

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК

«___» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»**

**Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка**

на тему: «Синтез системи керування для робототехнічного маніпулятора»

Виконав:
студент 3 курсу, групи ПМ-зп31
Дмитриченко Олександр Олександрович

Керівник:
доцент, к.т.н., доцент
Богдан Галина Анатоліївна

Рецензент:

.

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДП ПМ-зп31.01.1760.00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	97	
2	A1	ДП ПМ-зп31.01.1760.01.000	Алгоритм роботи адаптивної системи керування	1	
3	A1	ДП ПМ-зп31.01.1760.02.000	Алгоритм роботи адаптивної системи керування	1	
4	A1	ДП ПМ-зп31.01.1760.03.000 Е1	Структурна схема маніпулятора	1	
5	A1	ДП ПМ-зп31.01.1760.04.000	Кінематична схема маніпулятора	1	
6	A1	ДП ПМ-зп31.01.1760.05.000	Схема маніпулятора	1	

				ДП ПК01.210315.000		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту		
Розробник	Дмитриченко О.О.					
Керівник	Богдан Г.А.					
Консульт.						
Н/контр.						
Зав. каф.	Киричук Ю.В.					
					Лист	Листів
					1	77
				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-зп31		

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Синтез системи керування для
робототехнічного маніпулятора»**

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Дмитриченко Олександр Олександрович

1. Тема роботи «Синтез системи керування для робототехнічного маніпулятора», керівник роботи Богдан Галина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «25» травня 2026 р. №1887-с
2. Термін подання студентом проєкту: 09.06.2026
3. Вихідні дані до проєкту: Синтез системи керування для робототехнічного маніпулятора.
4. Зміст пояснювальної записки
Вступ
1. Аналітичний огляд
2. Вибір об'єкта автоматизації
3. Розробка системи керування
Висновки
Список використаних джерел
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) 5 креслиників

Алгоритм роботи адаптивної системи керування, Алгоритм роботи адаптивної системи керування, Структурна схема маніпулятора, Кінематична схема маніпулятора, Схема маніпулятора

6. Дата видачі завдання 09 лютого 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	12.02.2026	
2	Проведення аналітичного огляду	08.03.2026	
3	Вибір об'єкта автоматизації	21.04.2026	
4	Розробка системи керування	20.05.2026	
5	Розробка креслеників	25.05.2026	
6	Оформлення ПЗ	01.06.2026	

Студент

Олександр ДМИТРИЧЕНКО

Керівник

Галина БОГДАН

Анотація

Дипломна робота присвячена синтезу системи керування робототехнічним маніпулятором та розробці алгоритмів програмного керування виконавчими механізмами. У роботі розглянуто сучасні тенденції розвитку робототехнічних систем, особливості побудови адаптивних систем керування та роль робототехніки в концепції Industry 4.0.

Проведено аналіз лабораторних роботизованих маніпуляторів, виконано обґрунтування вибору об'єкта автоматизації та досліджено конструкцію і кінематичну схему маніпулятора. Розроблено математичну модель кінематики маніпулятора із застосуванням методу Денавіта–Хартенберга, розв'язано пряму та обернену задачі кінематики, що дозволило визначити положення та орієнтацію робочого органа у просторі.

У роботі розроблено структурну та функціональну схеми системи керування роботизованим маніпулятором, реалізовано алгоритм адаптивного керування із використанням зворотних зв'язків за положенням та швидкістю. Запропоновано програмну модель системи керування мовою Python із можливістю подальшої реалізації на базі мікроконтролера STM32.

Результати роботи можуть бути використані у навчальному процесі, лабораторних дослідженнях, а також під час розроблення автоматизованих робототехнічних систем і дослідження алгоритмів керування маніпуляторами.

Пояснювальна записка містить 93 сторінок, 20 рисунків, 6 таблиці, 6 додатки.

Ключові слова: *робототехнічний маніпулятор, система керування, адаптивне керування, кінематика, stm32, python, автоматизація, робототехніка, industry 4.0.*

Annotation

The bachelor's thesis is devoted to the synthesis of a control system for a robotic manipulator and the development of software control algorithms for executive mechanisms. The paper examines current trends in the development of robotic systems, the features of adaptive control systems design, and the role of robotics within the Industry 4.0 concept.

An analysis of laboratory robotic manipulators was carried out, the choice of the automation object was substantiated, and the structure and kinematic scheme of the manipulator were investigated. A mathematical model of the manipulator kinematics based on the Denavit–Hartenberg method was developed. Forward and inverse kinematics problems were solved, which made it possible to determine the position and orientation of the end effector in space.

The thesis presents the developed structural and functional diagrams of the robotic manipulator control system and implements an adaptive control algorithm using position and velocity feedback. A software model of the control system was proposed in Python with the possibility of further implementation based on the STM32 microcontroller.

The results of the work can be used in the educational process, laboratory research, as well as in the development of automated robotic systems and the study of manipulator control algorithms.

The explanatory note consists of 93 pages, 20 figures, 6 tables, and 6 appendices.

Keywords: *robotic manipulator, control system, adaptive control, kinematics, STM32, Python, automation, robotics, Industry 4.0.*

Зміст

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	12
1.1. Роль роботизованих систем у концепції Industry 4.0	12
1.2. Класифікація роботизованих комплексів	13
1.3. Загальна структура роботизованої системи	16
1.4. Системи керування роботизованих систем.....	19
1.4.1. Принцип побудови системи керування роботизованих систем	19
1.4.2. Класифікація систем керування роботизованих систем	22
1.4.3. Конструктивне виконання системи керування роботизованої системи	26
1.5. Технічне завдання на розробку програми керування.....	28
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	29
РОЗДІЛ 2 ВИБІР ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	30
2.1. Огляд лабораторних маніпуляторів.....	31
2.1.1. TinkerKit Braccio – програмована роботизована рука на Arduino	31
2.1.3. Міні-промислова роботизована рука Mirobot 6DoF.....	35
2.1.4. Waveshare RoArm-M2-S	37
2.2. Аналіз об'єкта автоматизації	39
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛА 2	45
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ- МАНІПУЛЯТОРОМ.....	46
3.1. Розв'язок прямої задачі кінематики	46
3.2. Розв'язок оберненої задачі кінематики	48
3.3. Структурна схема маніпулятора	50
3.4. Функціональна схема керування роботизованим маніпулятором.....	52
3.5. Алгоритм роботи системи керування роботом маніпулятором.....	54
3.6. Моделювання роботи адаптивної системи керування роботом- маніпулятором	57
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛА 3	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	65

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68
ДОДАТОК 1	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК 2	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК 3	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК 4	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК 5	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК 6	Ошибка! Закладка не определена.

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості, автоматизації та інформаційних технологій супроводжується активним впровадженням робототехнічних систем у різні сфери діяльності людини. Роботизовані маніпулятори широко застосовуються у машинобудуванні, електроніці, логістиці, медицині, складальних виробництвах та автоматизованих технологічних лініях. Їх використання дозволяє підвищити точність виконання операцій, продуктивність праці, зменшити вплив людського фактору та забезпечити автоматизацію складних і повторюваних процесів.

Одним із ключових напрямів розвитку робототехнічних систем є створення ефективних систем керування, які забезпечують точне позиціонування робочого органа, синтез траєкторій руху, стабільність роботи та взаємодію виконавчих механізмів із зовнішнім середовищем. Особливої актуальності набувають задачі синтезу керуючих програм для роботизованих маніпуляторів, що дозволяють реалізовувати автоматичне виконання технологічних операцій у реальному часі.

У навчальних та дослідницьких цілях широкого поширення набули лабораторні роботизовані маніпулятори, які за принципом роботи та кінематичною структурою є аналогами промислових роботів. Такі системи дозволяють досліджувати методи автоматичного керування, кінематику, алгоритми позиціонування та програмного керування без необхідності використання дорогого промислового обладнання. Завдяки відкритій архітектурі та підтримці сучасних мов програмування навчальні маніпулятори є ефективною платформою для розробки та тестування систем автоматизації.

Об'єктом дослідження у даній дипломній роботі є робототехнічний маніпулятор Hiwonder xArm 1S. Предметом дослідження є система керування роботизованим маніпулятором та алгоритми синтезу керуючої програми для забезпечення заданих режимів роботи.

Метою дипломної роботи є синтез системи керування для робототехнічного маніпулятора з реалізацією алгоритмів позиціонування та програмного керування виконавчими механізмами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. провести аналіз сучасних лабораторних роботизованих маніпуляторів;
2. обґрунтувати вибір об'єкта автоматизації;
3. дослідити конструкцію та кінематичну схему маніпулятора;
4. визначити основні параметри системи керування;
5. розробити алгоритм керування маніпулятором;
6. здійснити синтез керуючої програми;
7. провести аналіз роботи системи керування та оцінити її ефективність.

У процесі виконання роботи використовуються методи теорії автоматичного керування, робототехніки, програмування мікроконтролерних систем та математичного моделювання.

Практичне значення роботи полягає у розробці системи керування робототехнічним маніпулятором, яка може бути використана для дослідження алгоритмів автоматизації, програмного керування та навчання основ робототехніки. Результати роботи можуть бути застосовані у навчальному процесі, лабораторних дослідженнях та при створенні роботизованих систем автоматизації.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Роль роботизованих систем у концепції Industry 4.0

Роботизація промисловості є одним із ключових напрямів технологічного розвитку сучасного виробництва. Її актуальність зумовлена необхідністю підвищення продуктивності праці, забезпечення стабільної якості продукції, зменшення виробничих витрат та підвищення конкурентоспроможності підприємств на світовому ринку.

Однією з основних причин активного розвитку роботизації є зростання вимог до точності та швидкості виконання технологічних операцій. Промислові роботи здатні працювати безперервно, виконувати монотонні та небезпечні операції з високою точністю, що значно знижує ризик виробничих помилок та підвищує ефективність виробничих процесів. Особливо це актуально для автомобілебудування, електроніки, металургії, логістики та фармацевтичної промисловості [1].

Крім того, використання роботизованих комплексів дозволяє зменшити участь людини у шкідливих або небезпечних виробничих процесах, таких як зварювання, робота з токсичними речовинами, переміщення важких вантажів чи експлуатація обладнання в екстремальних умовах. Також, автоматизація та роботизація дають змогу зменшити залежність виробництва від людського фактора, підвищити стабільність технологічних процесів та забезпечити ефективне використання ресурсів [2-3].

За даними International Federation of Robotics [4], у світі вже експлуатується понад 4 мільйони промислових роботів, що свідчить про стрімке зростання рівня автоматизації виробництва та активне впровадження інтелектуальних виробничих систем.

Концепція Industry 4.0 передбачає створення «розумних фабрик», у яких усі виробничі процеси інтегровані в єдину цифрову систему на основі: кіберфізичних технологій, Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту, великих

даних та робототехніки. Роботизовані системи є центральним елементом цієї концепції, оскільки забезпечують автоматизоване виконання виробничих операцій, збір і аналіз даних, а також адаптивне керування виробництвом у режимі реального часу.

Сучасні роботизовані системи оснащуються сенсорами, системами машинного зору та алгоритмами штучного інтелекту, що дозволяє їм адаптуватися до змін виробничого середовища, взаємодіяти з іншими машинами та людьми, а також самостійно приймати рішення в межах поставлених завдань [5].

Важливою складовою Industry 4.0 є інтеграція роботів у кіберфізичні системи та цифрові платформи підприємств. Це забезпечує:

- моніторинг стану обладнання в реальному часі;
- прогнозування технічного обслуговування;
- оптимізацію виробничих процесів;
- зменшення простоїв;
- підвищення енергоефективності виробництва.

Крім того, роботизовані системи є основою реалізації концепції Smart Manufacturing («розумного виробництва»), де виробничі процеси автоматично адаптуються до змін попиту, стану обладнання та логістичних умов. Це забезпечує підприємствам високу конкурентоспроможність, скорочення виробничих витрат та можливість швидкого впровадження інновацій.

1.2. Класифікація роботизованих комплексів

На сьогодні існує велика кількість класифікацій роботів, що пояснюється різноманітністю їх конструкцій, функціональних можливостей, сфер застосування та принципів роботи. Розвиток робототехніки, автоматизації та цифрових технологій призвів до появи широкого спектра роботизованих систем, які відрізняються за рівнем автономності, способом керування, мобільністю та характером виконуваних операцій.

Найбільш поширеними є класифікації:

- за основною функцією;
- за призначенням;
- за особливостями керування;
- за конструктивними ознаками.

Кожна з цих класифікацій дозволяє визначити особливості функціонування роботів, їх технічні характеристики та сфери ефективного застосування.

Однією з найбільш загальних є класифікація роботів за основною функцією. Відповідно до неї роботи поділяються на дві великі групи: мобільні платформи та роботи-маніпулятори [6].

Мобільні платформи являють собою роботизовані системи, основною особливістю яких є здатність пересуватися у просторі для виконання певних завдань (рис. 1.1). Такі роботи можуть переміщуватись за допомогою колісних, гусеничних, крокуючих або комбінованих механізмів пересування. Їх головна функція полягає у транспортуванні вантажів, дослідженні навколишнього середовища, виконанні інспекційних робіт або автоматизованому обслуговуванні територій та приміщень.



Рисунок 1.1. Приклад мобільної платформи [7].

Іншу велику групу складають роботи-маніпулятори. Основною функцією таких роботів є виконання маніпуляційних операцій над об'єктами, що

знаходяться в межах їх робочої зони. Маніпулятори оснащуються механічною рукою з кількома ступенями свободи та виконавчим органом — захватом, зварювальним інструментом, фарбувальним пристроєм або іншим технологічним обладнанням.

