Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка системи керування роботом-маніпулятором

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
Шифр, назва
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Шифр, назва
Освітня програма «Галузеве машинобудування»

Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група МБм-24-1 _____ Д.С. Пінковський
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник _____ С.І. Пундик
Підпис, дата Ініціали, прізвище

Нормоконтролер _____ О.Г. Тимощук
Підпис, дата Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС _____ доц. В.С. Неймак
Підпис, дата Ініціали, прізвище
10 12 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень магістр

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
Шифр і назва

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Шифр і назва

Освітня програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

10. 12 .2025р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Пінковський Дмитро Сергійович
Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка системи керування роботом-маніпулятором

керівник роботи Пундик Сергій Іванович, к.т.н., доцент
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики навчальних та промислових роботів-маніпуляторів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. 1 Огляд та аналіз сучасного стану навчальних робототехнічних систем. 2 Розробка системи керування роботом-маніпулятором. 3 Кінематичний аналіз. методика вирішення прямої та оберненої задач кінематики. Висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
1. Моделі роботів-маніпуляторів (ДО, А1). 2. Стенд керування роботом-маніпулятором (ВЗ, А1). 3. Режими роботи системи керування (С2, А1). 4. Кришка блоку керування (А1). 5. Кріплення захвату верхнє (А1). 6. Кріплення захвату нижнє (А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз сучасного стану	до 01.11.25р.	
навчальних робототехнічних систем.		
2 Розробка системи керування роботом-	до 15.11.25р.	
маніпулятором.		
3 Кінематичний аналіз. Методика вирішення	до 25.11.25р.	
прямої та оберненої задач кінематики.		
4 Оформлення пояснювальної записки та	до 10.12.25р.	
графічного матеріалу.		

Студент(ка) _____ Д.С. Пінковський
Підпис Ім’я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник роботи _____ С.І. Пундик
Підпис Ім’я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Пінковський Дмитро Сергійович

2. Тема магістерської роботи Розробка системи керування роботом-маніпулятором

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 70

5. Інтенсивний розвиток автоматизації виробництва зумовлює потребу у створенні ефективних навчально-дослідницьких робототехнічних комплексів. Промислові роботи є надто дорогими для навчальних лабораторій, тоді як спрощені освітні моделі мають обмежену точність і функціональність. Метою роботи є аналіз та розробка системи керування навчальним роботом-маніпулятором на базі відкритої апаратної платформи. У розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. У першому розділі проведено огляд та аналіз сучасного стану навчальних робототехнічних систем. У другому розділі проведено безпосередньо розробку системи керування роботом-маніпулятором. У третьому розділі проведено кінематичний аналіз, та розглянута методика вирішення прямої та оберненої задач кінематики розробленого робота-маніпулятора.

Підпис студента _____

"10" 12 2025 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від "18" 12 2025 р.

Оцінка проекту ЕК відмінно / A / 100
Рекомендації ЕК впровадження у навчальний процес

Особливі відмітки –

Технічний секретар Підсва Д.В.

"18" 12 2025 р.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ 6

1 Огляд та аналіз сучасного стану навчальних робототехнічних систем 8

1.1 Необхідність розвитку роботів-маніпуляторів у навчанні та дослідженнях 8

1.2 Сучасні промислові робототехнічні системи 11

1.3 Навчальні та дослідницькі роботи-маніпулятори 15

1.4 Мікроконтролерні платформи та програмне забезпечення 20

1.5 Проблеми та обмеження існуючих рішень 23

Висновки до першого розділу 24

2 Розробка системи керування роботом-маніпулятором 25

2.1 Аналіз вихідної моделі та обґрунтування переходу до 5 осей 25

2.2 Механічна частина та блок керування маніпулятором 29

2.3 Апаратна частина системи керування 36

2.4 Управління п'ятиосьовим роботом-маніпулятором 43

Висновки до другого розділу 51

3 Кінематичний аналіз. Методика вирішення прямої та оберненої задач кінематики 53

3.1 Кінематична модель маніпулятора 53

3.2 Пряма задача кінематики маніпулятора 57

3.3 Обернена задача кінематики маніпулятора 60

Висновки до третього розділу 67

Висновки 68

Перелік джерел посилання 69

Додатки

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Пінковський Д.С			РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ	Літ.	Арк. 5 / Аркушів 70
Перевір.		Пундик С.І.					
Реценз.						ХНУ, Гр. МБм-24-1	
Н. Контр.		Тимощук О.					
Затверд.		Неймак В.С.					

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості вимагає впровадження високоточних робототехнічних систем для автоматизації виробничих процесів, зокрема у легкій промисловості. Для таких галузей, як взуттєве виробництво, критично важливою є точність виконання 3D-операцій, наприклад, автоматизоване нанесення адгезивів на складні контури деталей. Ці завдання вимагають застосування 5 - або 6-осьових маніпуляторів з високою повторюваністю та адаптивністю.

Водночас, існує гостра потреба у кваліфікованих інженерних кадрах, здатних проєктувати, програмувати та обслуговувати це дороге обладнання. Саме тому навчальні та дослідницькі маніпулятори набувають важливого значення, слугуючи доступними тренажерами для освоєння принципів промислової робототехніки [1].

Використання відкритих апаратних платформ, таких як Arduino, дозволяє створити функціональні та бюджетні системи керування. Це дає можливість розробити навчальний стенд, який імітує високоточні технологічні процеси легкої промисловості. Для спрощення кінематичних обчислень та збереження основної функціональності, а саме здатності керувати інструментом під змінним кутом, використовується п'ятикоординатна структура маніпулятора.

Актуальність роботи визначається необхідністю підготовки фахівців, здатних вирішувати завдання автоматизації високоточних 3D-операцій у легкій промисловості, шляхом створення доступного програмно-апаратного комплексу для навчання.

Мета та Завдання.

Метою дослідження є розробка системи керування п’ятиосьовим роботизованим маніпулятором, яка поєднує ручне й програмне керування та забезпечує можливість моделювання і відпрацювання операцій високоточної автоматизації для легкої промисловості.

Для досягнення заданої мети необхідно розв’язати такі завдання:

- здійснити аналітичний огляд сучасних навчальних роботів-маніпуляторів;
- обґрунтувати вибір п'ятиосьової структури для точного позиціонування інструменту на 3D-контурах;
- розробити апаратну схему системи керування на базі Arduino;
- реалізувати алгоритми програмного забезпечення для різних режимів роботи;
- побудувати математичну модель кінематики маніпулятора;
- провести симуляційні дослідження працездатності алгоритмів.

Практичне значення роботи полягає у створенні універсального навчально-дослідницького комплексу, який може бути адаптований для автоматизації ключових технологічних процесів легкої промисловості.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НАВЧАЛЬНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Необхідність розвитку роботів-маніпуляторів у навчанні та дослідженнях

У сучасному технічному середовищі автоматизація стає одним із ключових засобів підвищення ефективності виробничих процесів. Особливо це стосується завдань, пов’язаних із точним і повторюваним переміщенням об’єктів та виконанням складних операцій, де роль людини зводиться до контролю й налаштування системи. Роботизовані маніпулятори виступають універсальними інструментами, здатними замінити багато ручних операцій, автоматизувати процеси передачі, обробки чи сортування, забезпечити високу точність і стабільність роботи. У промисловості їх ефективність доведена: маніпулятори застосовують у зварюванні, складанні, лакуванні, обробці матеріалів та пакуванні. Особливу актуальність багатоосьові роботи набувають у легкій промисловості, де потрібна висока точність і гнучкість для роботи з делікатними та різнорідними матеріалами, такими як тканина, шкіра, полімери.

Маніпуляційний робот - це технічний пристрій із маніпулятором, здатний виконувати різні механічні операції у межах свого робочого простору. До цього класу належать як спеціалізовані системи для роботи в умовах, де присутність людини неможлива або небезпечна (під водою, у космосі, за підвищеного рівня радіації), так і промислові роботи, призначені для автоматизації виробничих процесів. Промислові роботи виконують повторювані або складні операції, забезпечують високу точність, стабільність і продуктивність, а також зменшують участь людини у небезпечних або рутинних завданнях. Основними характеристиками таких роботів є точність позиціювання, кількість ступенів свободи та вантажопідйомність, що визначає їх ефективність у промислових умовах [2].

Більшість сучасних маніпуляторів належать до роботів з обертальною системою координат. Вони забезпечують максимальний обсяг робочої зони, у межах якої може здійснюватися рух ефектора. Конструкція таких систем дозволяє досягати необхідного положення та орієнтації робочого органу навіть при обмеженнях руху, які виникають через наявність перешкод у робочій зоні (рис. 1.1).

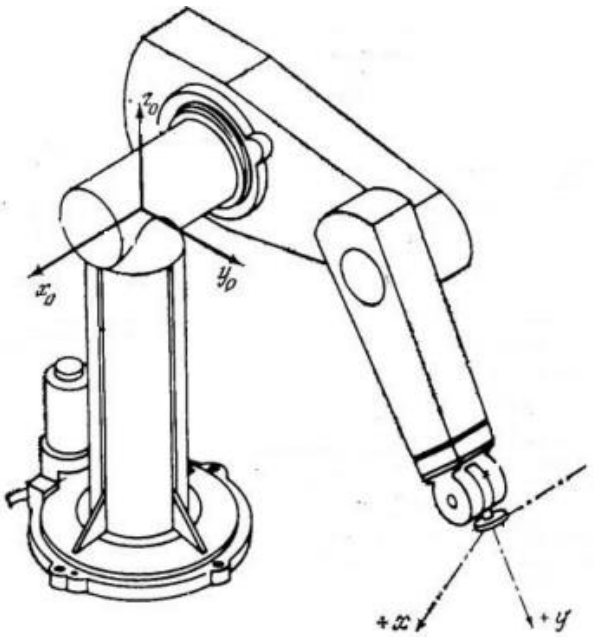


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема робота-маніпулятора

Водночас у навчальних лабораторіях і на курсах робототехніки важливо не просто використовувати готові промислові системи, а надати студентам можливість вивчати внутрішні механізми, алгоритми і обмеження робототехнічних систем. Саме тому навчальні маніпулятори стають критично важливим засобом: вони слугують полігоном для відпрацювання концептів кінематики, керування приводами, обробки сенсорних даних, інтеграції з контролерами та розробки користувацьких алгоритмів. Такі навчальні стенди є незамінними для підготовки інженерів, здатних програмувати складні кінематичні траєкторії, необхідні для забезпечення якості у високотехнологічних

процесах легкої промисловості.

