trenton // *Appl.* 30 Aug 2022; [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://spectrum.ieee.org/unimation-robot>.

14. Telefonica. Types of robots: classification, applications and examples [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.telefonica.com/en/communication-room/blog/types-of-robots-classification-applications-and-examples/>.

15. Truck Lutsk. Запчастини до вантажівок MAN, DAF, Renault Кран-маніпулятор ATLAS 100.1 A2 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://truck.lutsk.ua/1/index.php?productID=2988>.

16. Crobot. Промисловий робот маніпулятор CRP-RA07A-07 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://crobot.com.ua/promyslovyi-robot-manipulator-crp-ra07a-07/>.

17. ZoneTronik. Beginner's guide to key components in robotics projects // *Appl.* November 22, 2023. [Електронний ресурс]. - Режим доступу:

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						75
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

<https://www.zonetronik.com/en/beginners-guide-to-key-components-in-robotics-projects/>.

18. Ahjané Forbes. Boston Dynamics' robot Atlas being billed as 'fully-electric humanoid': Watch it in action // *Published 3:15 p.m. ET April 18, 2024*. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.usatoday.com/story/tech/news/2024/04/18/boston-dynamics-atlas-robot/73369141007/>.

19. Bear Hugs. Emo Desktop AI Pet Robot. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://bearhugs.in/cdn/shop/files/emo-desktop-ai-pet-robot-bear-hugs-1.jpg?v=1714340595>.

20. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу . Лабораторія "Мікроконтролери" [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://nung.edu.ua/department/kafedra-avtomatizacii-ta-kompyuterno-integrovanikh-tekhnologiy/laboratoriya-0>.

21. Автоматично керовані транспортні засоби (AGV) [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.jungheinrich.ua/системи/автоматично-керовані-транспортні-засоби/автоматично-керовані-транспортні-засоби-agv->.

22. Plant Automation Technology. Autonomous Mobile Robot (AMR) [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.plantautomation-technology.com/products/dematic/autonomous-mobile-robot-amr>.

23. Preetipadma K. Analytics Drift. Humanoid Robots: Hype for Economic Gains or Threat to Humans? // *Appl. November 9, 2022*; [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://analyticsdrift.com/humanoid-robots-hype-for-economic-gains-or-threat-to-humans/>.

24. James Temple.Vox. Putting a Friendlier Face on Robotics as Machines Learn to Do Your Job. The San Jose conference highlights the changing look and language of robotics // *Appl. Sep 30, 2014, 11:25 PM GMT+3*; [Електронний ресурс]. - Режим доступу:

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

<https://www.vox.com/2014/9/30/11631456/putting-a-friendlier-face-on-robotics-as-machines-learn-to-do-your>.

25. Тернопільський національний технічний університет. Промислові роботи [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96_%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B8.

26. Institute of Structural Design. Robotics Design Laboratory [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.tugraz.at/en/institutes/ite/robotics-design-laboratory/rdl-impressions>.

27. CLAAS Україна. Harsewinkel [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.claas.ua/pro-nas/many-places-one-passion/harsewinkel>.

28. Кемпрі Україна. Промислові роботи. Класифікація промислових роботів [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://kemppi.in.ua/articles/promochlenie_roboti.htm.

29. Astra. Промислові роботи - тренди 2024 // *Опубл. 27 лютого 2024 17:37*; [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://astra-s.com.ua/blog/promyshlennye-roboty-trendy-2024.html>

30. Ganesh Murugan. Slideshare. Robot manipulator. Robot, Manipulator, construction. parts, joints, principle, working // *Appl. Mar 26, 2018*; <https://www.slideshare.net/ganeshmrgn/robot-manipulator-91903399>.

					ХНТУ 174.КРМ.25.006 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		