Найбільш поширеним прикладом маніпуляторів є промислові роботи, які використовуються на автоматизованих виробничих лініях (рис. 1.2). Вони виконують широкий спектр технологічних операцій, серед яких: зварювання; фарбування; складання; пакування; сортування; подача та зняття деталей; обробка матеріалів; контроль якості продукції.



Рисунок 1.2. Промисловий робот-маніпулятор [8].

Використання роботів-маніпуляторів дозволяє значно підвищити продуктивність виробництва, забезпечити високу точність виконання операцій та мінімізувати вплив людського фактора. Особливо ефективними такі системи є під час виконання монотонних, небезпечних або високоточних технологічних процесів.

Більшість маніпуляторів встановлюється стаціонарно, тобто вони працюють у межах фіксованої робочої зони. Проте сучасний розвиток робототехніки сприяв появі мобільних маніпуляторів, у яких роботизована рука

встановлюється на рухомій платформі. Такі системи поєднують переваги мобільних роботів та маніпуляторів і належать до комбінованого типу роботів.

Сучасна тенденція розвитку робототехніки полягає саме у створенні універсальних автономних роботизованих комплексів, здатних поєднувати мобільність, інтелектуальне керування та високоточні маніпуляційні можливості, тому і розробка систем керування є актуальною задачею.

1.3. Загальна структура роботизованої системи

Сучасні роботизовані системи є складними технічними комплексами. Ефективність функціонування робота забезпечується взаємодією декількох основних підсистем, кожна з яких виконує окремі функції, аналогічні функціям людського організму. Загалом структура сучасного робота включає систему керування, інформаційно-вимірювальну систему, систему зв'язку та виконавчу систему (рис. 1.3) [6].



Рисунок 1.3. Загальна структура роботизованої системи.

Структура робота складається з кількох взаємопов'язаних підсистем, які забезпечують його здатність сприймати інформацію, аналізувати навколишнє середовище, приймати рішення та виконувати необхідні дії. Основними елементами структури є система керування, система зв'язку, виконавча система та інформаційно-вимірювальна система. Усі підсистеми взаємодіють між собою та із зовнішнім середовищем, утворюючи єдиний функціональний комплекс.

Система керування виконує роль центрального модуля робота та відповідає за обробку інформації, планування дій, координацію роботи всіх компонентів і прийняття рішень. Саме ця підсистема аналізує дані, отримані від сенсорів, та формує команди для виконавчих механізмів.

Система зв'язку забезпечує передачу інформації між внутрішніми модулями робота, а також обмін даними із зовнішніми пристроями або оператором. Вона відповідає за отримання команд, передачу результатів роботи та підтримку комунікації в реальному часі.

Виконавча система призначена для безпосереднього виконання фізичних дій. До її складу можуть входити електродвигуни, приводи, маніпулятори та інші механізми, які забезпечують переміщення робота або взаємодію з об'єктами навколишнього середовища.

Інформаційно-вимірювальна система здійснює збір даних про стан робота та параметри зовнішнього середовища. Вона включає різноманітні датчики й сенсори, які вимірюють відстань, температуру, освітленість, положення об'єктів та інші характеристики. Отримана інформація передається до системи керування для подальшої обробки.

Зовнішнє середовище є джерелом вхідної інформації та об'єктом впливу робота. Робот отримує дані про умови середовища за допомогою сенсорів і, відповідно до поставлених завдань, виконує необхідні дії через виконавчу систему. Таким чином забезпечується безперервний цикл взаємодії: сприйняття інформації, аналіз, прийняття рішень та виконання дій.

Таким чином, усі підсистеми робота функціонують у тісному взаємозв'язку та забезпечують його ефективну роботу в реальному середовищі. Проте центральне місце в структурі роботизованої системи займає система керування, оскільки саме вона забезпечує координацію роботи всіх функціональних модулів, аналіз вхідної інформації та формування керуючих впливів на виконавчі механізми. Від якості функціонування системи керування залежать точність виконання операцій, швидкодія, адаптивність та рівень автономності робота.

У сучасній робототехніці особливу увагу приділяють синтезу системи керування, під яким розуміють процес розробки структури, алгоритмів та параметрів керування, що забезпечують необхідні характеристики роботи системи. Синтез системи керування включає вибір методів обробки інформації, побудову алгоритмів прийняття рішень, налаштування зворотних зв'язків і визначення способів взаємодії між окремими підсистемами робота. Основною метою синтезу є забезпечення стабільної, точної та ефективної роботи робототехнічної системи в різних умовах експлуатації.

Важливу роль у реалізації системи керування відіграє розробка керуючих програм. Програмне забезпечення забезпечує виконання алгоритмів керування, обробку даних від сенсорів, формування команд для приводів і реалізацію логіки поведінки робота. Крім того, керуючі програми дозволяють адаптувати робота до зміни зовнішніх умов, оптимізувати його роботу та реалізувати автономне функціонування.

Отже, синтез системи керування та створення керуючого програмного забезпечення є одними з найважливіших етапів проєктування робототехнічних систем, оскільки саме вони визначають ефективність, надійність і функціональні можливості робота.

1.4. Системи керування роботизованих систем

1.4.1. Принцип побудови системи керування роботизованих систем

Система керування сучасного робота повинна мати низку ключових характеристик, які забезпечують її ефективність, гнучкість та здатність працювати в умовах змінного середовища. Насамперед така система має бути здатною до навчання та адаптації. Це означає, що робот повинен уміти аналізувати інформацію із зовнішнього середовища, обробляти дані від сенсорів, прогнозувати можливі зміни та відповідно коригувати власну поведінку. Завдяки використанню методів адаптивного керування, штучного інтелекту та машинного навчання роботизовані системи здатні підвищувати точність виконання операцій і пристосовуватись до нових умов роботи без повного перепрограмування [9].

Важливою характеристикою сучасних робототехнічних систем є також ієрархічна організація керування. Такий підхід передбачає поділ системи на декілька рівнів, кожен із яких виконує власні функції. На нижньому рівні здійснюється безпосереднє керування приводами, датчиками та виконавчими механізмами. Середній рівень відповідає за координацію рухів, планування дій і обробку інформації, тоді як верхній рівень реалізує стратегічне управління, прийняття рішень і взаємодію з оператором або іншими системами. Ієрархічна структура дозволяє ефективно розподіляти задачі між окремими компонентами системи, спрощує процес керування та забезпечує масштабованість робототехнічного комплексу.

Ще однією важливою вимогою є модульна структура системи керування. У модульній архітектурі кожен окремий модуль відповідає за виконання конкретної функції: навігацію, технічний зір, обробку даних, планування траєкторії, керування приводами чи взаємодію з користувачем. При цьому всі модулі працюють узгоджено та обмінюються інформацією між собою за принципом синергії. Такий підхід підвищує надійність системи, спрощує модернізацію робота і дозволяє легко інтегрувати нові функціональні компоненти без необхідності повної перебудови всієї системи. Модульність також є основою

створення гнучких робототехнічних систем, здатних швидко адаптуватися до різних виробничих або дослідницьких задач.

Таким чином, поєднання адаптивності, ієрархічної організації та модульної структури є основою побудови сучасних інтелектуальних робототехнічних систем, які здатні ефективно функціонувати в умовах невизначеності, виконувати складні завдання та забезпечувати високий рівень автономності.

На рис. 1.4 представлено схему адаптивної системи керування ієрархічного типу роботизованої системи [6].



Рисунок 1.4. Схему адаптивної системи керування ієрархічного типу роботизованої системи [6].

Система побудована за багаторівневим принципом, де кожен рівень виконує окремі функції керування та взаємодіє з іншими рівнями через канали обміну інформацією і зворотного зв'язку.

У лівій частині схеми послідовно розташовані основні функціональні рівні системи керування. Перший рівень забезпечує спілкування з оператором та постановку задачі для роботизованої системи. На другому рівні виконується планування поведінки системи та прийняття рішень залежно від поставлених цілей. Третій рівень відповідає за розпізнавання та аналіз ситуацій на основі інформації, отриманої від датчиків і сенсорів. Четвертий рівень здійснює побудову моделі середовища та планування траєкторії руху робота. На п'ятому рівні формується система керуючих сигналів і реалізується адаптивне керування, що дозволяє змінювати параметри роботи залежно від умов середовища. Шостий рівень забезпечує керування приводами та виконавчими механізмами робота.

У правій частині схеми показані допоміжні підсистеми. Система зв'язку забезпечує взаємодію між оператором та роботизованою системою. Система координації роботи рівнів ієрархії узгоджує функціонування всіх рівнів керування та забезпечує обмін інформацією між ними. Інформаційно-вимірювальна система містить датчики, камери, лідари, енкодери та інші засоби збору інформації про стан робота і зовнішнього середовища.

У нижній частині схеми розташована виконавча система робота, яка включає маніпулятори, мобільну платформу та інші виконавчі механізми. Робота системи відбувається у взаємодії із зовнішнім середовищем, яке може містити об'єкти, людей та перешкоди. Інформація про стан середовища надходить через інформаційно-вимірювальну систему та використовується для адаптації алгоритмів керування.

Таким чином, адаптивна система керування ієрархічного типу забезпечує ефективне функціонування роботизованої системи за рахунок багаторівневої організації, постійного зворотного зв'язку та можливості адаптації до змін умов зовнішнього середовища [10].

1.4.2. Класифікація систем керування роботизованих систем

Системи керування роботів класифікуються за ступенем безпосередньої участі людини-оператора в керуванні, принципом та способом керування, способом позиціонування, способом представлення командної інформації, способом програмування та іншими ознаками [6, 11].

За ступенем безпосередньої участі людини-оператора розрізняють автоматизовані та автоматичні системи керування. В автоматизованих системах частина функцій керування виконується людиною-оператором, до таких систем належать біотехнічні та інтерактивні роботи [6, 12]. Автоматичні системи забезпечують керування без безпосередньої участі людини-оператора, що характерно для автономних роботів [6, 11].

Залежно від покоління роботів у системах керування може бути реалізований один із трьох принципів керування: програмний, адаптивний та інтелектуальний [6, 13].

Системи з програмним керуванням послідовно виконують задану програму і не реагують на зміни зовнішнього середовища. Для їх нормального функціонування зовнішнє середовище повинно бути чітко організованим: усі предмети, інструменти та об'єкти мають перебувати у визначених місцях і мати строго визначену просторову орієнтацію [6, 12].

Системи адаптивного керування здатні змінювати алгоритм дій робота залежно від стану зовнішнього середовища. Інформація про середовище надходить від датчиків інформаційно-вимірювальної системи, що дозволяє підвищити якість керування та розширити функціональні можливості роботів [6, 13].

Системи інтелектуального керування є найбільш досконалими, оскільки, окрім адаптації до зовнішнього середовища, здатні до самонавчання із застосуванням методів штучного інтелекту [6, 14].

За способом керування розрізняють розімкнені та замкнені системи. У розімкнених системах керування відсутній зворотний зв'язок про стан зовнішнього середовища та самого робота. У замкнених системах такий зв'язок

наявний, що значно підвищує точність позиціонування, якість та надійність керування [6, 11].

Залежно від змісту командної інформації, що керує рухом виконавчих ланок робота, системи керування поділяються на циклові, позиційні, контурні та комбіновані [6, 12].

Циклові системи керування є найпростішими та забезпечують позиціонування між двома крайніми положеннями ланки виконавчого механізму, які обмежуються упорами. Командна інформація в такому випадку містить ознаку ланки та напрямок її руху [6, 13].

У позиційних системах керування командна інформація, окрім ознаки ланки та напрямку руху, містить також величину переміщення. Це забезпечує можливість позиціонування по декількох точках [11]. Якщо кількість точок невелика, такі системи позначаються як РТР (point-to-point), а при великій кількості фіксованих точок — МР (multi point) [14]. Позиційне керування є більш складним, проте забезпечує більшу універсальність та технологічні можливості роботів.

Під час переміщення через набір заданих точок робот зупиняється у кожній точці, після чого починає рух до наступної. Постійні прискорення та уповільнення створюють значні навантаження на механічні вузли робота. Для усунення цього недоліку застосовується апроксимація траєкторії, коли робот змінює напрямок руху ще до досягнення проміжної точки [12].

Контурні системи керування є найбільш універсальними, оскільки забезпечують переміщення виконавчих ланок по безперервній траєкторії. У цьому випадку командна інформація містить параметри траєкторії руху. Такі системи позначаються як СР (continuous path) [3]. Найчастіше використовуються траєкторії типу «пряма» та «дуга кола» [11].

У сучасних робототехнічних системах широко застосовуються комбіновані системи керування, які поєднують цикловий, позиційний та контурний типи керування [14].

За способом представлення командної інформації системи керування поділяються на електромеханічні, циклові, аналогові, числові та гібридні [12].

В електромеханічних системах геометрична інформація задається у вигляді фізичних аналогів — положення упорів, кулачків або копирів. Такі системи прості та дешеві, але мають обмежені функціональні можливості [11].

У системах циклового програмного керування геометрична інформація задається упорами та перемикачами, а команди циклу подаються у вигляді цифр. Перебудова програми здійснюється шляхом зміни положення упорів або перемикачів [3]. Такі системи мають невеликі габарити та невисоку вартість і використовуються для роботів із малою кількістю точок позиціонування [12].

В аналогових системах інформація задається та зберігається у вигляді електричних потенціалів, а в якості елементної бази використовуються операційні підсилювачі постійного струму [14].