У реальних лабораторних умовах часто немає можливості використовувати високоточні промислові маніпулятори через їх високу вартість, складність обслуговування та обмежений доступ до внутрішньої логіки. Навчальні системи заповнюють цю прогалину, надаючи відкриту архітектуру, можливість модифікації, підключення власних датчиків та програмування алгоритмів на різних рівнях. Це дозволяє студентам експериментально перевіряти вплив різних параметрів - швидкості приводів, часу реакції контролера, інерції ланок - на поведінку маніпулятора.

Сучасна інженерна освіта та наукові дослідження все більше орієнтуються на міждисциплінарні підходи, що включають механіку, електроніку, програмування та системний аналіз. Враховуючи це, роботи-маніпулятори дають можливість студентам не просто вивчити теорію, а й практично застосувати отримані знання. В умовах швидких технологічних змін та все більших вимог до точності та ефективності, здатність студента або дослідника безпосередньо працювати з маніпулятором, модифікувати його, тестувати різні режими та алгоритми стає необхідним етапом формування високої кваліфікації.

Роль навчальних маніпуляторів полягає в тому, що вони дозволяють вивчати не лише базові рухи чи переміщення, а й виконувати завдання, які включають використання оберненої кінематики, планування траєкторій з урахуванням обмежень приводів, компенсування похибок, роботу із зворотним зв’язком від сенсорів. Такі системи сприяють критичному осмисленню конструктивних параметрів: жорсткості ланок, інерції, точності приводів та впливу зовнішніх факторів, як вага ефектора або зміна навантаження.

Особливою актуальністю користуються інтерактивні маніпулятори на базі доступних платформ, таких як Arduino, оскільки вони дозволяють адаптувати апаратну й програмну архітектуру під різні освітні та експериментальні задачі. Можливість інтегрувати потенціометри, джойстики, датчики положення або сили, додати інтерфейси для дистанційного керування чи запису траєкторії

відкриває широке поле для творчої практичної роботи. Такий підхід сприяє розвитку важливих навичок сучасної інженерної практики - проектування, налаштування, налагодження, калібрування та випробування систем.

У наукових дослідженнях навчальні маніпулятори дозволяють формувати та тестувати нові методи керування, моделювати поведінку систем при заданих обмеженнях, відпрацьовувати алгоритми компенсації відхилень та керування складними траєкторіями з оптимізацією швидкості та точності. Це розширює знання не лише в класичних областях, таких як кінематика чи теорія руху, а й у міжсекторальних - роботизованій автоматизації, мехатроніці, системах зворотного зв'язку та алгоритмах оптимізації.

Таким чином, розвиток інтерактивних роботів-маніпуляторів у навчанні та дослідженнях є необхідністю, що зумовлена сучасними стандартами техніки та освіти. Вони виконують не лише функцію ілюстрації теорії, а створюють середовище для експериментальної перевірки, модифікації та вдосконалення систем, що формує компетентність, відповідну вимогам інженерної практики.

1.2 Сучасні промислові робототехнічні системи

Сучасні промислові робототехнічні системи являють собою високотехнологічні комплекси, призначені для автоматизації виробничих процесів, підвищення продуктивності та точності виконання технологічних операцій. Основним елементом таких систем є роботизований маніпулятор - багатоланкова механічна структура, що забезпечує переміщення інструмента або об'єкта у тривимірному просторі. Кожна ланка з'єднана шарнірно або поступально, а рух контролюється електричними, пневматичними або гідравлічними приводами.

Функціональні можливості маніпулятора визначаються кількістю його ступенів свободи. Чотирьохосьові конструкції здатні виконувати базові переміщення без повного керування орієнтацією, п'ятиосьові - частково

контролювати орієнтацію ефектора, а шестиосьові системи забезпечують повний контроль положення й орієнтації у просторі, що робить їх найпоширенішими в промисловості.

За конструктивною схемою та принципом побудови промислові роботи поділяються на кілька основних типів, що відрізняються геометрією кінематичних ланцюгів, характером з'єднання ланок і способом реалізації рухів[2,3]:

- шарнірні (антропоморфні) роботи. Це найпоширеніший тип промислових маніпуляторів, у якому ланки з'єднані послідовно шарнірними з'єднаннями, подібно до будови людської руки. Така структура забезпечує велику гнучкість, широкий робочий простір і можливість виконання складних траєкторій. Цей тип маніпуляторів є основним у сегменті високоточної обробки, наприклад, у взуттєвому виробництві, де вони застосовуються для зварювання, різання, сортування та фінішних операцій;

- циліндричні роботи. Кінематична структура таких роботів поєднує поступальні та обертальні рухи. Робочий простір має форму циліндра. Основна перевага полягає у простоті керування та високій точності при вертикальних і горизонтальних переміщеннях. Циліндричні роботи часто використовуються у процесах складання, переміщення вантажів та обробки поверхонь;

- сферичні (полярні) роботи. Ці роботи мають два обертальні та один поступальний ступінь свободи, завдяки чому утворюють сферичну робочу область. Вони дозволяють легко змінювати орієнтацію інструмента при роботі з великими деталями або у важкодоступних зонах. Сферичні роботи застосовуються у зварювальних та фарбувальних операціях, де важлива свобода орієнтації;

- картезіанські (лінійні) роботи. Кожна вісь у таких системах переміщується по прямій лінії, що відповідає координатним осям X, Y і Z. Це дозволяє виконувати точні лінійні рухи з простою кінематикою та високою точністю позиціювання. Картезіанські роботи широко використовуються у 3D-

друку, обробці матеріалів, лазерному різанні та автоматизованому транспортуванні деталей;

- SCARA-роботи (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Конструкція цього типу поєднує шарнірні та лінійні з'єднання, що дозволяє виконувати швидкі горизонтальні переміщення при обмеженій вертикальній гнучкості. Вони оптимальні для складання, монтажу електронних компонентів, пакування і сортування. Перевагою SCARA є висока швидкість, компактність і стабільність роботи.

- паралельні (Delta) роботи. Вони мають кілька однакових кінематичних ланцюгів, з'єднаних з однією рухомою платформою. Завдяки такій будові досягається висока швидкість і точність, але з обмеженим робочим простором. Delta-роботи переважно застосовуються у харчовій промисловості, пакуванні, медичних і фармацевтичних установках, де важлива легкість і динамічність рухів;

- колаборативні роботи (cobots). Це новий клас роботів, здатних безпечно працювати поруч із людиною без потреби у фізичних огородженнях. Вони оснащені датчиками сили, моменту та системами контролю зіткнень, що забезпечують зупинку при контакті з оператором. Колаборативні роботи активно впроваджуються у малих і середніх підприємствах, де потрібна гнучка автоматизація без складних систем безпеки;

- мобільні роботи з маніпуляторами. Такі системи поєднують автономну мобільну платформу (зазвичай на колесах або гусеницях) із маніпулятором, що забезпечує виконання операцій у різних точках простору. Вони використовуються для внутрішньої логістики, завантаження/розвантаження або обслуговування обладнання у важкодоступних місцях.

Усі перелічені типи роботів мають свої переваги й обмеження, що визначає сферу їх застосування. Наприклад, шарнірні роботи універсальні, але складні в управлінні; картезіанські - точні, але обмежені у гнучкості; колаборативні - безпечні, проте мають меншу швидкість і вантажопідйомність.

Зокрема, такі шарнірні моделі як ABB IRB 1600 чи Yaskawa Motoman GP8

демонструють, які характеристики можуть мати сучасні промислові маніпулятори (рис. 1.2). Вони відрізняються високою точністю (до 0,01 мм), швидкістю переміщення (до 2 м/с) і вантажопідйомністю (від 5 до 50 кг) [4].

а) б)

а - модель ABB IRB 1600; б - модель Yaskawa Motoman GP8

Рисунок 1.2 – Сучасні промислові роботи

Вони знаходять широке застосування у зварюванні, складанні деталей, пакуванні та інших виробничих процесах. Високі технічні характеристики дозволяють виконувати складні цикли з високою точністю та стабільністю, що робить їх незамінними у промисловому виробництві. Основними елементами маніпуляторів є серводвигуни або крокові двигуни, датчики положення, контролери та робочий ефектор. Для забезпечення точності руху використовуються алгоритми синхронізації приводів, корекції траєкторій та компенсації похибок механіки й електроніки.

Сучасний розвиток промислової робототехніки орієнтований на інтеграцію з цифровими платформами, інтелектуальними алгоритмами та системами штучного інтелекту. Це дозволяє створювати гнучкі виробничі лінії, здатні адаптуватися до змін попиту та особливостей продукції, і формує основу

концепцій “розумного виробництва” - Індустіря 4.0.

Ці промислові системи слугують еталоном для навчальних та демонстраційних роботів: висока точність позиціювання, стабільність траєкторій та вантажопідйомність стають орієнтиром для проектування навчальних комплексів. У таких проєктах характеристики промислових роботів адаптуються під навчальні потреби - зменшуються розміри та швидкість, а архітектура залишається відкритою для програмної та апаратної модифікації. Таким чином забезпечується можливість експериментальної роботи зі складними алгоритмами та принципами керування маніпуляторами, що логічно підводить до розгляду спеціалізованих навчальних та дослідницьких роботизованих комплексів.