У системах числового програмного керування (ЧПК) інформація задається у цифровому вигляді та зберігається на програмних носіях. Такі системи є більш складними, але забезпечують найбільші функціональні можливості роботів і добре інтегруються з обчислювальною технікою [11].

Гібридні системи керування поєднують різні способи представлення інформації для досягнення оптимальних характеристик системи [12].

За способом програмування інформації, яка визначає дії робота, виділяють аналітичне програмування, програмування навчанням та самонавчання [13].

Аналітичне програмування передбачає підготовку керуючої програми для роботів із позиційним або контурним керуванням. Параметри переміщення ланок визначаються математичними методами з використанням ЕОМ або пристроїв керування робота [11].

Програмування навчанням застосовується для циклових, позиційних та контурних систем і поділяється на ручне, напівавтоматичне та автоматичне [14].

Ручне програмування передбачає безпосередню участь оператора на всіх етапах формування та введення програми. Воно є простим, але трудомістким і

використовується переважно для промислових роботів із цикловим керуванням [12].

Напіваавтоматичне програмування характеризується участю оператора у формуванні програми та перетворенні інформації, тоді як введення інформації здійснюється пристроєм керування за сигналом оператора [13].

Автоматичне навчання виконується повністю пристроєм керування із застосуванням ЕОМ. Оператор лише задає узагальнену програму та вихідні дані мовою програмування [11].

Програмування самонавчанням використовується в інтелектуальних роботах із розвиненою сенсорною системою та адаптивним керуванням. Такі системи здатні частково або повністю самостійно вдосконалювати алгоритми своєї роботи [14].

Можна зробити висновок, що основна тенденція розвитку робототехнічних систем полягає у переході від жорстко запрограмованих систем до адаптивних та інтелектуальних систем із використанням штучного інтелекту, машинного навчання та сенсорних технологій. В Додатку 1 представлено узагальнену характеристику систем керування роботизованих систем. Можна зробити висновок, що:

1. Найпростішими є системи програмного та циклового керування, але вони мають низьку адаптивність.
2. Найбільш перспективними є інтелектуальні та адаптивні системи керування.
3. Сучасні роботи переходять до використання штучного інтелекту та самонавчання.
4. Розвиток Industry 4.0 стимулює інтеграцію роботів у єдині цифрові виробничі екосистеми.
5. Майбутнє робототехніки пов'язане з автономністю, машинним навчанням та співпрацею людини і робота.

1.4.3. Конструктивне виконання системи керування роботизованої системи

На рисунку 1.5 наведено структурну схему адаптивної системи керування роботизованої системи.



Рисунок 1.5. Структурна схема адаптивної системи керування роботизованої системи [6]

Структурна схема системи складається з комплексу взаємопов'язаних функціональних блоків, які забезпечують збір, обробку, аналіз інформації та керування виконавчими механізмами робота.

Основою функціонування системи є датчики навколишнього середовища та стану робота, які здійснюють збір інформації про параметри зовнішнього середовища, положення та орієнтацію робота, швидкість руху, наявність перешкод, а також технічний стан виконавчих механізмів. Для цього використовуються камери технічного зору, ультразвукові датчики, LiDAR, енкодери, гіроскопи, акселерометри та інші сенсорні пристрої.

Отримані дані передаються до адаптивної системи введення та синтезу даних, яка виконує збір, фільтрацію, синхронізацію та інтеграцію інформації з різних джерел, формуючи єдину інформаційну модель стану робототехнічної системи та навколишнього середовища.

Центральним елементом системи є блок адаптивного керування та планування, який аналізує поточний стан робота, формує алгоритми керування, виконує планування траєкторії руху та адаптує параметри керування залежно від зміни умов роботи. Для прийняття рішень блок використовує інформацію від сенсорів, бази знань та інтелектуального програмного забезпечення

Система виведення команд формує керуючі сигнали та передає їх до виконавчих механізмів робота, а також забезпечує зміну параметрів або структури системи відповідно до умов функціонування.

Виконавчими елементами системи є приводи робота, до яких належать сервомотори, електроприводи, пневматичні та гідравлічні механізми, що забезпечують безпосереднє виконання механічних дій. Для контролю та моніторингу роботи системи використовується панель відображення та діагностики, яка забезпечує візуалізацію параметрів роботи, контроль режимів функціонування та діагностику можливих несправностей.

Взаємодія оператора з робототехнічною системою здійснюється через інтерфейс користувача та пульт керування, які забезпечують введення команд, налаштування параметрів, запуск і зупинку системи, а також моніторинг її роботи. Передача даних та дистанційне керування реалізуються за допомогою пристрою бездротового зв'язку, наприклад Wi-Fi або Bluetooth, що дозволяє інтегрувати робототехнічну систему з хмарними сервісами та іншими автоматизованими системами.

Принцип дії адаптивної системи керування полягає у безперервному циклі збору, аналізу та обробки інформації з подальшим формуванням керуючих дій. На першому етапі датчики отримують інформацію про навколишнє середовище та внутрішній стан робота, після чого дані надходять до системи введення та синтезу даних, де виконуються їх фільтрація та об'єднання. Далі інформація передається до блоку адаптивного керування та планування, який на основі отриманих даних, інформації з бази знань та алгоритмів інтелектуального програмного забезпечення формує оптимальні керуючі команди. База знань та модулі машинного навчання аналізують результати роботи системи та за

допомогою зворотного зв'язку дозволяють адаптувати параметри керування, вдосконалювати алгоритми та підвищувати ефективність роботи робототехнічної системи. Сформовані керуючі сигнали передаються до системи виведення команд і далі до приводів робота, які виконують необхідні механічні дії. Таким чином адаптивна система керування забезпечує здатність робототехнічної системи реагувати на зміни зовнішнього середовища, працювати в умовах невизначеності, оптимізувати режими функціонування та реалізовувати елементи автономної й інтелектуальної поведінки.

1.5. Технічне завдання на розробку програми керування

Технічне завдання на розроблення автоматизованої системи керування робототехнічним маніпулятором було сформовано відповідно до вимог ДСТУ 34.602-89. У технічному завданні визначено призначення та цілі створення системи, склад і структуру комплексу, режими функціонування, вимоги до апаратного та програмного забезпечення, вимоги до надійності, безпеки, ергономіки, а також перелік функцій, які повинна виконувати система. Окремо встановлено вимоги до взаємодії персонального комп'ютера з мікроконтролером через інтерфейс RS-232 та описано режими роботи маніпулятора: автоматичний, ручний і налагоджувальний. Повний текст технічного завдання наведено у Додатку 2.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У результаті виконання аналітичного огляду було досліджено сучасний стан розвитку робототехнічних систем та визначено основні тенденції розвитку систем керування роботизованими комплексами. Встановлено, що роботизація є одним із ключових напрямів розвитку концепції Industry 4.0.

Проведено аналіз класифікації роботизованих систем та визначено особливості мобільних платформ і роботів-маніпуляторів. Встановлено, що саме роботи-маніпулятори є найбільш поширеними засобами автоматизації виробничих процесів завдяки високій точності позиціонування та універсальності виконання технологічних операцій.

Розглянуто загальну структуру роботизованої системи та визначено основні функціональні підсистеми: систему керування, інформаційно-вимірювальну систему, систему зв'язку та виконавчу систему. Встановлено, що центральним елементом робототехнічної системи є система керування, від ефективності якої залежать точність, швидкодія, адаптивність та рівень автономності роботи робота.

У ході аналізу систем керування робототехнічними системами досліджено принципи побудови адаптивних та ієрархічних систем керування, а також розглянуто класифікацію систем керування за способом організації, типом керування та рівнем автономності. Визначено, що сучасні тенденції розвитку робототехніки спрямовані на використання адаптивних та інтелектуальних систем керування із застосуванням методів штучного інтелекту, машинного навчання та сенсорних технологій.

Також було проаналізовано конструктивне виконання адаптивної системи керування роботизованої системи та визначено основні функціональні блоки, необхідні для реалізації ефективного керування маніпулятором.

На основі проведеного аналізу сформовано технічне завдання на розроблення автоматизованої системи керування робототехнічним маніпулятором відповідно до вимог ДСТУ 34.602-89.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Як об'єкт дослідження було обрано навчальний роботизований маніпулятор. Такий вибір має низку суттєвих переваг. Насамперед навчальні маніпулятори мають конструкцію, принцип дії та кінематичну схему, аналогічні промисловим роботам, але при цьому є значно простішими у реалізації, налаштуванні та програмуванні. Це дозволяє дослідити основні принципи автоматизованого керування без необхідності використання дорогого промислового обладнання.

Використання навчального маніпулятора дає можливість реалізувати та протестувати алгоритми позиціювання, траєкторного керування, синтезу програм руху, а також відпрацювати взаємодію між апаратною та програмною частинами системи. Крім того, такі системи підтримують сучасні засоби програмування та інтеграції з мікроконтролерами, системами комп'ютерного бачення та середовищами моделювання, що робить їх зручними для дослідницьких і навчальних цілей.

Важливою перевагою навчального маніпулятора є його безпечність та компактність. На відміну від промислових роботів, він не потребує спеціальних умов експлуатації та складних систем захисту, що є особливо важливим у межах виконання бакалаврського дипломного проєкту. При цьому функціональні можливості маніпулятора є достатніми для розробки повноцінної системи автоматизованого керування та проведення експериментальних досліджень.

Таким чином, вибір навчального маніпулятора як об'єкта автоматизації дозволяє поєднати практичну реалізацію системи керування з можливістю детального дослідження алгоритмів роботи роботизованих систем. Це забезпечує отримання необхідних теоретичних знань і практичних навичок у сфері автоматизації та робототехніки, що підтверджує доцільність і ефективність обраного рішення для виконання дипломного проєкту бакалавра.

2.1. Огляд лабораторних маніпуляторів

Проведемо огляд найбільш поширених лабораторних роботизованих маніпуляторів, виконаємо порівняння їх технічних характеристик, функціональних можливостей та особливостей застосування. На основі проведеного аналізу обґрунтуємо вибір маніпулятора, який найбільш ефективно підходить для реалізації синтезу системи автоматизованого керування в межах дипломного проєкту бакалавра.

2.1.1. TinkerKit Braccio – програмована роботизована рука на Arduino

TinkerKit Braccio – програмована роботизована рука на Arduino (рис. 2.1) — це навчальний роботизований маніпулятор, призначений для вивчення основ робототехніки, автоматизації та програмування мікроконтролерів Arduino. Конструкція являє собою компактний багатоланковий роботизований маніпулятор із сервоприводами та механічним захватом, який дозволяє реалізовувати задачі позиціювання, переміщення об'єктів та автоматичного керування [15-16].



Рисунок 2.1. Робот TinkerKit Braccio – програмована роботизована рука на Arduino [16]

Основні технічні характеристики наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики TinkerKit Braccio

Характеристика	Значення
Тип маніпулятора	Навчальний роботизований маніпулятор
Кількість ступенів свободи	6
Тип приводів	Сервоприводи
Тип керування	Arduino
Матеріал конструкції	Акрил / алюміній
Наявність захвату	Так
Спосіб програмування	Arduino IDE
Інтерфейси керування	USB, Bluetooth, PS2
Напруга живлення	7–15 В
Максимальний струм	до 5 А
Вихід живлення сервоприводів	5 В / 3 А
Призначення	Навчання, STEM, робототехніка
Підтримка автоматичного режиму	Так
Підтримка ручного керування	Так

Найчастіше такі комплекти використовуються у STEM-освіті, лабораторних роботах, курсових і дипломних проєктах, оскільки поєднують простоту конструкції, невисоку вартість та можливість практичного дослідження алгоритмів керування роботизованими системами. Маніпулятор підтримує програмування через середовище Arduino IDE та може працювати як у ручному режимі, так і в автоматичному режимі виконання заданих траєкторій.

Конструктивно маніпулятор складається з:

- основи з поворотним механізмом;
- декількох рухомих ланок;
- сервоприводів;
- механічного захвату;
- плати керування Arduino;
- драйвера сервоприводів;

- системи живлення та інтерфейсів зв'язку.
- Для керування можуть використовуватися:
- джойстики;
 - Bluetooth-з'єднання;
 - PS2-контролер;
 - персональний комп'ютер через USB.

2.1.2. Hiwonder-xArm1S Programming Desktop Robot Arm with Powerful Robust Intelligent Bass Servo Position and Voltage Feedback (Unassembled)

Hiwonder xArm 1S (рис. 2.2) — це навчальний настільний роботизований маніпулятор із шістьма ступенями свободи, призначений для вивчення робототехніки, програмування та систем автоматизованого керування. Маніпулятор побудований на основі інтелектуальних bus-servo приводів і підтримує декілька способів керування та програмування, що робить його ефективною платформою для лабораторних досліджень, STEM-освіти та виконання інженерних проєктів [17].



**Рисунок 2.2. Маніпулятор Hiwonder-xArm1S Programming Desktop Robot Arm
with Powerful Robust Intelligent Bass Servo Position and Voltage Feedback
(Unassembled) [17]**

Конструкція маніпулятора виконана з алюмінієвого сплаву, що забезпечує достатню жорсткість та точність позиціонування. У системі використовуються інтелектуальні серійні сервоприводи з функціями зворотного зв'язку за положенням, напругою та температурою, завдяки чому забезпечується стабільна робота та можливість моніторингу стану приводів у режимі реального часу.