1.3 Навчальні та дослідницькі роботи-маніпулятори

Навчальні та дослідницькі роботизовані комплекси призначені для використання у лабораторіях, університетах та тренінгових центрах, де ключовими вимогами є функціональність, гнучкість та можливість адаптації під різні сценарії експлуатації. Такі системи забезпечують не лише відпрацювання базових алгоритмів прямої та оберненої кінематики, але й дають змогу реалізовувати складніші завдання, зокрема планування траєкторій руху, випробування приводів, інтеграцію сенсорних модулів і контроль точності позиціонування.

Необхідність у таких функціональних можливостях обумовлена високими вимогами промисловості, зокрема в контексті автоматизації виробничих процесів легкої промисловості. Взуттєве виробництво, як один з основних напрямків цієї галузі, висуває специфічні виклики до роботизованих систем, пов'язані з високою точністю операцій, роботою з гнучкими та різнорідними матеріалами, а також необхідністю інтеграції в існуючі технологічні лінії.

Ключові технологічні процеси, які автоматизуються за допомогою промислових маніпуляторів:

- точне нанесення адгезивів. Ця операція є критично важливою для забезпечення надійності склеювання. Шести та п’ятиосьові маніпулятори, оснащені спеціалізованими дозуючими головками, програмуються на слідування складній тривимірній траєкторії по контуру підошви, гарантуючи мікронну точність дозування та рівномірність покриття.

- контрольована механічна обробка поверхні. З метою підвищення адгезії, роботизовані системи застосовуються для стандартизованого шліфування, зачищення та надання необхідної шорсткості поверхням. Маніпулятори, оснащені абразивними інструментами, забезпечують фіксоване та постійне зусилля притиску незалежно від криволінійної форми підошви.

- складання та високоточне позиціонування. На етапі монтажу роботи відповідають за точне взаємне розташування елементів підошви та верху, а також за операції пресування, що вимагають каліброваного силового впливу.

Для ефективного виконання цих завдань особлива увага приділяється кінцевим виконавчим органам. Механічні захвати повинні бути універсальними та адаптивними. Для роботи з жорсткими компонентами (підошви, каблуки) використовуються жорсткі захвати з високою силою стискання, тоді як для маніпулювання гнучкими матеріалами (текстильні заготовки, шкіра) необхідні м'які або адаптивні захвати. Вони вимагають інтеграції тактильних сенсорів та високоточного сервокерування для контролю сили стискання, щоб уникнути деформації або пошкодження делікатних об'єктів.

Саме тому, для підготовки висококваліфікованих інженерів-робототехніків та технологів, здатних працювати з реальним промисловим обладнанням, навчальні заклади використовують спеціалізовані комплекси, адаптовані безпосередньо від світових лідерів автоматизації. Ці системи забезпечують максимальну відповідність між теоретичними знаннями та практичними навичками, необхідними на виробництві. Основними прикладами таких індустріально-орієнтованих навчальних платформ є комплекси від компаній KUKA та FANUC.

KUKA ready2_educate. Комплекс, розроблений компанією KUKA, використовується для базової та поглибленої підготовки спеціалістів. Його основу складає промисловий 6-осьовий робот KUKA KR 4 AGILUS з високою точністю та радіусом дії 600 мм (рис. 1.3, а). У ньому використовується стандартний промисловий контролер KR C4 compact та мова програмування KRL. Комплекс позиціонується як засіб для навчання основам кінематики, планування траєкторій та інтеграції з промисловими контролерами (PLC).

FANUC Educational Cell. Ця повноцінна навчальна платформа від компанії FANUC орієнтована на освоєння промислової робототехніки. Платформа базується на 6-осьовому маніпуляторі FANUC ER-4iA (рис. 1.3, б). Однією з головних переваг є повна інтеграція системи технічного зору iRVision, яка дозволяє студентам вивчати алгоритми розпізнавання об'єктів, визначення їхнього положення та сортування в режимі реального часу.

а) б)

а - KUKA ready2_educate; б - FANUC Educational Cell

Рисунок 1.3 – Приклади навчальних роботизованих комплексів

Порівняно з комерційними промисловими маніпуляторами, навчальні комплекси характеризуються нижчою вантажопідйомністю та обмеженою швидкодією приводів. Водночас вони мають суттєві переваги у вигляді відкритої архітектури програмного забезпечення, можливості використання змінних

кінцевих ефекторів, простоти налаштування та підвищеної безпеки під час експлуатації. Одним із поширених підходів у навчальній робототехніці є використання систем з відкритою апаратною та програмною архітектурою, які дозволяють користувачам вільно модифікувати та розширювати функціонал. Прикладом є роботизовані маніпулятори типу AL5D або Tinkerkit Braccio.

Серед навчальних платформ помітне місце займає Tinkerkit Braccio, розроблений компанією Arduino як універсальний стенд для вивчення основ робототехніки (рис. 1.4). Конструкція має шість ступенів свободи, комплектується з сервоприводами стандарту MG995 і керується за допомогою контролера Arduino Uno. Відкрите апаратне та програмне середовище дозволяє користувачам створювати власні алгоритми керування, експериментувати з різними типами траєкторій, реалізовувати сценарії захвату і сортування об’єктів [5].

Рисунок 1.4 – Навчальна платформа Tinkerkit Braccio

Комплекс активно використовується у технічних університетах та інженерних школах як базовий інструмент для формування навичок програмування мікроконтролерів, розробки систем зворотного зв’язку та побудови інтерактивних робототехнічних пристроїв. Перевагою цієї платформи є сумісність із широким спектром додаткових модулів Arduino, що робить її

придатною для проведення лабораторних і демонстраційних робіт.

Також характерним представником подібних систем є uArm Swift Pro, який поєднує компактність із широкою функціональністю (рис. 1.5, а). Маніпулятор має чотири ступені свободи, вантажопідйомність близько 0,5 кг, робочий діапазон 50–320 мм та точність повторюваності до ±0,2 мм [6]. Управління реалізовано на базі контролера Arduino Mega 2560 із можливістю підключення через USB та Bluetooth. Система підтримує функцію “навчання силою руки”, що дозволяє формувати траєкторії руху шляхом їхнього ручного задання. Конструктивні параметри становлять масу близько 2,2 кг та габарити 150 × 140 × 281 мм.

Другим прикладом є OWI Robotic Arm Edge (OWI-535) - навчальний конструктор із п’ятьма ступенями рухливості (рис. 1.5, б). Він характеризується вантажопідйомністю до 100 г, вертикальним робочим простором 38 см та горизонтальним - 32 см [7]. Конструкція передбачає обертання основи на 270°, рух плеча до 300°, зап’ястя - до 120°, а також підйом/опускання базового сегмента на кут до 180°. Керування здійснюється за допомогою дротового пульта з п’ятьма перемикачами, що робить систему зручною для початкового вивчення принципів маніпуляційної робототехніки.

а) б)

а - модель uArm Swift Pro; б - модель OWI Robotic Arm Edge

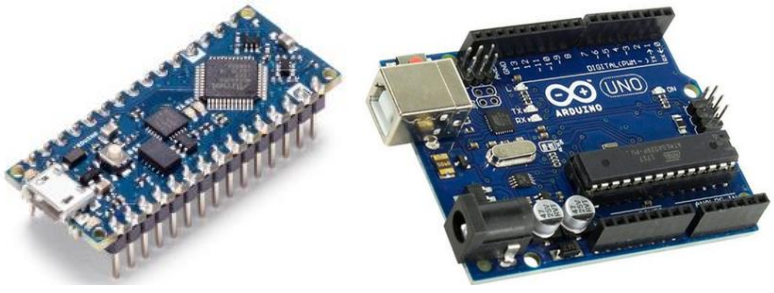
Рисунок 1.5 – Сучасні навчальні та дослідницькі маніпулятори

У більшості навчальних комплексів застосовуються сенсори, серед яких енкодери у приводах для зворотного зв’язку, кінцеві вимикачі, а також датчики сили чи дотику. Це дозволяє підвищити точність позиціонування, забезпечити контроль стабільності рухів та виявлення можливих колізій.

Разом із тим, подібні системи мають низку обмежень, серед яких відносно низька швидкість руху, недостатній крутний момент при навантаженні, складність калібрування після зміни конфігурації і потреба у стабільному джерелі живлення. Такі фактори зумовлюють необхідність компромісу між точністю, швидкістю та надійністю, що визначає межі практичного використання навчальних роботів у дослідницьких і навчальних завданнях.

1.4 Мікроконтролерні платформи та програмне забезпечення

Для керування навчальними та дослідницькими роботизованими маніпуляторами широко використовуються мікроконтролерні платформи, що забезпечують гнучкість апаратної архітектури та простоту програмування. Однією з найпопулярніших платформ у навчальних цілях є Arduino, яка дозволяє поєднувати простоту освоєння з можливістю реалізації складних алгоритмів керування приводами, обробки сигналів від сенсорів та інтеграції з зовнішніми модулями (рис. 1.6).



а) б)

а - модель Arduino Nano; б - модель Arduino Uno R3

Рисунок 1.6 – Контролери Arduino

Arduino підтримує різні моделі мікроконтролерів (Uno, Mega, Nano тощо), що відрізняються кількістю цифрових і аналогових входів/виходів, об’ємом оперативної пам’яті та швидкістю обробки команд. Використання цих плат дозволяє студентам і дослідникам експериментувати з алгоритмами прямої та оберненої кінематики, планування траєкторій, синхронізації приводів та організації зворотного зв’язку від датчиків позиції, сили чи дотику [8].

Програмне забезпечення для Arduino включає офіційне середовище Arduino IDE (рис. 1.7), а також численні бібліотеки для керування сервоприводами, кроковими двигунами, датчиками та модулями зв’язку (Bluetooth, Wi-Fi). Це дає можливість швидко реалізовувати прототипи систем керування, модифікувати їх для різних експериментальних сценаріїв та інтегрувати з іншими платформами чи симуляторами.

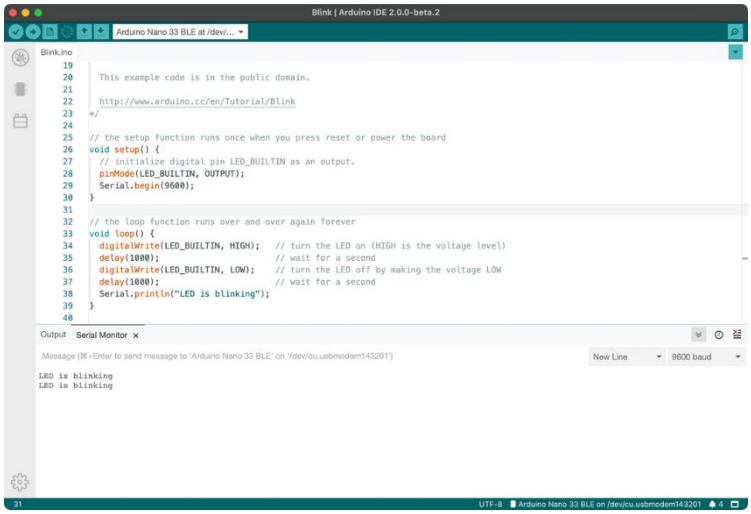


Рисунок 1.7 – Інтегроване середовище розробки Arduino IDE

Серед ключових можливостей Arduino IDE:

- редактор коду із підсвічуванням синтаксису та автозавершенням, що спрощує написання програм;

- компілятор та завантажувач для перевірки коду та його прямого завантаження на мікроконтролер;

- менеджер бібліотек, який дозволяє легко підключати сторонні або офіційні бібліотеки для керування апаратними модулями;
- серійний монітор, що забезпечує налагодження та відстеження даних з сенсорів у режимі реального часу;
- підтримка численних плат Arduino, включаючи Uno, Mega, Nano та інші, з можливістю адаптації під конкретні задачі.

Arduino також сумісна із популярними симуляторами (V-REP/CoppeliaSim, Gazebo) та платформою ROS (Robot Operating System), що дозволяє спершу відпрацьовувати алгоритми віртуально, а потім переносити їх на реальні системи.

Інтеграція додаткових модулів (сенсори сили, датчики дотику, захватні механізми) виконується через цифрові та аналогові входи/виходи, що дозволяє реалізувати адаптивне керування та взаємодію з об’єктами у режимі реального часу. Дистанційне управління здійснюється через серійні або бездротові протоколи, що забезпечує передачу команд і збір телеметрії у режимі реального часу.

Структурно система керування включає:

- мікроконтролер як ядро обробки сигналів;
- підключені серво- і крокові приводи;
- сенсорні модулі для позиціонування і контролю захвату;
- блок живлення;
- інтерфейсні модулі для взаємодії з оператором.

Програмні модулі складаються з ядра управління рухом, модуля обробки сигналів сенсорів, планування траєкторій, інтерфейсу користувача і логіки безпеки. Така архітектура забезпечує точне і гнучке керування маніпулятором у реальному часі, що є базою для побудови 5-осьових систем із ручним і програмованим управлінням.

Навчальні системи на Arduino мають обмеження по потужності та швидкості, що забезпечує безпечну роботу, проте вони повністю задовольняють більшість навчальних та дослідницьких завдань.

1.5 Проблеми та обмеження існуючих рішень

Сучасні роботизовані маніпулятори, як промислового, так і навчально-дослідницького призначення, мають низку обмежень, що впливають на їхню ефективність та універсальність. По-перше, промислові системи, хоча й демонструють високу точність та вантажопідйомність, відрізняються великою вартістю та складністю інтеграції у невеликі виробничі або лабораторні умови. Це обмежує їхнє використання для навчальних, демонстраційних або прототипних проєктів, де потрібна гнучкість і можливість швидкої модифікації конструкції та алгоритмів керування.

По-друге, багато існуючих рішень обмежені у кількості ступенів свободи або робочому об’ємі. Наприклад, базові навчальні маніпулятори часто мають лише 3–4 ступені свободи, що не дозволяє відпрацьовувати складні траєкторії або орієнтацію ефектора у просторі. У той же час промислові 6-осьові системи потребують значних ресурсів для програмування та налаштування, що ускладнює їх використання у навчальних лабораторіях [9].

Ще однією проблемою є недостатня інтеграція сучасних сенсорів та інтерфейсів управління. Багато комерційних моделей не передбачають легкого підключення датчиків сили, дотику або додаткових модулів дистанційного управління, що обмежує можливості адаптивного керування та розширення функціоналу системи.

Програмне забезпечення також часто має обмежену гнучкість: стандартні контролери промислових роботів підтримують лише власні пропрієтарні середовища, що ускладнює інтеграцію зовнішніх алгоритмів, модифікацію траєкторій та використання альтернативних платформ. Навчальні та лабораторні рішення на Arduino або подібних платформах, хоч і забезпечують відкритість, часто обмежені у швидкості обробки сигналів і точності позиціонування приводів, особливо при одночасному керуванні кількома сервоприводами або підключенні додаткових сенсорів.

Ще однією проблемою є відсутність стандартизації інтерфейсів та протоколів обміну даними. Різні виробники використовують власні протоколи керування, що ускладнює інтеграцію систем у загальну навчальну чи виробничу мережу. В результаті навчальні та дослідницькі лабораторні комплекси часто залишаються ізольованими від реальних виробничих сценаріїв, що обмежує їх практичну цінність.

Таким чином, існуючі рішення поєднують певну технічну досконаліть і вузьку спеціалізацію, але мають суттєві обмеження у гнучкості, масштабованості та інтеграції сучасних сенсорних і програмних модулів. Це створює потребу у розробці нових систем керування роботами-маніпуляторами, що поєднують простоту, адаптивність, точність і можливість швидкого перепрограмування.

Висновки до першого розділу

Таким чином, аналіз існуючих навчальних та дослідницьких роботів-маніпуляторів показує, що вони забезпечують необхідну базу для освоєння принципів робототехніки, відпрацювання алгоритмів кінематики, керування приводами та інтеграції сенсорних систем. Водночас їхня функціональність обмежена низкою технічних і програмних факторів: невисока вантажопідйомність, обмежена швидкодія приводів, точність рухів, потреба у калібруванні після модифікацій та обмежені обчислювальні ресурси контролерів.

Ці обмеження визначають межі практичного використання навчальних систем і підкреслюють необхідність компромісу між точністю, швидкістю, гнучкістю та безпекою. Саме вони стають відправною точкою для подальшого проєктування нових роботизованих комплексів, які поєднуватимуть навчальні та дослідницькі завдання з реалістичними вимогами до продуктивності, точності та інтеграції сучасних мікроконтролерних платформ і алгоритмів керування.

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ

2.1 Аналіз вихідної моделі та обґрунтування переходу до 5 осей

У даному розділі здійснюється технічне проєктування та розробка системи керування маніпулятором на базі конструкції, розробленої в бакалаврській роботі. Вихідною моделлю є шестиосьовий шарнірний маніпулятор, сконструйований для виготовлення методом адитивного виробництва (рис. 2.1); механічні деталі та загальна кінематична схема цієї моделі приймаються як базові елементи проєкту [10]. При розробці конструкції та проведенні необхідних розрахунків використовувався сучасний системний засіб автоматизованого проєктування SolidWorks 2023, що дало змогу сформувати тривимірну модель маніпулятора та його блоку керування, перевірити кінематичні залежності, узгодити конструктивні параметри та забезпечити технологічну придатність деталей до друку методом FDM.

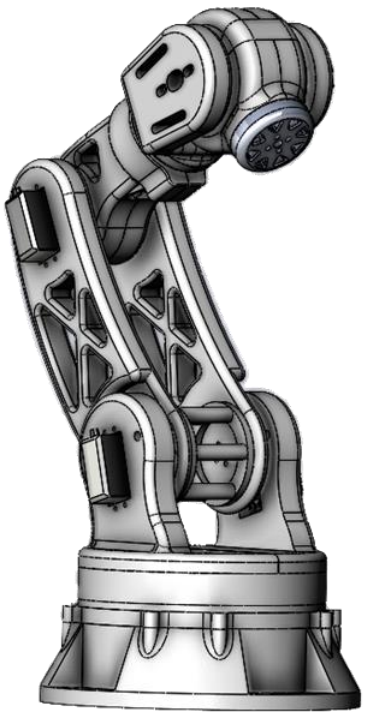


Рисунок 2.1 – Базова модель 6-ти осьового шарнірного маніпулятора

На етапі первинної адаптації передбачається скорочення числа ступенів свободи до п’яти шляхом виключення однієї ступені рухливості - раціональне спрощення, яке знижує складність апаратно-програмної реалізації, при цьому зберігаючи практично значимі функції позиціювання і часткової орієнтації ефектора. Такий підхід спрощує розрахунки оберненої кінематики, зменшує вимоги до кількості каналів зворотного зв’язку і дозволяє використати доступні комерційні елементи (мікроконтролер, драйвери, сервоприводи) для створення функціонального навчального стенду.

Вихідною моделлю для проєктування є шестиосьовий маніпулятор, розроблений у бакалаврській роботі: конструкція містить базове обертання, плече, рука, зап’ястя з можливістю обертання і механізм кисті. У робочому документі наведено загальний вигляд механізму, перелік застосованих приводів (MG996R, DS3218 / NEMA17 для деяких ланок) та розрахунки механічних елементів [10].