Основні технічні характеристики маніпулятора наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Технічні характеристики маніпулятора [17]

Характеристика	Значення
Тип маніпулятора	Настільний навчальний робот
Кількість ступенів свободи	6 DOF
Тип приводів	Інтелектуальні bus-servo
Матеріал конструкції	Алюмінієвий сплав
Маса маніпулятора	≈0.9 кг
Габарити	154 × 140 × 426 мм
Вантажопідйомність	до 500 г
Тип керування	PC, APP, PS2, Arduino
Напруга живлення	7.5 В
Блок живлення	7.5 В / 6 А
Контролер	STM32
Інтерфейси зв'язку	USB, Bluetooth
Зворотний зв'язок	Положення, напруга, температура
Підтримка програмування	Arduino, Python, Scratch
Режим запису рухів	Так
Кількість збережених дій	до 1020
Підтримка кінематики	Так
Підтримка ROS	Частково / через open-source рішення

Маніпулятор підтримує різні режими керування:

- через персональний комп'ютер;
- мобільний додаток;
- бездротовий PS2-контролер;
- ручне програмування траєкторій;
- Arduino та Python-програмування.

Особливістю xArm 1S є підтримка кінематичних алгоритмів та координатного керування. Робот може переміщувати захват у задані координати простору із визначеним кутом нахилу, що дозволяє реалізовувати задачі автоматичного позиціювання та Pick&Place операції.

Для програмування можуть використовуватися: Arduino IDE; Python; Scratch; графічне ПЗ xArm Starter; мобільний застосунок Hiwonder.

2.1.3. Міні-промислова роботизована рука Mirobot 6DoF

WLKATA Mirobot 6DOF Mini Industrial Robotic Arm Professional Kit (рис. 2.3) — це компактний навчально-промисловий роботизований маніпулятор, призначений для дослідження систем автоматизованого керування, програмування роботів та реалізації задач промислової автоматизації. Маніпулятор поєднує компактні розміри, високу точність позиціювання та підтримку сучасних програмних платформ, що робить його ефективним рішенням для лабораторних досліджень, STEM-освіти та інженерних проєктів [18].

Конструкція маніпулятора виконана з алюмінієвого сплаву та металевих елементів, що забезпечує жорсткість системи та стабільність роботи. Робот має шість ступенів свободи та оснащений сервоприводами з енкодерами, які забезпечують плавне переміщення і точне позиціювання робочого органа. За своїми функціональними можливостями Mirobot наближений до малих промислових роботів і підтримує виконання операцій Pick&Place, сортування об'єктів, автоматизованого складання та програмного переміщення по заданій траєкторії.



Рисунок 2.3. Маніпулятор WLKATA Mirobot 6DOF Mini Industrial Robotic Arm Professional Kit [18].

Основні технічні характеристики маніпулятора наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики маніпулятора [18]

Характеристика	Значення
Тип маніпулятора	Навчально-промисловий роботизований маніпулятор
Кількість ступенів свободи	6 DOF
Тип приводів	Серводвигуни з енкодерами
Матеріал конструкції	Алюмінієвий сплав
Робочий радіус	315 мм
Вантажопідйомність	250–400 г
Точність позиціювання	± 0.2 мм
Маса маніпулятора	≈ 2 кг
Максимальна швидкість	до $200^\circ/\text{с}$
Тип керування	PC, Blockly, Python, ROS
Інтерфейси зв'язку	USB, Bluetooth, Wi-Fi, UART
Підтримка ROS	Так
Підтримка Python	Так
Підтримка Scratch / Blockly	Так
Підтримка G-code	Так
Контролер	STM32
Живлення	12 В
Робоче середовище	Windows, Linux
Підтримка SDK/API	Так
Функція запису рухів	Так
Тип захвату	Механічний gripper
Сфера застосування	STEM, Industry 4.0, автоматизація

Особливістю WLKATA Mirobot є підтримка промислових підходів до керування робототехнічними системами. Маніпулятор сумісний із ROS (Robot Operating System), Python, Blockly, Scratch та G-code, що дозволяє використовувати його як для початкового навчання, так і для дослідження складних алгоритмів автоматичного керування.

Маніпулятор підтримує:

- координатне керування;
- кінематичні розрахунки;
- програмування траєкторій;
- роботу із системами комп'ютерного бачення;
- інтеграцію з PLC та IoT-системами;
- автоматичне калібрування.

2.1.4. Waveshare RoArm-M2-S

Waveshare RoArm-M2-S (рис. 2.4) — це сучасний настільний роботизований маніпулятор із чотирма ступенями свободи, побудований на базі мікроконтролера ESP32 та високомоментних bus-servo приводів. Маніпулятор призначений для дослідження робототехнічних систем, автоматизованого керування, програмування та інтеграції з мобільними платформами й системами комп'ютерного бачення [19].



Рисунок 2.4. Маніпулятор Waveshare RoArm-M2-S

Особливістю RoArm-M2-S є поєднання малої маси конструкції, високої вантажопідйомності та відкритої архітектури. Конструкція маніпулятора виконана з карбонового волокна та алюмінієвого сплаву 5052, що забезпечує високу жорсткість при невеликій масі. Загальна маса робота становить менше 850 г, при цьому маніпулятор здатний працювати з корисним навантаженням до 0.5 кг на вильоті 0.5 м.

Основні технічні характеристики маніпулятора наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Технічні характеристики маніпулятора [19]

Характеристика	Значення
Тип маніпулятора	Настільний роботизований маніпулятор
Кількість ступенів свободи	4 DOF
Контролер	ESP32-WROOM-32U
Тип приводів	High-Torque Bus Servo
Тип енкодерів	12-бітні магнітні
Точність енкодера	0.088°
Матеріал конструкції	Карбон + алюмінієвий сплав
Маса маніпулятора	≈850 г
Вантажопідйомність	0.5 кг
Робоча зона	≈1 м
Робоча напруга	12 В
Максимальний струм	5 А
Максимальний крутний момент сервопривода	30 кг·см
Максимальна швидкість сервопривода	40 rpm
Кут повороту бази	360°
Інтерфейси зв'язку	Wi-Fi, Bluetooth, USB, UART
Підтримка ROS2	Так
Підтримка Arduino IDE	Так
Web-керування	Так
Підтримка Python	Так
Підтримка Raspberry Pi / Jetson	Так
Тип захвату	Механічний gripper
Підтримка open-source	Так

Маніпулятор оснащений 360° поворотною основою та трьома рухомими ланками, що формують робочу область діаметром близько 1 м. Використання direct-drive конструкції приводів підвищує точність позиціювання та зменшує

люфти механізму. Додатково реалізована система подвійного приводу плечового суглоба, яка забезпечує збільшення крутного моменту та покращує вантажопідйомність системи.

У системі застосовуються bus-servo приводи з 12-бітними магнітними енкодерами, які забезпечують точність вимірювання кута до 0.088° . Завдяки зворотному зв'язку можливо реалізовувати координатне керування, автоматичне позиціонування та алгоритми синтезу траєкторій руху.

Контролер ESP32 підтримує: Wi-Fi; Bluetooth; USB; UART; HTTP JSON-команди; ESP-NOW.

Це дозволяє реалізувати дистанційне керування та інтеграцію з різними пристроями, включаючи Raspberry Pi, Jetson Nano та персональні комп'ютери.

RoArm-M2-S підтримує: ROS2; Arduino IDE; Web-керування; Python; відкритий API; вторинну розробку та модифікацію конструкції.

Маніпулятор має відкритий вихідний код та документацію, що робить його зручним для дослідження алгоритмів автоматичного керування та реалізації інженерних проєктів.

2.2. Аналіз об'єкта автоматизації

Для реалізації системи автоматизованого керування в межах дипломного проєкту бакалавра як об'єкт дослідження було обрано навчальний роботизований маніпулятор Hiwonder xArm 1S. Даний маніпулятор є сучасною навчально-дослідницькою платформою, яка поєднує функціональні можливості промислових роботів із простотою експлуатації та програмування. Це робить його ефективним макетом для синтезу керуючої програми та дослідження алгоритмів автоматичного керування.

Однією з головних причин вибору Hiwonder xArm 1S є наявність шести ступенів свободи, що дозволяє реалізувати просторове позиціонування робочого органа та моделювати принципи роботи промислових маніпуляторів. Завдяки цьому можливо досліджувати задачі кінематики, синтезу траєкторій руху, координатного керування та автоматичного позиціонування об'єктів у просторі.

Маніпулятор оснащений інтелектуальними bus-servo приводами із зворотним зв'язком за положенням, температурою та напругою живлення. Наявність системи зворотного зв'язку дозволяє реалізувати алгоритми точного позиційного керування та контролю стану виконавчих механізмів у реальному часі. Це є важливою умовою для синтезу ефективної керуючої програми та дослідження методів автоматичного регулювання.

Важливою перевагою xArm 1S є підтримка сучасних мов та середовищ програмування, зокрема: Arduino IDE; Python; Scratch; графічного програмування.

Конструкція маніпулятора виконана з алюмінієвого сплаву, що забезпечує достатню жорсткість і точність позиціонування при компактних розмірах та невеликій масі системи. При цьому маніпулятор є безпечним для використання в лабораторних умовах та не потребує складного промислового обладнання або спеціальних засобів захисту.

Додатковою перевагою є підтримка режиму запису та відтворення рухів, що дозволяє спрощувати процес навчання маніпулятора та досліджувати алгоритми повторення заданих траєкторій. Також система підтримує координатне керування, завдяки чому можна реалізовувати програмне переміщення захвату до заданих точок простору.

Hiwonder xArm 1S має відкриту архітектуру та широкий набір документації, прикладів програм і готових бібліотек. Це значно спрощує процес розробки програмного забезпечення та дозволяє зосередитись безпосередньо на синтезі керуючих алгоритмів, а не на низькорівневій реалізації апаратної взаємодії.

Таким чином, вибір Hiwonder xArm 1S як макету для синтезу керуючої програми є технічно обґрунтованим, оскільки маніпулятор забезпечує: достатню кількість ступенів свободи; підтримку координатного керування; наявність системи зворотного зв'язку; підтримку сучасних мов програмування; відкриту архітектуру; можливість реалізації алгоритмів автоматичного керування; безпечність та зручність використання в лабораторних умовах.

Основні технічні характеристики Hiwonder xArm 1S:

- кількість ступенів свободи — 5 + захват;
- максимальний робочий радіус, мм — 300;
- кути повороту осей, град:
- основа ± 90 ;
- плече ± 90 ;
- лікоть ± 90 ;
- нахил кисті ± 90 ;
- поворот кисті ± 180 ;
- вантажопідйомність, г — до 500;
- тип приводів — інтелектуальні bus-servo;
- тип зворотного зв'язку — положення, температура, напруга;
- матеріал конструкції — алюмінієвий сплав;
- напруга живлення, В — 7.5;
- блок живлення — 7.5 В / 6 А;
- контролер — STM32;
- інтерфейси зв'язку — USB, Bluetooth;
- підтримка програмування — Arduino IDE, Python, Scratch;
- підтримка координатного керування — так;
- підтримка запису та відтворення рухів — так;
- максимальна кількість команд у пам'яті — до 1020;
- тип захвату — механічний gripper;
- маса маніпулятора, кг — близько 0.9;
- габаритні розміри, мм — $154 \times 140 \times 426$;
- тип керування — ПК, мобільний застосунок, PS2-контролер;
- підтримка кінематичних розрахунків — так;
- точність позиціонування, мм — близько ± 0.5 ;
- сфера застосування — STEM-освіта, робототехніка, автоматизація, дослідження алгоритмів керування.

Роботизований маніпулятор має шість ступенів свободи та працює у декартовій системі координат. Рух виконавчого органа забезпечується послідовним обертанням ланок навколо відповідних осей координат, що дозволяє виконувати просторове позиціонування та орієнтацію захвату.

На схемі (рисунок 2.5) позначено такі ступені свободи маніпулятора:

- q_1 — поворот основи навколо осі Z_0 ;
- q_2 — поворот плеча відносно осі Z_2^* ;
- q_3 — поворот передпліччя;
- q_4 — обертання кисті;
- q_5 — нахил кисті;
- q_6 — поворот захвату навколо власної осі.

Таким чином, маніпулятор забезпечує переміщення робочого органа у просторі та зміну його орієнтації відносно координатних осей X_n , Y_n та Z_n . Наявність шести ступенів свободи дозволяє реалізувати складні траєкторії руху, координатне позиціонування та виконання операцій типу Pick&Place.