Для задачі кваліфікаційної роботи передбачено спрощення кінематики шляхом зменшення числа ступенів свободи до п’яти. Таке спрощення має чітке обґрунтування:

- навчально-демонстраційні та дослідницькі сценарії (позиціювання, захват, відтворення траєкторій) найчастіше не потребують повної незалежної орієнтації інструмента у всіх трьох осях. Проте, для імітації високоточних операцій, таких як, наприклад, нанесення адгезиву на криволінійні поверхні взуттєвих заготовок, критично важливою є можливість зміни кута нахилу інструменту, що гарантовано забезпечується 5-осьовою конфігурацією;
- зменшення числа приводів знижує апаратну та енергетичну складність, скорочує навантаження на блок живлення і зменшує обсяг електроніки;
- обчислювальна складність оберненої кінематики знижується, що полегшує реалізацію аналітичних рішень або робить чисельні методи стабільнішими;
- для навчального стенда з Arduino (обмежені ресурси введення/виведення,

обчислювальна потужність) компроміс 5 осей - висока функціональність при помірних ресурсних затратах.

Технічно найбільш обґрунтованим є видалення одного обертання зап’ястя. У типовому шарнірному ланцюгу це дає такі переваги: зберігається вільність позиціювання у трьох координатах і можливість часткової орієнтації інструменту за допомогою плечових ланок; при цьому обернена задача розбивається природньо на задачу позиціювання (перші три суглоби) і часткову орієнтацію (дві останні ланки), що робить її аналітично доступнішою для 5 осей.

Кінематична схема початкового шестиосьового варіанта робота представлена на рис. 2.2.

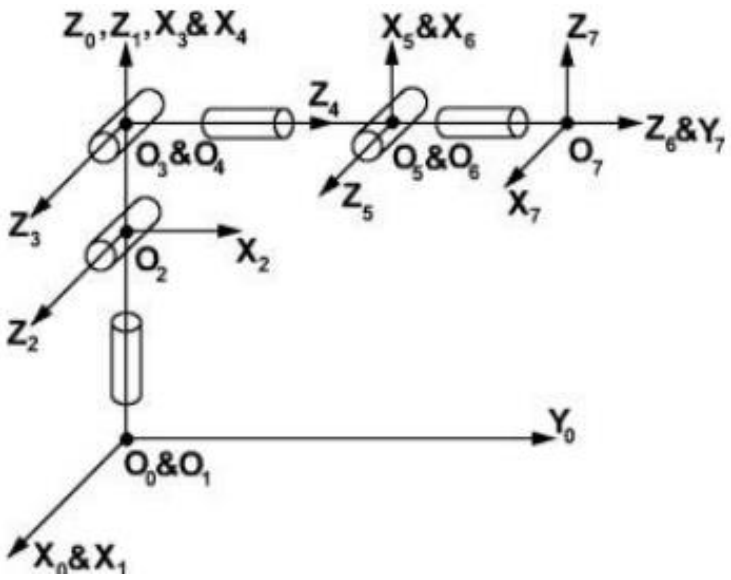


Рисунок 2.2 – Початкова кінематична схема маніпуляційного робота

У даній конфігурації маніпулятор містить шість послідовно з’єднаних обертових ланок, що забезпечують повну просторову рухливість ефектора - тобто можливість досягнення будь-якої позиції та орієнтації інструменту відносно бази.

У складі кінематичного ланцюга виділяються такі функціональні ланки: основа, плече, рука, зап’ястя та кінцевий ефектор (захват). Перша вісь (q_1) забезпечує обертання маніпулятора навколо вертикальної осі, формуючи

азимутальний кут орієнтації системи. Друга (q_2) та третя (q_3) осі утворюють площину руху плеча та ліктя, що визначає положення робочої точки в просторі. Четверта вісь (q_4) забезпечує нахил зап'ястя, п'ята (q_5) - його обертання навколо поздовжньої осі, а шоста (q_6) відповідає за орієнтацію або додаткову функцію кінцевого ефектора.

Таким чином, система з шістьма ступенями свободи дозволяє незалежно контролювати положення (три координати) та орієнтацію (три кути) робочого органа. Це забезпечує виконання широкого спектра просторових маніпуляцій, що є характерним для промислових роботів класу 6 DOF.

У процесі адаптації моделі для навчального застосування передбачено спрощення кінематичної структури шляхом усунення однієї обертальної осі зап'ястя. У результаті формується п'ятиосьова конфігурація (рис. 2.3), у якій залишаються базове обертання, підйом плеча, згинання ліктя, нахил зап'ястя та механічна орієнтація захвата.

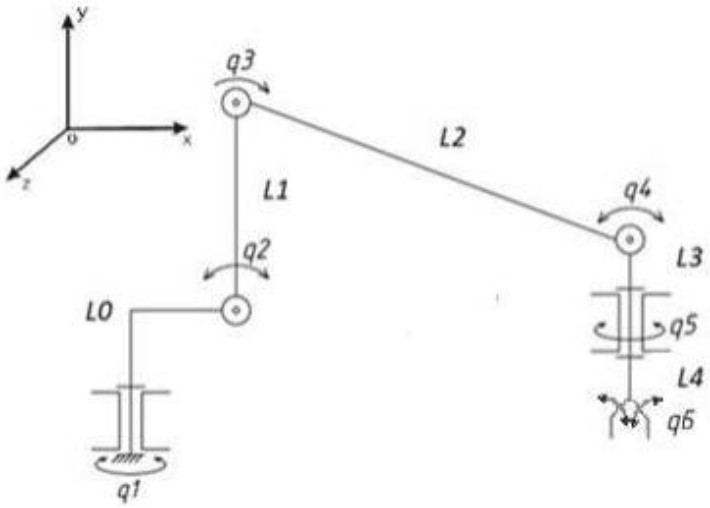


Рисунок 2.3 – Кінематична схема спрощеної п'ятиосьової моделі робота

Таке спрощення дозволяє зберегти основні кінематичні властивості - досягнення робочих точок у просторі та часткове керування орієнтацією при значному зниженні складності системи керування.

Порівняння обох кінематичних схем демонструє, що спрощений маніпулятор має той самий тип кінематичного ланцюга, але з меншою кількістю ступенів рухливості у зап’ястному вузлі. Водночас три перші осі забезпечують необхідну свободу для позиціювання ефектора, а дві наступні - можливість обмеженої орієнтації інструмента. Робоча область залишається подібною за формою до шестиосьового варіанта, з незначним зменшенням сфери досяжності у напрямку орієнтаційних кутів.

Таким чином, перехід від 6 до 5 ступенів свободи не змінює принцип кінематичної побудови системи, але спрощує її реалізацію з точки зору алгоритмів керування та розрахунків оберненої кінематики. Це рішення дозволяє ефективно застосовувати модель як основу для навчального стенду, у якому демонструються принципи побудови і керування багатоланковими роботизованими системами.

2.2 Механічна частина та блок керування маніпулятором

Після проведеного аналізу кінематичної структури базової моделі було прийнято рішення про спрощення конструкції маніпулятора шляхом зменшення кількості ступенів свободи з шести до п’яти. Найбільш доцільним виявилось вилучення одного обертального суглоба зап’ястя, який у попередній версії відповідав за обертання захвату навколо власної осі.

У результаті переробки вузол руки та зап’ястя був конструктивно спрощений: замість окремого приводу обертання реалізовано цільну механічну секцію, яка фіксовано з’єднує передпліччя з зап’ястям. Вигляд оновленого вузла руки та зап’ястя показаний на рисунку 2.4. Таке рішення підвищило загальну жорсткість конструкції та зменшило масу рухомих ланок. Крім того, відсутність додаткового приводу дозволила скоротити навантаження на блок живлення та спростити схему керування, що позитивно вплинуло на стабільність роботи всієї системи.

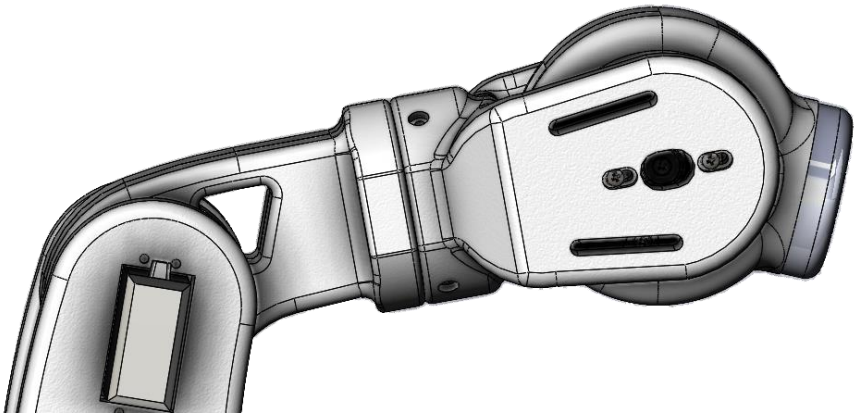


Рисунок 2.4 – Оновлена конструкція зап’ястного вузла після вилучення шостої осі

Перероблена конфігурація маніпулятора забезпечує виконання основних типів рухів - базового обертання, підйому плеча, згинання руки, нахилу зап’ястя та керування захватом. У новій версії механізму реалізовано більш компактну форму корпусу та оптимізоване розташування елементів кріплення. Фіксація нової секції замість серводвигуна, здійснюється за допомогою чотирьох гвинтів M3-6gx20, що забезпечує надійне та жорстке скріплення вузла. Це дозволило зменшити габарити і спростити складання, а також поліпшити ергономіку робочого простору при демонстраційній роботі.

В якості кінцевого виконавчого органу розроблено захват паралельного типу (рис. 2.5). Вибір цієї конфігурації забезпечує лінійне симетричне переміщення двох робочих губок, що гарантує надійне центрування маніпульованого об'єкта. Привід захвату реалізовано за допомогою окремого сервопривода типу MG90S, що інтегрований у зап’ястний сегмент.

Для забезпечення плавності переміщення рухомих елементів у конструкції використано три підшипники 688ZZ, а кріплення захвату до маніпулятора виконується чотирма гвинтами M3–6g×20. Конструкція оптимізована для забезпечення жорсткості при мінімальній масі, що критично для динамічних характеристик маніпулятора. Захват виконано з полімерного матеріалу із застосуванням адитивних технологій.

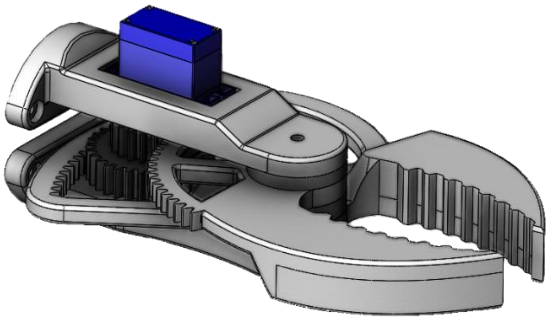


Рисунок 2.5 – Розроблений захватний пристрій робота-маніпулятора

З огляду на те, що елементи захватного пристрою виготовляються методом адитивного виробництва за технологією FDM, важливе значення мають параметри 3D-друку, які безпосередньо впливають на міцність, жорсткість і точність геометрії деталей [11].

Як основний конструкційний матеріал було обрано пластик ABS, що забезпечує необхідну механічну міцність та термостійкість елементів захвату [12]. Для забезпечення стабільних механічних характеристик захвату та відтворюваності конструкції було визначено оптимальні режими друку основних елементів захватного механізму. Узагальнені параметри FDM-друку деталей захвату наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри друку елементів захвату методом FDM

Конструкційні елементи	Щільність заповнення	Час друку (год.)	Кіл-сть пластику (г.)
Верхня кришка захвату	30%	2.10	16
Нижня кришка захвату	30%	1.55	15
Клешня ліва	50%	2.2	16
Клешня права	50%	2.6	22
Шайба захвату мала	30%	0.14	1.5
Шайба захвату велика	30%	0.17	2
Шестерня приводу	30%	1.21	9
Штифт захвату	30%	0.18	2

Для деталей клешень захвату передбачено підвищений ступінь заповнення, оскільки саме на ці елементи припадають найбільші механічні навантаження під час утримання та переміщення об’єктів.

Характеристики захвату робота-маніпулятора:

- маса захвату (без сервопривода та підшипників) - 85г;
- довжина захвату в закритому положенні - 145 мм;
- довжина захвату в відкритому положенні - 125 мм;
- ширина захвату в закритому положенні - 92 мм;
- максимальний крок відкриття клешні - 85 мм;
- довжина робочої зони клешні - 50 мм.

Захват орієнтований на виконання типових операцій легкої промисловості, зокрема роботи з малогабаритними текстильними заготовками, елементами фурнітури та іншими легкими компонентами. Конструкція забезпечує точне утримання та позиціонування виробів, що дозволяє моделювати базові технологічні процеси.

Механізм придатний для симуляції етапів взуттєвого виробництва, пов'язаних із твердими деталями, такими як підошва, задники, підноски та геленки. Регулювання сили стискання дає змогу точно відтворити операції притискання та фіксації підошви, нанесення адгезиву, а також надійного утримання жорстких заготовок під час формування та монтажу.

Крім того, захоплювач здатний переміщувати напівфабрикати й готові вироби, що дозволяє моделювати транспортно-логістичні операції. Завдяки цьому він слугує універсальним інструментом для відтворення широкого спектра процесів легкої промисловості загалом, та взуттєвої зокрема.

Оновлений маніпулятор представлений на рисунку 2.6. У цій конфігурації збережено всі ключові пропорції попередньої моделі, однак змінено геометрію зап’ястного сегмента, розроблено новий захватний пристрій та частково перероблено корпус передпліччя. Конструкція залишається повністю придатною для 3D-друку, а всі нові деталі виконані у форматі, сумісному з початковими

вузлами, що забезпечує взаємозамінність компонентів і спрощує подальше технічне обслуговування.

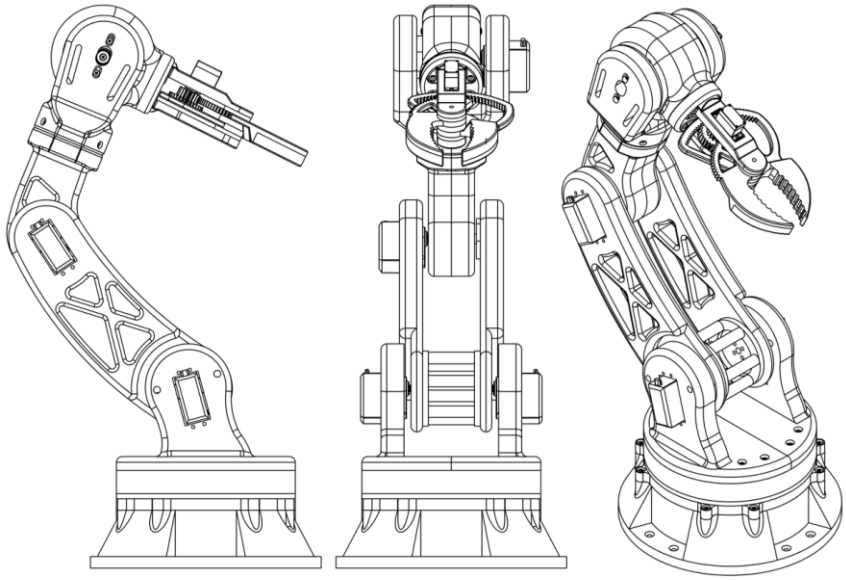


Рисунок 2.6 – Загальний вигляд оновленої моделі п’ятиосьового робота-маніпулятора

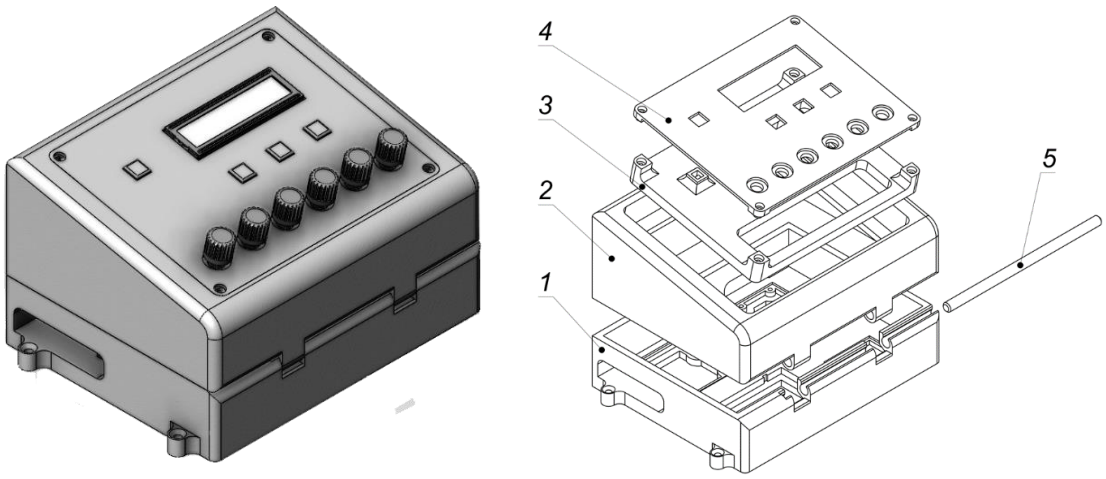
Крім механічної частини, передбачено інтеграцію нового блоку керування, який виконує функції живлення, обробки сигналів і управління приводами. Корпус блоку керування спроектовано як окремий модуль, що розташовується поруч із базою маніпулятора.

Конструкція та загальний вигляд блоку керування.

Блок керування спроєктовано як компактний, функціональний модуль, який забезпечує зручність експлуатації та швидкий доступ до внутрішніх компонентів для налагодження та модифікації. Його загальний вигляд у робочому положенні представлений на рисунку 2.7, (а).

Корпус виконаний з міцного ABS-пластику для захисту електроніки, має ергономічний прямокутний профіль із нахиленою верхньою площиною, оптимізованою для зручності оператора. Ключовою конструктивною особливістю є шарнірний механізм відкриття. На рисунку 2.7, (б) показано блок

у розкладеному вигляді з проставленими позиціями основних конструкційних елементів.



а) б)

а – Загальний вигляд у робочому положенні; б – Конструктивні елементи блоку керування.

Рисунок 2.7 – Конструкція блоку керування

Базова основа блоку (1) виконує функцію несучого каркаса та призначена для стаціонарного монтажу модуля чотирма гвинтами М4–6g×20 до робочої поверхні, гарантуючи механічну стійкість усієї системи. На цій основі розміщуються ключові електронні компоненти, зокрема плата керування, живлення та макетна плата. Використання макетної плати є принциповим проєктним рішенням, оскільки дозволяє реалізувати безпаяльні комутаційні підключення, що критично для оперативної зміни конфігурації управління в рамках дослідницького стенда.

До базової основи гвинтом та шарнірним штифтом (5) фіксується верхня відкидна кришка (2). Вона слугує проміжним елементом, що закриває та захищає внутрішні плати, а також формує необхідний кут нахилу для подальшого розміщення інтерфейсних елементів.

Нахилена площина верхньої кришки є основою для встановлення двох

незалежних модулів. Першим є лицьова панель (4), яка є основним зовнішнім інтерфейсом оператора, і закріплюється чотирма гвинтами М3–6g×20. Безпосередньо на її поверхню здійснюється кріплення потенціометрів, що використовуються як аналогові задавачі для ручного керування осями маніпулятора.