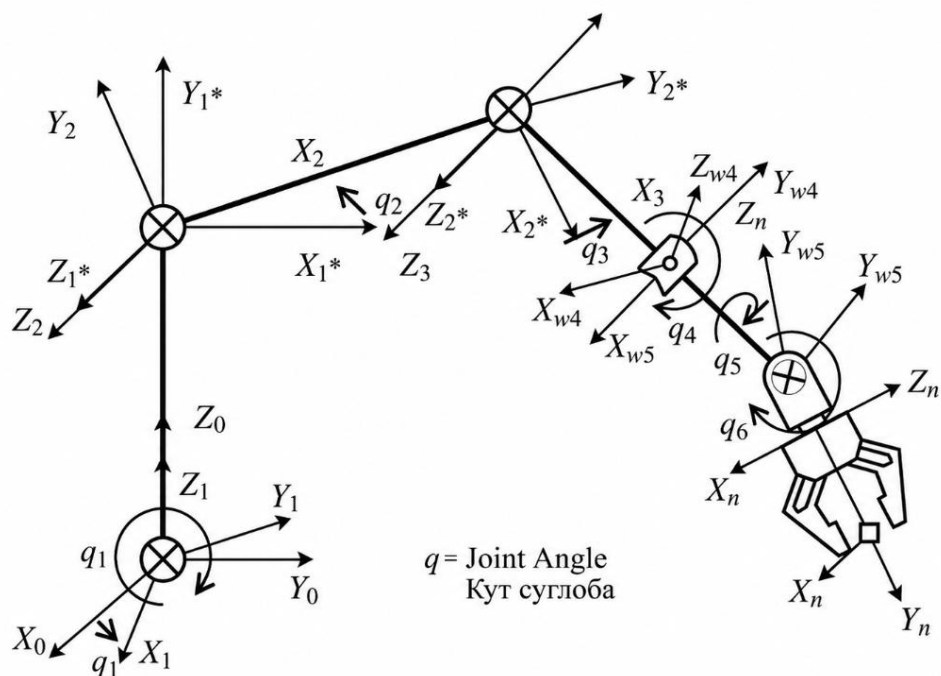


Рисунок 2.5. Схема маніпулятора

На рисунку 2.6 представлена кінематична схема маніпулятора, що досліджується.

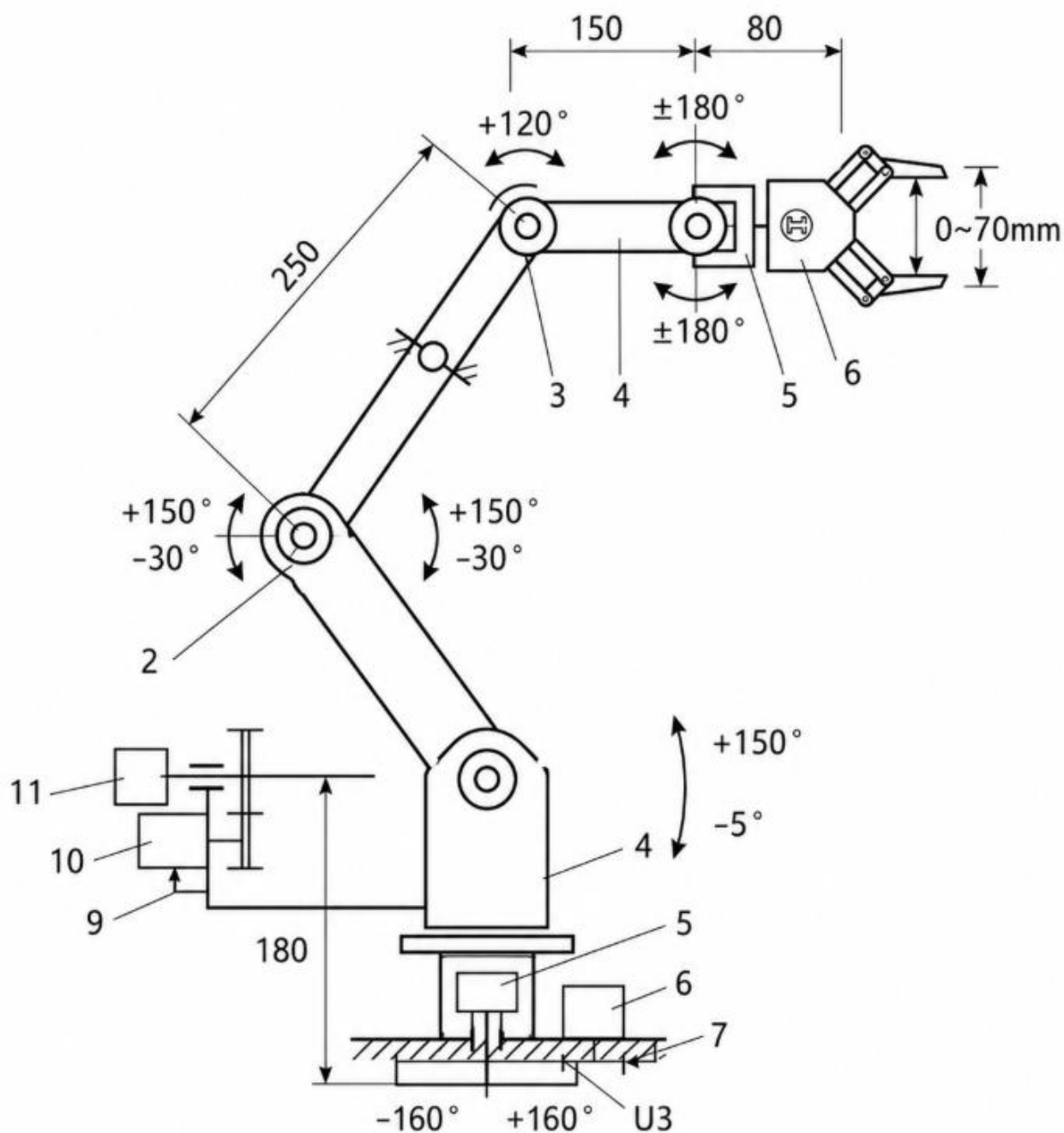


Рисунок 2.6. Кінематична схема маніпулятора.

До складу маніпулятора Hiwonder xArm 1S входять основа маніпулятора (1), плече (2), передпліччя (3), поворотний вузол кисті (4), механізм нахилу кисті

(5) та механічний захват (6). Основа (1) забезпечує обертання маніпулятора навколо вертикальної осі, плече (2) та передпліччя (3) формують основну робочу зону маніпулятора, а вузли кисті (4, 5) забезпечують орієнтацію захвату у просторі. Захват (6) призначений для утримання та переміщення об'єктів.

Для забезпечення руху ланок використовуються інтелектуальні сервоприводи з позиційним зворотним зв'язком. Сервопривод повороту основи (8) забезпечує обертання маніпулятора навколо вертикальної осі, сервопривод плеча (9) відповідає за рух плечової ланки, сервопривод передпліччя (10) забезпечує переміщення передпліччя, а сервопривод кисті та захвату (11) відповідає за орієнтацію робочого органа та роботу захвату.

Керування маніпулятором здійснюється за допомогою контролера STM32 (U3), який підтримує програмування через Arduino IDE та Python.

Маніпулятор встановлюється на опорній поверхні (7) та має робочий радіус до 300 мм. Максимальна ширина розкриття захвату становить 70 мм. Конструкція маніпулятора забезпечує шість ступенів свободи, що дозволяє виконувати просторове позиціонування та реалізовувати складні траєкторії руху робочого органа.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛА 2

У даному розділі було проведено аналіз сучасних лабораторних роботизованих маніпуляторів, які можуть використовуватись як об'єкти автоматизації для дослідження систем керування та синтезу програм руху. Розглянуто конструктивні особливості, технічні характеристики та функціональні можливості маніпуляторів.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що всі розглянуті маніпулятори підтримують реалізацію задач позиціювання, програмного керування та автоматизації технологічних процесів. Разом із тим вони відрізняються кількістю ступенів свободи, точністю позиціювання, типом приводів, функціональними можливостями та підтримкою програмних платформ.

На основі порівняння технічних характеристик як об'єкт автоматизації було обрано роботизований маніпулятор Hiwonder xArm 1S. Даний маніпулятор має шість ступенів свободи, підтримує координатне керування, програмування мовами Arduino та Python, а також оснащений інтелектуальними сервоприводами із позиційним зворотним зв'язком.

Було досліджено конструкцію та кінематичну схему маніпулятора Hiwonder xArm 1S, визначено основні ступені свободи та принципи переміщення робочого органа у просторі. Аналіз конструкції показав, що маніпулятор має достатню функціональність для виконання задач автоматичного позиціювання, переміщення об'єктів та реалізації операцій типу Pick&Place.

Таким чином, проведений аналіз підтвердив доцільність використання Hiwonder xArm 1S як лабораторного макета для синтезу керуючої програми та дослідження систем автоматизованого керування у межах дипломного проєкту бакалавра. Обраний маніпулятор поєднує достатню функціональність, відкриту архітектуру, зручність програмування та безпечність експлуатації, що робить його ефективною платформою для проведення експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ

3.1. Розв’язок прямої задачі кінематики

Для ефективного керування рухом роботів-маніпуляторів необхідним є математичний опис їхнього положення та орієнтації у просторі, що реалізується за допомогою задач кінематики. Однією з базових задач є пряма задача кінематики, яка полягає у визначенні положення та орієнтації робочого органа маніпулятора за відомими значеннями узагальнених координат його ланок.

Розв’язання прямої задачі кінематики є фундаментом для побудови систем керування роботами, моделювання їхнього руху, планування траєкторій та подальшого розв’язання оберненої задачі кінематики. Для опису просторових переміщень і взаємного розташування ланок використовуються різні математичні методи та підходи, серед яких найбільш поширеними є метод матриць однорідних перетворень, параметризація Денавіта–Хартенберга, а також методи, засновані на використанні векторної алгебри та теорії обертів.

Метод Денавіта–Хартенберга є одним із найпоширеніших підходів для математичного опису кінематики роботів-маніпуляторів [20-21]. Його основна суть полягає у стандартизованому способі задання взаємного положення сусідніх ланок маніпулятора за допомогою систем координат та набору параметрів, що описують просторові перетворення між ними.

У межах методу кожній ланці маніпулятора призначається локальна система координат, а взаємне положення двох сусідніх систем координат визначається чотирма параметрами Денавіта–Хартенберга:

- θ_i — кут повороту навколо осі z_{i-1} ;
- d_i — зміщення вздовж осі z_{i-1} ;
- a_i — довжина ланки (відстань між осями z_{i-1} та z_i);
- α_i — кут закручування між осями z_{i-1} та z_i .

Ці параметри дозволяють описати перехід від однієї системи координат до іншої за допомогою матриці однорідного перетворення. Для кожної ланки формується

окрема матриця перетворення, а загальне положення та орієнтація робочого органа маніпулятора визначаються шляхом послідовного множення всіх матриць. Математично матриця перетворення для i -тої ланки має вигляд:

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Основною перевагою методу Денавіта–Хартенберга є його універсальність та компактність, оскільки він дозволяє описувати складні багатоланкові робототехнічні системи єдиним формалізованим способом. Завдяки цьому метод широко використовується під час проєктування, моделювання та програмування роботів-маніпуляторів.

Для розв’язання прямої задачі кінематики заданого шестиланкового робота-маніпулятора було використано метод Денавіта–Хартенберга. На основі кінематичної схеми для кожної ланки маніпулятора задано локальну систему координат та визначено відповідні параметри: кут повороту θ_i , кут закручування α_i , довжину ланки a_i і зміщення d_i (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1.

Параметри кінематичної схеми маніпулятора (рис. 2.6)

i	θ_i, °	α_i, °	a_i, м	d_i, м	θ_i (рад)
1	0	90	0	0,14	0
2	90	0	0,39	0	$\pi/2$
3	90	90	0,02	0	$\pi/2$
4	180	90	0	0,32	π
5	180	90	0,02	0	π
6	0	0	0	0,35	0

На першому етапі було сформовано таблицю параметрів Денавіта–Хартенберга, яка описує взаємне положення сусідніх систем координат маніпулятора. Для кожної ланки складено матрицю однорідного перетворення, що враховує поворот і поступальне зміщення між сусідніми координатними системами.

Після цього було виконано послідовне множення матриць перетворення від основи маніпулятора до його робочого органа. У результаті отримано загальну матрицю перетворення, яка визначає положення та орієнтацію захоплювача відносно базової системи координат.

Підсумкова матриця прямої кінематики має вигляд:

$$T_0^n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,39 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -0,53 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

З отриманої матриці випливає, що положення робочого органа маніпулятора у базовій системі координат становить:

$$x = 0,39 \text{ м}, y = 0 \text{ м}, z = -0,53 \text{ м}.$$

Орієнтація робочого органа визначається матрицею повороту, що входить до складу підсумкової матриці перетворення. Для даного положення маніпулятора орієнтація за кутами Ейлера становить:

$$\gamma = 180^\circ, \beta = 0^\circ, \alpha = 180^\circ.$$

Отже, у результаті розв'язання прямої задачі кінематики визначено просторове положення та орієнтацію робочого органа маніпулятора при заданих значеннях узагальнених координат.

3.2. Розв'язок оберненої задачі кінематики

Обернена задача кінематики полягає у визначенні кутів повороту всіх шарнірів маніпулятора за відомими координатами та орієнтацією робочого органа. Іншими словами, необхідно визначити, які значення кутів у суглобах робота забезпечать переміщення схвата у задану точку простору [22-23].

Для маніпулятора, зображеного на рис. 2.6, приймаємо такі геометричні параметри:

$$L_1 = 180 \text{ мм}$$

$$L_2 = 250 \text{ мм}$$

$$L_3 = 150 \text{ мм}$$

$$L_4 = 80 \text{ мм}$$

де:

- L_1 — висота основи;
- L_2 — довжина першої ланки;
- L_3 — довжина другої ланки;
- L_4 — довжина схвата.

Нехай необхідно забезпечити положення робочого органа у точці: $P(x, y, z)$; та орієнтацію схвата під кутом: φ у вертикальній площині.

Визначення кута повороту основи

Кут повороту основи визначається з проєкції положення робочого органа на площину XY :

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x)$$

Визначення проєкції на робочу площину

Відстань від осі обертання основи до проєкції робочого органа:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Для врахування довжини схвата визначаються координати точки зап'ястя:

$$x_w = r - L_4 \cos \varphi$$

$$z_w = z - L_1 - L_4 \sin \varphi$$

Перевірка досяжності точки

Відстань від плечевого шарніра до точки зап'ястя:

$$d = \sqrt{x_w^2 + z_w^2}$$

Умова існування розв'язку:

$$|L_2 - L_3| \leq d \leq L_2 + L_3$$

Якщо дана умова не виконується, точка є недосяжною для маніпулятора.