Другим модулем, що також приєднується гвинтами до верхньої кришки, є внутрішня кріпильна рама для елементів індикації та керування (3). Ця рама, розташована безпосередньо під лицьовою панеллю, має спеціалізовані посадочні місця та фіксатори для встановлення LCD-екрану та тактильних кнопок керування режимами. Вона кріпиться тими ж гвинтами, що і лицьова панель, що спрощує демонтаж та технічне обслуговування.

Таким чином, інтегрований блок керування є не лише центром обробки сигналів та живлення, а й модульною, гнучкою платформою з швидким доступом, оптимізованою для експериментальної роботи та навчання.

Загальний вигляд отриманого навчально-дослідницького стенду, що об'єднує робота-маніпулятора та розроблений блок керування, представлено на рисунку 2.8.

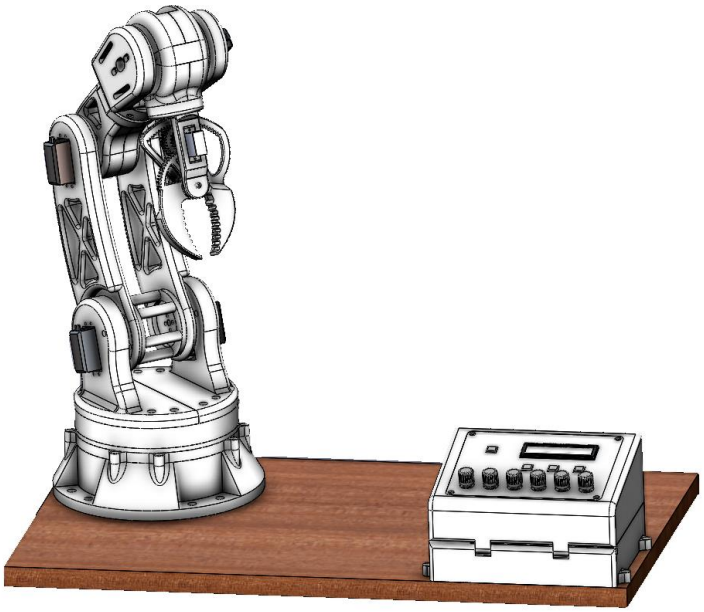


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд навчально-дослідницького стенду

Для реалізації загальної конструкції стенду використано низку стандартизованих елементів кріплення та рухомих вузлів, включаючи:

Гвинти:

- M4-6gx20 (27 шт.);
- M3-6gx10 (84 шт.);
- M3-6gx20 (13 шт.).

Підшипники:

- 688ZZ (5 шт.);
- 6002 2R (1 шт.).

Гужони:

- M4-6gx4 (1 шт.);
- M3-6gx2 (1 шт.).

2.3 Апаратна частина системи керування

Апаратна частина системи керування п’ятиосьовим маніпулятором побудована на базі мікроконтролерної платформи Arduino Nano (рис. 2.9), яка виконує функції формування сигналів керування приводами, обробки даних з елементів управління та реалізації заданих алгоритмів руху.

Рисунок 2.9 – Плата керування Arduino Nano

Вибір плати Arduino Nano для управління роботом обґрунтований кількома факторами, зокрема компактними розмірами, зручністю програмування, доступністю компонентів та можливістю інтеграції з різноманітними сенсорами та актуаторами. Arduino Nano є однією з популярних платформ у робототехніці завдяки своїй простоті, гнучкості та широкій підтримці відкритих бібліотек, що значно спрощує розробку та налаштування складних роботизованих систем.

Характеристики мікроконтролерної платформи Arduino Nano вказані у таблиці 2.2 [13].

Таблиця 2.2 – Характеристики Arduino Nano

Мікроконтролер	Atmel ATmega168 або ATmega328
Робоча напруга (логічний рівень)	5В
Напруга живлення (рекомендована)	7-12В
Напруга живлення (гранична)	6-20В
Цифрові входи / виходи	14 (з яких 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи)
Аналогові входи	8
Максимальний струм одного виводу	40мА
Flash-пам'ять	16 КБ (ATmega168) або 32 КБ (ATmega328) з яких 2 КБ використовуються завантажувачем
SRAM	1 КБ (ATmega168) або 2 КБ (ATmega328)
EEPROM	512 байт (ATmega168) або 1 КБ (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц
Розміри плати	1.85 см x 4.3 см

Для проекту навчального робота, який базується на платі Arduino Nano, виникає необхідність використання розширювальної плати для забезпечення достатньої кількості виводів і підключення додаткових компонентів. Arduino Nano має обмежену кількість цифрових і аналогових входів/виходів, що недостатньо для підключення всіх необхідних елементів, таких як серводвигуни для кожної ланки, сенсори для визначення орієнтації робота та інші датчики.

Використання розширювальної плати дозволяє збільшити кількість доступних портів і забезпечити підключення додаткових пристроїв, необхідних для функціонування робота. Наприклад, додаткові виводи для керування серводвигунами, що дозволяє точно синхронізувати рухи елементів робота. Розширювальні плати також забезпечують підтримку спеціалізованих інтерфейсів, таких як I2C чи SPI, для зручного підключення сенсорів і інших модулів (рис. 2.10) [14].

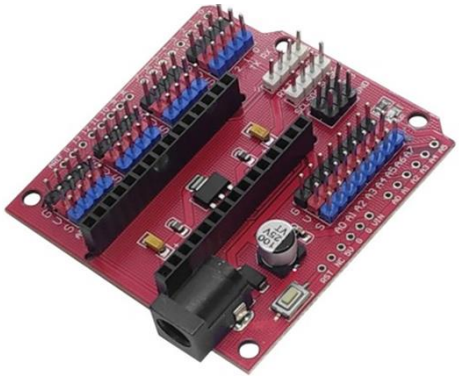


Рисунок 2.10 – Плата розширення Arduino Nano

Таким чином, розширювальна плата є необхідною для забезпечення ефективної роботи робота, оскільки дозволяє реалізувати більш складні функції управління та адаптації до умов навколишнього середовища.

Живлення системи здійснюється від комп’ютерного блоку живлення типу ATX, який забезпечує подачу стабільної напруги 12В і достатній запас потужності для одночасної роботи всіх сервоприводів.

Для живлення самої плати Arduino та допоміжних модулів використовується DC–DC перетворювач, який знижує напругу до 5 В. Це дозволяє відокремити живлення логічної частини від силової, що позитивно впливає на стабільність роботи і захищає мікроконтролер від можливих перенапруг, які можуть виникати при різких змінах струму під час руху приводів.

Система керування роботом-маніпулятором передбачає чотири основні режими роботи, які реалізуються через один контролер.

Перший режим - ручне керування за допомогою потенціометрів, у якому оператор може окремо змінювати положення кожної осі, плавно регулюючи кут повороту. У цьому випадку аналогові сигнали з потенціометрів зчитуються контролером, перетворюються в широтно-імпульсні сигнали (PWM) та подаються на відповідні сервоприводи. Такий підхід дозволяє здійснювати точне ручне керування рухами маніпулятора в реальному часі, що особливо зручно для навчальних і демонстраційних експериментів.

Другий режим - дистанційне ручне керування через бездротовий зв’язок Bluetooth. У цьому варіанті управління робот отримує команди з мобільного пристрою, зокрема смартфона, через Bluetooth-модуль HC-06, який підключається до послідовного інтерфейсу UART плати Arduino (рис. 2.11). Передані з телефону сигнали обробляються контролером аналогічно до сигналів від потенціометрів, що забезпечує можливість керувати маніпулятором на відстані [15]. Такий підхід розширює функціональність системи, надаючи користувачу мобільність і зручність під час роботи.

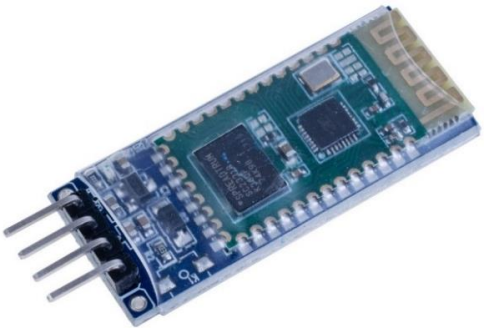


Рисунок 2.11 – Bluetooth-модуль HC-06, використаний у системі керування маніпулятором

Третій режим - запис послідовності рухів, який дозволяє оператору фіксувати поточні позиції маніпулятора як кадри у вибраний слот пам’яті. Система також включає механізм перевірки наявності даних у слоті та пропонує користувачу вибір між перезаписом або скасуванням операції.

Четвертий режим - автоматичне відтворення, у якому робот виконує заздалегідь запрограмовані послідовності рухів, що зберігаються у пам’яті контролера. Користувач здійснює вибір необхідного алгоритму з меню, яке відображається на LCD-дисплеї.

Загальна логіка вибору та роботи режимів керування представлена у вигляді блок-схеми на рисунку 2.12, де показано розподіл між ручним керуванням потенціометрами, дистанційним керуванням через Bluetooth та автоматичним режимом із можливістю запису та відтворення алгоритмів руху.