Визначення кута ліктьового шарніра

На основі теореми косинусів визначається допоміжний параметр:

$$D = \frac{x_w^2 + z_w^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}$$

Тоді кут ліктьового шарніра:

$$\theta_3 = \pm \arccos(D)$$

Знак «+» або «-» відповідає двом можливим конфігураціям маніпулятора:

- «лікоть вгору»;
- «лікоть вниз».

Визначення кута плечового шарніра

Кут плечового шарніра визначається виразом:

$$\theta_2 = \text{atan2}(z_w, x_w) - \text{atan2}(L_3 \sin \theta_3, L_2 + L_3 \cos \theta_3)$$

Визначення кута орієнтації схвата

Кут повороту зап'ястя визначається із умови забезпечення заданої орієнтації робочого органа:

$$\theta_4 = \varphi - \theta_2 - \theta_3$$

Тоді, загальний розв'язок зворотної задачі кінематики має вигляд:

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(z_w, x_w) - \text{atan2}(L_3 \sin \theta_3, L_2 + L_3 \cos \theta_3)$$

$$\theta_3 = \pm \arccos \left(\frac{x_w^2 + z_w^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \right)$$

$$\theta_4 = \varphi - \theta_2 - \theta_3$$

де

$$x_w = \sqrt{x^2 + y^2} - L_4 \cos \varphi$$

$$z_w = z - L_1 - L_4 \sin \varphi$$

Отримані співвідношення дозволяють визначити всі необхідні кути повороту ланок маніпулятора для забезпечення заданого положення та орієнтації робочого органа.

3.3. Структурна схема маніпулятора

Структурна схема системи керування маніпулятором (рис. 3.1) призначена для забезпечення координації роботи всіх вузлів робота, формування керуючих сигналів та реалізації зворотного зв'язку за положенням виконавчих механізмів. До складу системи входять персональний комп'ютер, мікроконтролер, датчики кутового положення, драйвери двигунів та виконавчі механізми маніпулятора.

Основний керуючий елемент - мікроконтролер, який здійснює обробку команд, формування сигналів керування та координацію роботи всіх ступенів

рухливості маніпулятора. Персональний комп'ютер використовується для введення програм руху, налаштування параметрів роботи та моніторингу стану системи. Обмін даними між персональним комп'ютером і мікроконтролером може здійснюватися через інтерфейс USB, UART або інший цифровий канал зв'язку.

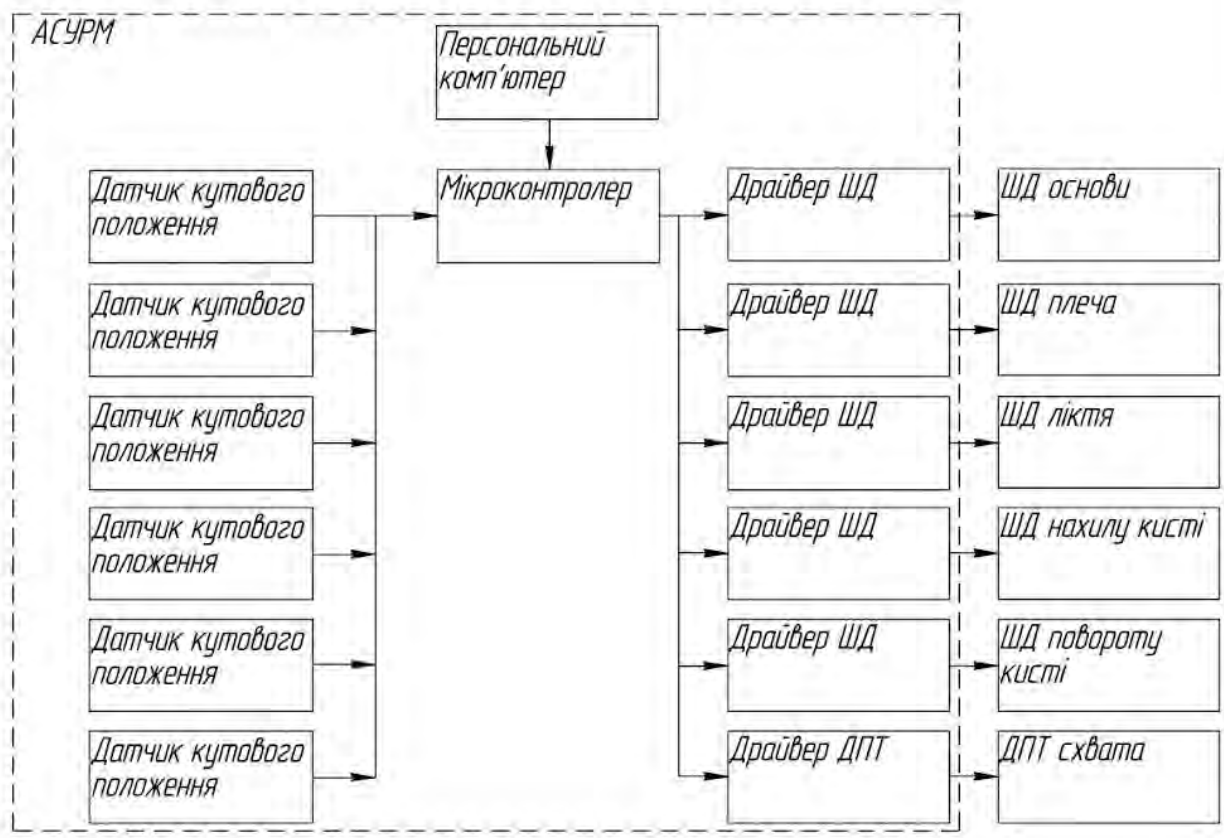


Рисунок 3.1. Структурна схема маніпулятора

Для контролю положення кожної осі застосовуються датчики кутового положення. Сигнали з датчиків надходять до мікроконтролера, де виконуються аналіз поточного положення ланок маніпулятора та формування коригувальних дій. Наявність зворотного зв'язку забезпечує підвищення точності позиціонування та стабільності роботи системи.

Керування приводами виконується через драйвери двигунів. Для кожного ступеня рухливості передбачений окремий драйвер, який підсилює сигнали керування мікроконтролера та подає необхідну потужність на виконавчі двигуни.

Поворот основи забезпечує орієнтацію маніпулятора в горизонтальній площині в межах $\pm 160^\circ$. Ланки плеча та ліктя формують основний робочий простір маніпулятора. Приводи кисті забезпечують зміну орієнтації робочого органа, а схват виконує захоплення та утримання об'єктів. Ширина розкриття схвата становить від 0 до 70 мм.

Принцип роботи системи полягає у тому, що оператор задає необхідні параметри руху через персональний комп'ютер. Команди надходять до мікроконтролера, який формує сигнали керування драйверами двигунів. Драйвери приводять у рух відповідні виконавчі механізми маніпулятора. Датчики кутового положення безперервно передають інформацію про стан осей до мікроконтролера, що забезпечує реалізацію замкненої системи автоматичного керування.

Розроблена структурна схема дозволяє забезпечити точне позиціонування робочого органа, узгоджену роботу всіх приводів та можливість автоматизованого керування маніпулятором.

3.4. Функціональна схема керування роботизованим маніпулятором

Функціональна схема системи керування маніпулятором призначена для забезпечення формування, обробки та реалізації керуючих сигналів, необхідних для точного позиціонування робочого органа робота. Система керування побудована за багатоконтурним принципом та включає контур формування траєкторії руху, контур керування положенням і контур стабілізації швидкості (рисунки 3.2.).

Основними елементами системи є органи керування, блок формування траєкторії, регулятори положення та швидкості, підсилювач потужності, виконавчі приводи маніпулятора, а також датчики зворотного зв'язку.

Оператор за допомогою органів керування задає необхідні параметри руху маніпулятора. На основі введених команд формується закон зміни координат:

$$q_i = f(t),$$

де q_i — узагальнені координати ланок маніпулятора.

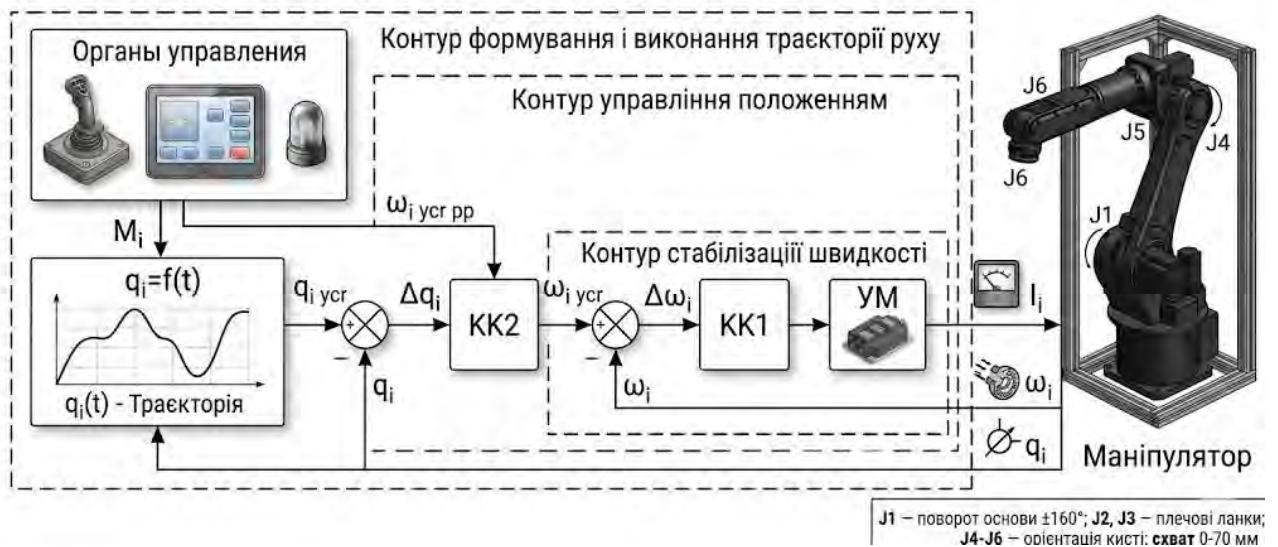


Рисунок 3.2. Функціональна схема керування роботизованим маніпулятором

Сформовані значення координат $q_{i\text{уст}}$ надходять до контуру керування положенням, де здійснюється порівняння заданого та поточного значення координати q_i , отриманого від датчиків кутового положення. У результаті формується сигнал похибки:

$$\Delta q_i = q_{i\text{уст}} - q_i.$$

Сигнал похибки надходить на коригуючий контур положення $KK2$, який формує необхідне значення кутової швидкості $\omega_{i\text{уст}}$.

Далі у контурі стабілізації швидкості здійснюється порівняння заданої та фактичної швидкості ω_i , отриманої від датчиків швидкості. Утворюється сигнал похибки швидкості $\Delta \omega_i = \omega_{i\text{уст}} - \omega_i$.

Сигнал похибки надходить до регулятора швидкості $KK1$, який формує керуючий сигнал для підсилювача потужності $УМ$. Підсилювач забезпечує необхідний рівень струму I_i , який подається на виконавчі двигуни маніпулятора.

Маніпулятор має шість ступенів рухливості:

- $J1$ — поворот основи;
- $J2, J3$ — приводи плеча та ліктя;
- $J4-J6$ — приводи орієнтації кисті;
- схват — механізм захоплення об'єкта.

Система працює за принципом замкненого керування із зворотними зв'язками за положенням та швидкістю. Датчики кутового положення та швидкості безперервно передають інформацію про стан ланок маніпулятора до системи керування, що дозволяє забезпечити високу точність позиціонування, плавність руху та стійкість роботи маніпулятора.

Функціональна схема реалізує ієрархічний принцип керування, при якому зовнішній контур відповідає за формування траєкторії руху, середній — за керування положенням ланок, а внутрішній — за стабілізацію швидкості виконавчих приводів. Така структура забезпечує ефективне керування маніпулятором у режимах позиціонування, супроводження траєкторії та виконання технологічних операцій.

3.5. Алгоритм роботи системи керування роботом маніпулятором

Ефективність роботи роботизованого маніпулятора значною мірою залежить від алгоритму функціонування системи керування, який визначає послідовність обробки команд, формування керуючих сигналів та координацію рухів усіх виконавчих ланок. Алгоритм роботи системи керування забезпечує узгоджену взаємодію між оператором, обчислювальним пристроєм, датчиками зворотного зв'язку та виконавчими приводами маніпулятора.

Основною задачею алгоритму є реалізація точного позиціонування робочого органа у заданому просторі, забезпечення необхідної траєкторії руху та підтримання стабільної роботи приводів у різних режимах функціонування. Для цього система керування виконує прийом і обробку команд оператора, формування траєкторії руху, розрахунок параметрів керування, а також контроль поточного стану маніпулятора за допомогою датчиків положення та швидкості.

Робота системи здійснюється за принципом замкненого автоматичного керування із використанням зворотних зв'язків. Отримані від датчиків сигнали безперервно порівнюються із заданими значеннями, після чого система формує коригувальні впливи на виконавчі приводи. Такий підхід дозволяє підвищити

точність позиціонування, плавність переміщення ланок та надійність роботи маніпулятора.

В Додатку 3 наведено розроблений алгоритм роботи системи керування.

На початковому етапі виконується ініціалізація системи керування, під час якої активуються основні програмні та апаратні модулі, перевіряється працездатність датчиків, виконавчих механізмів та каналів зв'язку. Після цього система переходить до зчитування даних із датчиків навколишнього середовища та датчиків стану робота.

Отримані дані передаються до системи введення та синтезу інформації, де здійснюється їх фільтрація, попередня обробка та об'єднання. На основі обробленої інформації формується інформаційна модель стану робототехнічної системи, яка містить відомості про поточне положення маніпулятора, параметри руху та стан робочого середовища.

Сформовані дані надходять до блоку адаптивного керування та планування, у якому виконується аналіз поточного стану робота і зовнішніх умов функціонування. Для прийняття оптимального рішення система звертається до бази знань та модулів машинного навчання, які дозволяють адаптувати алгоритм керування до зміни умов роботи.

На основі результатів аналізу формуються оптимальні керуючі команди для виконавчих механізмів маніпулятора. Далі команди передаються до системи виведення та реконфігурації, після чого керуючі сигнали надходять на приводи робота.

Після подачі керуючих сигналів виконавчі механізми здійснюють необхідні рухи ланок маніпулятора. Інформація про результати виконання дій надходить до системи через канали зворотного зв'язку від датчиків положення, швидкості та інших сенсорів.

На наступному етапі система виконує порівняння отриманих результатів із заданими параметрами. Якщо результати відповідають встановленим вимогам, система продовжує роботу у поточному режимі та здійснює моніторинг стану робототехнічної системи.

У випадку виявлення відхилень або невідповідності заданим параметрам виконується коригування параметрів керування, оновлення алгоритмів та бази знань. Після цього система повторно формує керуючі команди та цикл роботи повторюється.

Таким чином, запропонований алгоритм забезпечує адаптивне керування роботом-маніпулятором, підвищує точність виконання операцій, стабільність роботи системи та дозволяє ефективно функціонувати в умовах зміни зовнішнього середовища.

Програмний код наведено у додатку 4.

Наведений програмний код реалізує імітаційну модель адаптивної системи керування роботом-маніпулятором. Програма написана мовою Python та може виконуватися у середовищах PyCharm, Visual Studio Code, Jupyter Notebook або стандартному інтерпретаторі Python. Код використовується для моделювання логіки роботи системи керування, перевірки алгоритму обробки даних від датчиків, формування команд керування та реалізації зворотного зв'язку.

У реальній системі керування роботом-маніпулятором використовується мікроконтролер STM32, тому практична реалізація алгоритму для апаратної частини виконується у середовищі STM32CubeIDE мовою C/C++. У такому випадку Python-програма виступає як модель або прототип алгоритму, а на мікроконтролері STM32 реалізуються функції зчитування сигналів із датчиків, формування ШІМ-сигналів для драйверів двигунів, обробка зворотного зв'язку та передавання команд на виконавчі приводи.

Основою програми є клас AdaptiveRobotControlSystem, який описує роботу адаптивної системи керування. У ньому задано базу знань та цільові параметри системи: допустиму похибку положення, допустиму похибку швидкості та стан виявлення перешкоди. Після запуску програми виконується ініціалізація системи, зчитування даних із датчиків, обробка отриманої інформації та формування інформаційної моделі стану робота.

На наступному етапі система аналізує стан маніпулятора і робочого середовища. Якщо рух є безпечним, формується команда руху за заданою

траєкторією. Якщо виявлено перешкоду, система формує команду зупинки та обходу перешкоди. Після цього команда передається до виконавчих приводів робота, які виконують відповідні механічні дії.

Важливою частиною алгоритму є реалізація зворотного зв'язку. Після виконання дії система отримує нові дані про похибку положення, похибку швидкості та наявність перешкоди. Ці значення порівнюються із заданими допустимими параметрами. Якщо результат відповідає вимогам, система продовжує роботу в поточному режимі. Якщо параметри виходять за допустимі межі, виконується коригування параметрів керування та оновлення алгоритмів у базі знань.

Таким чином, наведений код демонструє принцип роботи адаптивної системи керування роботом-маніпулятором із використанням зворотного зв'язку. Для реального робота на базі мікроконтролера STM32 цей алгоритм може бути адаптований у вигляді вбудованої програми, де замість випадково згенерованих значень використовуються реальні сигнали з енкодерів, датчиків положення, датчиків швидкості та датчиків перешкод.

3.6. Моделювання роботи адаптивної системи керування роботом-маніпулятором

Для перевірки працездатності розробленого алгоритму було виконано моделювання роботи адаптивної системи керування робототехнічним маніпулятором. Програмну модель реалізовано мовою Python. Моделювання дозволило дослідити процес функціонування системи керування в умовах зміни параметрів зовнішнього середовища, оцінити вплив перешкод на точність позиціонування та перевірити ефективність алгоритму адаптивної корекції параметрів керування.

Програмна модель реалізує основні функціональні блоки адаптивної системи керування: збір інформації від датчиків, обробку та фільтрацію даних, формування інформаційної моделі середовища, аналіз стану робота, формування керуючих команд, передачу команд виконавчим механізмам та контур зворотного

зв'язку. Контроль роботи системи здійснювався за трьома основними параметрами: похибкою позиціонування, похибкою швидкості та наявністю перешкод у робочій зоні.

Для оцінювання ефективності роботи системи було виконано моделювання п'яти циклів роботи. Тривалість одного циклу становила 1 с. Допустима похибка позиціонування відповідно до технічного завдання була прийнята рівною 2 мм.

Похибка позиціонування визначалася як абсолютна різниця між заданим та фактичним положенням робочого органа маніпулятора:

$$e = |x_{зад} - x_{факт}|,$$

де $x_{зад}$ – задане положення маніпулятора, мм;

$x_{факт}$ – фактичне положення маніпулятора, отримане за даними датчиків, мм.

Для моделювання було прийнято номінальне положення робочого органа $x_{зад} = 500$ мм. Фактичне положення визначалося з урахуванням випадкових збурень та похибок вимірювання.

Результати моделювання наведено в таблиці 3.2.

У першому циклі система зафіксувала появу перешкоди в робочій зоні, що призвело до збільшення похибки позиціонування до 2,7 мм. Після аналізу ситуації було виконано коригування параметрів керування та змінено траєкторію руху маніпулятора.

У другому циклі після адаптації параметрів похибка зменшилася до 1,9 мм, що відповідає встановленим вимогам. У третьому циклі знову було виявлено перешкоду, внаслідок чого похибка збільшилася до 2,3 мм. Система автоматично виконала коригування параметрів керування та оновила керуючі команди.

У четвертому та п'ятому циклах перешкоди були відсутні. Похибка позиціонування становила відповідно 1,4 мм та 1,6 мм, що є меншим за допустиме значення 2 мм.

Результати зміни похибки позиціонування наведені на рисунку 3.12.

Аналіз графіка показує, що максимальна похибка спостерігається в моменти виникнення перешкод і становить 2,7 мм та 2,3 мм. Після спрацювання

алгоритму адаптивного керування система забезпечує зменшення похибки до рівня 1,4–1,9 мм. Середнє значення похибки за результатами моделювання становить

$$e_{сер} = (2,7 + 1,9 + 2,3 + 1,4 + 1,6)/5 = 1,98 \text{ мм.}$$

Таблиця 3.2

Результати моделювання адаптивної системи керування

Цикл	хзад, мм	хфакт, мм	Похибка е, мм	Перешкода
1	500	497,3	2,7	Так
2	500	498,1	1,9	Ні
3	500	497,7	2,3	Так
4	500	498,6	1,4	Ні
5	500	498,4	1,6	Ні

Отримане значення практично відповідає встановленій допустимій похибці позиціонування 2 мм.

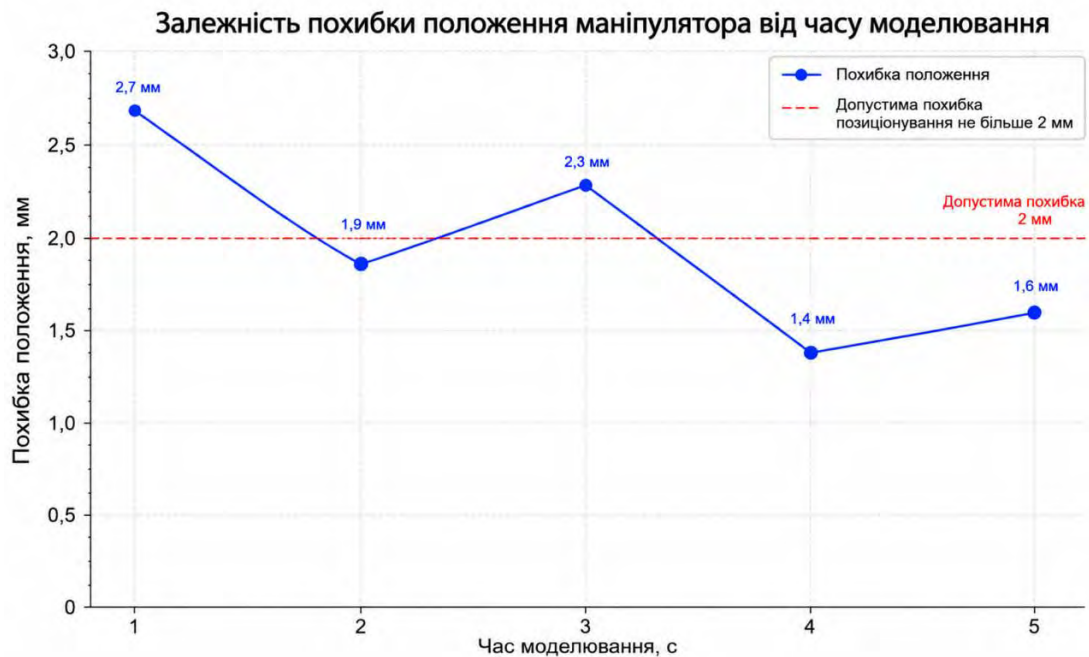


Рисунок 3.3 Залежність похибки положення маніпулятора від часу моделювання

Таким чином, результати моделювання підтверджують працездатність розробленого алгоритму адаптивного керування. Використання зворотного зв'язку дозволяє своєчасно виявляти відхилення від заданих параметрів, автоматично виконувати корекцію режимів роботи та підтримувати необхідну точність позиціонування маніпулятора. Розроблений алгоритм може бути реалізований на мікроконтролері STM32 у складі реальної системи керування робототехнічним маніпулятором.

Для того, щоб похибки положення маніпулятора не виходила за задані межі, було внесено корекцію у початковий програмний код (ДОДАТОК 5).

На відміну від початкової версії алгоритму (ДОДАТОК 3), у вдосконаленому варіанті (ДОДАТОК 6) було введено попереджувальний поріг корекції. Встановлено, що допустима похибка позиціонування не повинна перевищувати 2 мм. Для запобігання перевищенню цього значення введено додатковий поріг спрацювання адаптивного регулятора на рівні 80 % від максимально допустимого значення:

$$[e_{\text{пор}} = 0,8 \cdot e_{\text{доп}} = 0,8 \cdot 2 = 1,6 \text{ мм}.]$$

Таким чином, система виконує коригування параметрів керування не після перевищення допустимої похибки, а завчасно, коли похибка досягає значення 1,6 мм. Це дозволяє компенсувати вплив випадкових збурень і зменшити ймовірність виходу системи за межі заданої точності.

Похибка позиціонування визначалась як абсолютна різниця між заданим та фактичним положенням робочого органа:

$$[e = |x_{\text{зад}} - x_{\text{факт}}|,]$$

де $(x_{\text{зад}})$ — задане положення маніпулятора, мм;

$(x_{\text{факт}})$ — фактичне положення, визначене за сигналами датчиків зворотного зв'язку, мм.

Для проведення моделювання було виконано п'ять циклів роботи системи. Тривалість одного циклу становила 1 с. На першому та другому циклах система виявила відхилення, близькі до встановленого порога корекції, після чого було

автоматично змінено параметри керування приводами. Починаючи з третього циклу система працювала у стабільному режимі без перевищення допустимих значень.

Результати моделювання наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Результати моделювання адаптивної системи керування

Номер циклу	Час моделювання, с	Похибка позиціонування, мм	Режим роботи
1	1	1,8	Виконано адаптивну корекцію
2	2	1,6	Досягнуто порога корекції
3	3	1,5	Нормальний режим
4	4	1,3	Нормальний режим
5	5	1,4	Нормальний режим

На рисунку 3.4 наведено графік зміни похибки позиціонування маніпулятора під час моделювання.

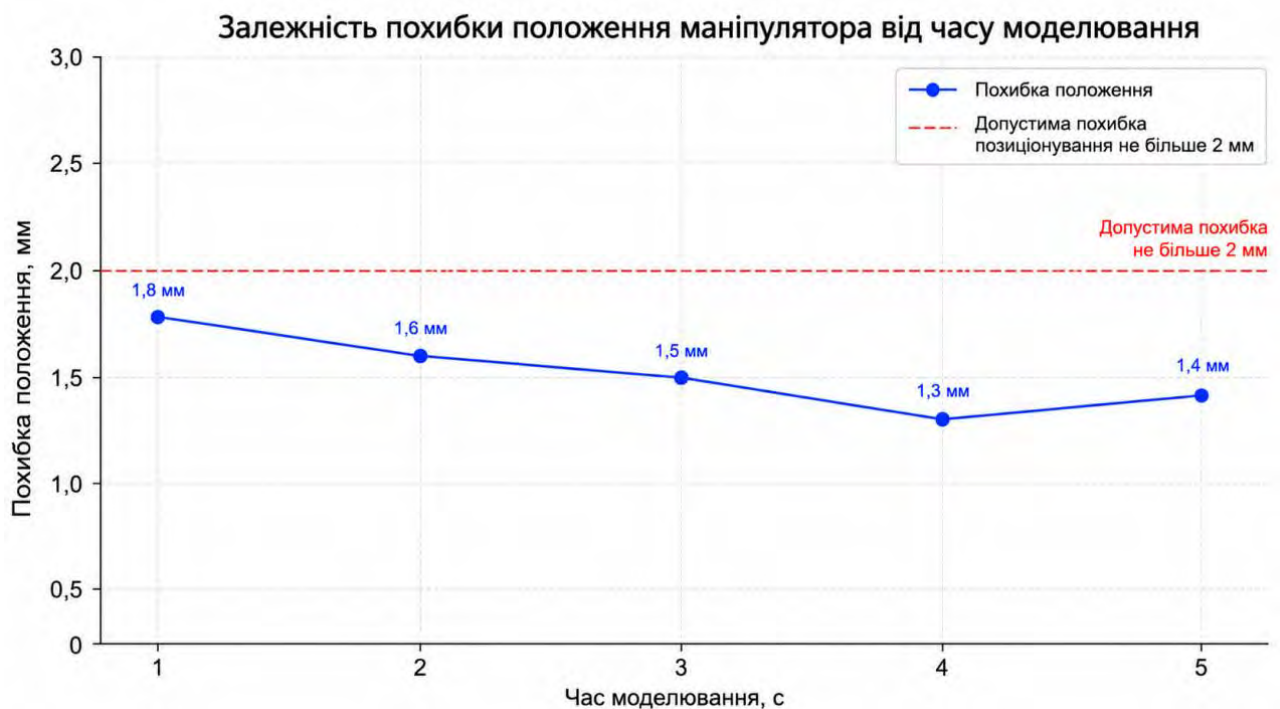


Рисунок 3.4 Залежність похибки положення маніпулятора від часу моделювання

З аналізу графіка видно, що максимальна похибка позиціонування спостерігається на першому циклі та становить 1,8 мм. Після спрацювання алгоритму адаптивного коригування похибка поступово зменшується до значень 1,5–1,3 мм. Жодного разу під час моделювання не було зафіксовано перевищення допустимої похибки 2 мм.

Середня похибка позиціонування за результатами моделювання становить

$$[e_{\text{сер}} = \frac{1,8 + 1,6 + 1,5 + 1,3 + 1,4}{5} = 1,52 \text{ мм}.]$$

Максимальна похибка:

$$[e_{\text{max}} = 1,8 \text{ мм}.]$$

Запас точності відносно допустимого значення визначається як

$$[\Delta e = e_{\text{доп}} - e_{\text{max}} = 2,0 - 1,8 = 0,2 \text{ мм}.]$$

Отримані результати свідчать про ефективність запропонованого алгоритму адаптивного керування. Завдяки використанню попереджувального порога корекції та постійному контролю параметрів руху вдалося забезпечити стабільну роботу системи та гарантовано утримувати похибку позиціонування в межах заданого технічного завдання. Використання зворотного зв'язку дозволяє своєчасно компенсувати вплив зовнішніх збурень, підвищити точність позиціонування маніпулятора та забезпечити надійність функціонування робототехнічної системи.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛА 3

У третьому розділі було розроблено систему керування роботом-маніпулятором та виконано дослідження її основних функціональних і математичних складових. Проведено розв’язання прямої задачі кінематики із використанням методу Денавіта–Хартенберга, що дозволило визначити положення та орієнтацію робочого органа маніпулятора у просторі за заданими значеннями узагальнених координат. Отримано підсумкову матрицю перетворення та визначено координати й орієнтацію схвата у базовій системі координат.

Також виконано розв’язання оберненої задачі кінематики, у межах якої отримано аналітичні співвідношення для визначення кутів повороту ланок маніпулятора за заданими координатами робочого органа. Отримані математичні залежності забезпечують можливість реалізації точного позиціонування маніпулятора та побудови траєкторій руху.

Розроблено структурну та функціональну схеми системи керування роботизованим маніпулятором. Запропонована структура системи забезпечує координацію роботи всіх виконавчих механізмів, реалізацію зворотного зв’язку та формування керуючих сигналів для приводів. Функціональна схема реалізує багатоконтурний принцип керування із контурами формування траєкторії, керування положенням та стабілізації швидкості, що дозволяє підвищити точність і стійкість роботи системи.

У розділі також розроблено алгоритм роботи системи керування маніпулятором, який забезпечує обробку даних із датчиків, формування керуючих команд, адаптацію до змін умов роботи та реалізацію зворотного зв’язку. Наведено опис програмної реалізації алгоритму мовою Python та визначено можливість його подальшої адаптації для мікроконтролера STM32 у середовищі STM32CubeIDE.

Таким чином, у результаті виконаної роботи створено математичну, структурну та алгоритмічну основу системи керування роботом-маніпулятором,

що забезпечує точне позиціонування, стабільність функціонування та можливість подальшого практичного впровадження робототехнічної системи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було проведено аналіз сучасних робототехнічних систем та досліджено особливості побудови систем керування роботизованими маніпуляторами. Встановлено, що розвиток концепції Industry 4.0 та автоматизації виробництва обумовлює необхідність створення ефективних, адаптивних та інтелектуальних систем керування роботами-маніпуляторами.

У роботі виконано аналіз лабораторних роботизованих маніпуляторів та обґрунтовано вибір маніпулятора Hiwonder xArm 1S як об'єкта автоматизації. Визначено його конструктивні особливості, технічні характеристики, функціональні можливості та переваги для реалізації задач автоматизованого керування.

У процесі дослідження було розроблено математичну модель кінематики маніпулятора із використанням методу Денавіта–Хартенберга. Розв'язано пряму та обернену задачі кінематики, що дозволило визначити положення та орієнтацію робочого органа маніпулятора, а також забезпечити розрахунок кутів повороту ланок для реалізації заданих траєкторій руху.

Розроблено структурну та функціональну схеми системи керування роботизованим маніпулятором. Запропонована система побудована за принципом замкненого автоматичного керування із використанням зворотних зв'язків за положенням і швидкістю, що забезпечує високу точність позиціонування, стабільність роботи та узгоджену взаємодію всіх виконавчих механізмів.

Також у роботі розроблено алгоритм роботи системи керування маніпулятором та реалізовано програмну модель адаптивної системи керування мовою Python. Проведене моделювання підтвердило працездатність запропонованого алгоритму, можливість адаптації системи до зміни умов роботи та ефективність використання зворотного зв'язку для коригування параметрів керування. Передбачено можливість подальшої реалізації системи на базі мікроконтролера STM32 із використанням середовища STM32CubeIDE.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої системи керування у навчальному процесі, лабораторних дослідженнях, а також для дослідження алгоритмів автоматизації та робототехніки. Запропоновані рішення можуть бути основою для подальшого розвитку роботизованих систем, інтеграції методів штучного інтелекту, комп'ютерного бачення та автономного керування у сучасних робототехнічних комплексах.

Для перевірки працездатності розробленого алгоритму було створено програмну модель мовою Python та виконано моделювання роботи системи в умовах впливу зовнішніх збурень і появи перешкод у робочій зоні. Результати моделювання початкового алгоритму показали, що в окремих циклах роботи похибка позиціонування досягала 2,7 мм та 2,3 мм, що перевищує встановлену допустиму похибку 2 мм. Це свідчить про необхідність удосконалення механізму адаптації та корекції параметрів керування.

З метою підвищення точності позиціонування було модернізовано алгоритм керування шляхом введення попереджувального порога корекції на рівні 80 % від допустимої похибки. Встановлено значення порога 1,6 мм, при досягненні якого система виконує завчасне коригування параметрів керування, зменшення швидкості переміщення та уточнення траєкторії руху робочого органа маніпулятора.

Результати повторного моделювання підтвердили ефективність запропонованого підходу. Максимальна похибка позиціонування склала 1,8 мм, що не перевищує допустимого значення 2 мм. Середня похибка позиціонування становила 1,52 мм, а запас точності відносно граничного значення склав 0,2 мм. Отримані результати свідчать про підвищення стабільності роботи системи та ефективне компенсування впливу зовнішніх збурень.

Таким чином, розроблений алгоритм адаптивного керування забезпечує необхідну точність позиціонування робота-маніпулятора, дозволяє своєчасно реагувати на зміни умов функціонування та підтримувати параметри руху в межах встановлених вимог. Запропоновані технічні рішення можуть бути

реалізовані на мікроконтролері STM32 та використані під час створення реальної системи керування робототехнічним маніпулятором.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Колектив 4.0: як техніка замінює людей на робочих місцях І чому це може бути вигідно бізнесу https://mind.ua/publications/20200168-kolektiv-4-0-yak-tehnika-zaminyae-lyudej-na-robochih-miscyah?utm_source=chatgpt.com
2. Industry 4.0 – історичний поворот в промисловості https://svaltera.lviv.ua/2018/09/25/industry-4-0/?utm_source=chatgpt.com
3. Р. М. Лісова Індустрія 4.0 та цифрова готовність українських промислових підприємств // *Економічний вісник. Серія: фінанси, облік, оподаткування*. 2021. Вип. 7. С. 86–96. DOI: 10.33244/2617-5932.7.2021.86-96.
4. International Federation of Robotics <https://ifr.org/>
5. Нестор Шпак, Святослав Кісь Розвиток індустрії 4.0: нові можливості та виклики для сучасних підприємств // *Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи* : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 18 трав. 2022 р. Київ, 2022. С. [вказати сторінки, якщо відомі].
6. Трет'як А.В. Основи робототехніки: навчальний посібник для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А.В. Трет'як, А.М. Кльон. – Полтава, видавництво національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 135 с.
7. В Україні починається масове виробництво роботизованих наземних платформ, повідомив міністр цифрової трансформації Михайло Федоров. <https://texty.org.ua/fragments/111986/v-ukrayini-masovo-vyroblyatymut-nazemni-drony-vyprobuvaly-uzhe-ponad-50-riznoho-pryznachennya-foto/>
8. Промислові роботи <https://termobud.com.ua/ua/products/promishlenniy-roboti/>

9. ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни «Основи мехатроніки» для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» («Колісні та гусеничні транспортні засоби») усіх форм навчання. Частина 2 - змістовий модуль 1. Промислова робототехніка / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 98 с.
10. Основи мехатроніки : навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 372 с.
11. ScienceDirect : вебсайт. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення: 08.05.2026).
12. Springer Handbook of Robotics : вебсайт. URL: <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-3-319-32552-1> (дата звернення: 08.05.2026).
13. IEEE Robotics and Automation Society : вебсайт. URL: <https://www.ieee-ras.org> (дата звернення: 08.05.2026).
14. MDPI Robotics Journal : вебсайт. URL: <https://www.mdpi.com/journal/robotics> (дата звернення: 08.05.2026).
15. DFRobot. *Romeo BLE mini V2.0 User Manual* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.botnroll.com/img/cms/ROB05040_Manual.pdf (дата звернення: 17.05.2026).
16. Робот TinkerKit Braccio – програмована роботизована рука на Arduino. – Режим доступу: https://shop.sb-components.co.uk/products/tinkerkit-braccio-robot-programmable-arduino-robotic-arm?variant=55202338865529&country=UA¤cy=UAH&utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 17.05.2026).
17. Hiwonder xArm 1S Programming Desktop Robotic Arm with Powerful and Robust Intelligent Bus Servos Featuring Position and Voltage Feedback (Unassembled) [Електронний ресурс] // Desertcart. – Режим доступу: [Desertcart](https://www.desertcart.com) (дата звернення: 17.05.2026).

18. Mirobot 6DOF Mini Industrial Robotic Arm Professional Kit Programmable Lightweight [Електронний ресурс] // Desertcart. – Режим доступу: [Desertcart](#) (дата звернення: 17.05.2026).
19. Waveshare RoArm-M2-S 4-DOF High Torque Bus Servo Robotic Arm Wireless Control [Електронний ресурс] // eBay. – Режим доступу: [eBay](#) (дата звернення: 17.05.2026).
20. Вігуро М. Розв'язання прямої задачі кінематики зварювального маніпулятора з шістьма ступенями свободи / М. Вігуро, А. Маляр // Електроенергетичні та електромеханічні системи. — 2021. — Вип. 3, № 1. — С. 27–34. — DOI: <https://doi.org/10.23939/sepes2021.01.027>.
21. Agustian I. Robot Manipulator Control with Inverse Kinematics PD-Pseudoinverse Jacobian and Forward Kinematics Denavit Hartenberg / I. Agustian, N. Daratha, R. Faurina, A. Suandi, Sulistyaningsih // Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi. — 2021. — Vol. 21, No. 1. — Pp. 8–18. — DOI: <https://doi.org/10.14203/jet.v21.8-18>.
22. Introduction to Robotics: Mechanics and Control Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 3rd ed. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2005. 400 p. ISBN 978-0201543612.
23. Robotics: Modelling, Planning and Control Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. London : Springer, 2009. 632 p. ISBN 978-1846286414.
24. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. — 192 с.
25. Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 55 с.
26. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 115 с.

- 27.Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.
- 28.Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
- 29.Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.