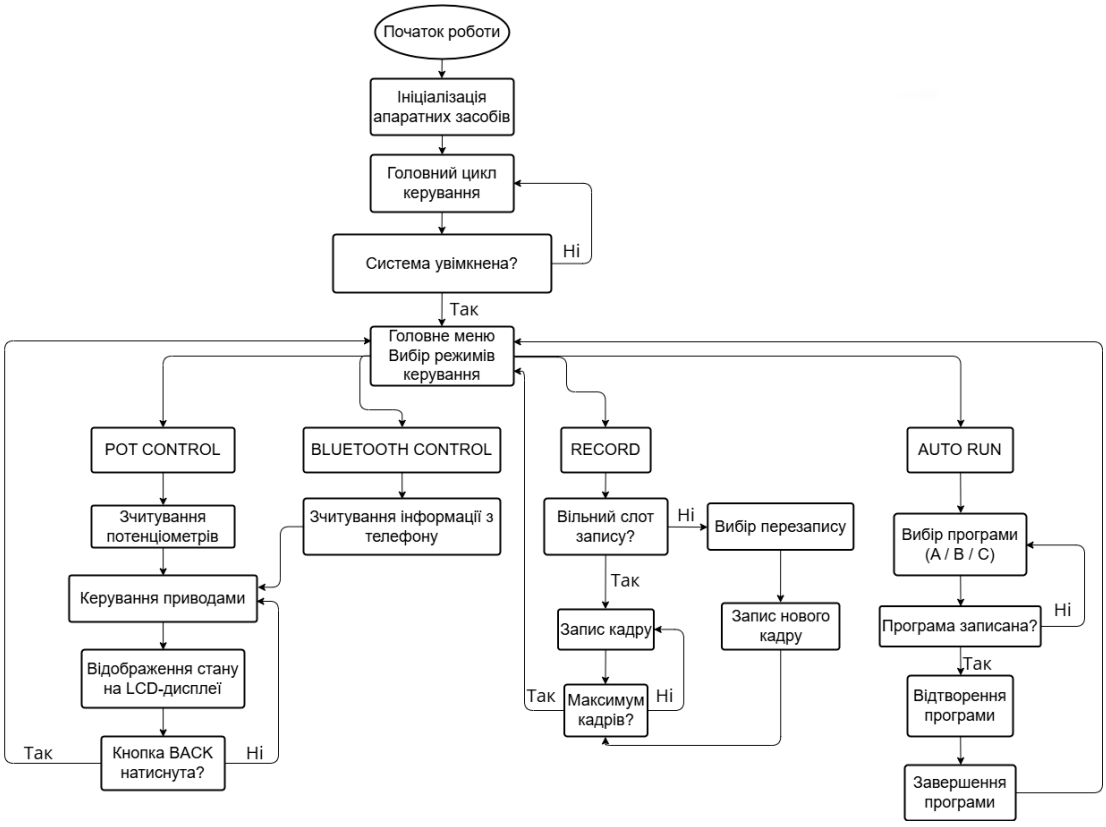


Рисунок 2.12 – Блок-схема режимів роботи системи керування маніпулятором

Для реалізації відображення інформації використовується LCD-дисплей з модулем I²C, який забезпечує просте підключення до мікроконтролера та займає мінімум контактів, лише лінії SDA і SCL) [16]. Зовнішній вигляд LCD-дисплея з підключеним I²C-модулем наведено на рисунку 2.13.

Рисунок 2.13 – LCD-дисплей з підключеним інтерфейсним модулем I²C для вибору режиму та відображення параметрів роботи робота

У ручному режимі сигнали з потенціометрів зчитуються безперервно й перетворюються у відповідні кути повороту сервоприводів. Додатково в цьому режимі передбачено функцію індикації фактичного кута вибраного сервоприводу: на LCD-дисплей виводиться актуальне значення кута повороту того двигуна, який наразі обрано користувачем. Перемикання між сервоприводами здійснюється кнопкою що забезпечує послідовний перегляд усіх осей маніпулятора; після вибору потрібного сервоприводу система відображає його поточне значення кута в реальному часі. Такий механізм підвищує точність налаштування та інформативність роботи оператора. У режимі Bluetooth ті ж команди передаються бездротовим способом із мобільного пристрою. В автоматичному режимі контролер самостійно формує послідовність рухів відповідно до заданого алгоритму. Такий підхід робить систему універсальною і придатною як для практичних занять, так і для дослідницьких цілей.

Для підвищення надійності та безпеки роботи в контролері реалізовано обмеження кутів повороту кожної осі, що запобігає механічним перевантаженням або зіткненням ланок. Крім того, здійснюється моніторинг стабільності живлення: у разі зниження напруги контролер обмежує швидкість руху приводів, запобігаючи зависанням або некоректній роботі.

Конструкція апаратної частини є модульною - усі компоненти, такі як потенціометри, Bluetooth-модуль, LCD-дисплей з I²C-інтерфейсом і сервоприводи, з’єднані через стандартні роз’єми. Така структура спрощує обслуговування, забезпечує можливість модернізації та розширення функціоналу системи за рахунок додавання нових датчиків або інтерфейсів зв’язку.

У відповідності до початкового задуму, закладеного під час виконання бакалаврської роботи, у конструкції роботизованого маніпулятора використовується кроковий двигун типу NEMA 17 як основний привід базового обертання (рис. 2.14). Застосування цього типу двигуна обумовлене його технічною універсальністю, високою точністю позиціонування та стійкістю до навантажень. Кроковий двигун NEMA 17 забезпечує точність кроку 1,8° (200 кроків на один оберт), що дозволяє досягати плавного та контрольованого руху без необхідності використання енкодерів. Крім того, двигун має достатній запас крутного моменту (до 4 кг·см) для стабільного обертання основи маніпулятора, включно з вагою верхніх ланок та ефектора [17].

Рисунок 2.14 – Двигун типу NEMA 17

Використання стандартного драйвера A4988 спрощує інтеграцію приводу з мікроконтролером Arduino та дозволяє реалізувати мікрокроковий режим, що покращує плавність рухів і знижує вібрації.

У модифікованій конструкції маніпулятора, розробленій у межах цього проєкту, як основні приводи використано три сервоприводи DS3218 та два сервоприводи MG996R. Потужніші DS3218 встановлені на найбільш навантажених ланках, оскільки забезпечують високий крутний момент (до 20 кг·см), мають металевий редуктор і підвищену жорсткість корпусу, що важливо при взаємодії з 3D-друкованими деталями.

Сервоприводи MG996R застосовані в менш навантажених частинах конструкції, де їхнього крутного моменту й точності цілком достатньо. Вони зберігають простоту керування PWM-сигналами та забезпечують стабільне позиціонування. Разом ці п'ять приводів формують п’ять ступенів свободи маніпулятора, забезпечуючи повноцінне керування рухом і виконання базових маніпуляційних операцій.

Для приводу кінцевого ефектора використано мініатюрний сервопривід MG90S, який відрізняється компактними розмірами та зменшеною масою, що дозволяє знизити інерційні навантаження на зап’ястний вузол. Незважаючи на невеликі розміри, MG90S має металевий редуктор і забезпечує достатній момент сили для відкриття та закриття механізму захвату з високою швидкістю й точністю. Це робить його оптимальним рішенням для виконання базових операцій захоплення, утримання та переміщення невеликих об’єктів.

2.4 Управління п’ятиосьовим роботом-маніпулятором

Програмна частина є невід’ємним елементом системи керування роботом-маніпулятором і визначає ефективність взаємодії між користувачем та механічними приводами. Основне завдання програмного забезпечення, реалізованого на мікроконтролері Arduino Nano, полягає в забезпеченні точного та плавного позиціювання приводів, синхронну роботу осей, а також інтерактивну взаємодію через засоби відображення та керування. В умовах обмеженої SRAM (2 КБ) архітектура коду оптимізована для розміщення масивів

запису рухів [18].

У даному проєкті реалізовано управління п'ятиосьовим маніпулятором з додатковим сервоприводом захвату. Перший і другий серводвигуни приводу плеча рухаються синхронно у протилежних напрямках, забезпечуючи механічний баланс та функцію згинання, а решта сервоприводів керуються індивідуально. Крім того, система включає кроковий двигун, який відповідає за обертання бази маніпулятора. Програмне забезпечення забезпечує управління як у реальному часі через аналогові потенціометри - що реалізує принцип прямого кутового керування для спрощення навчального процесу, так і функцію "навчання" та автоматичного відтворення.

На рисунку 2.15 показано схему підключення 6-ти сервоприводів де відображається пряме з'єднання сигнальних проводів сервоприводів до ШІМ-пінів, а вихідні контакти потенціометрів - до аналогових пінів.

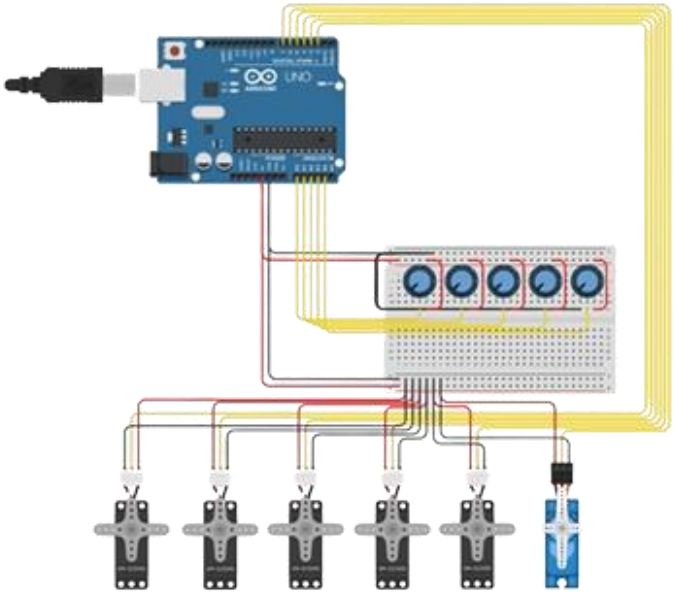


Рисунок 2.15 – Схема підключення серводів та потенціометрів управління до плати Arduino

Важливим елементом реалізації точного управління є коректне програмне керування та апаратне підключення приводами. Сервоприводи підключені до

ШІМ-пінів (D3, D5, D6, D9, D12, D13), а кроковий двигун керується через бібліотеку AccelStepper. Для запису та відтворення рухів використовується оптимізована структура Frame, що зберігає позиції 5 осей та захвату. Обмеження пам'яті SRAM вимагало встановлення максимального обсягу запису на 3 алгоритми по 15 кадрів кожен.

У режимі керування в реальному часі, шість аналогових потенціометрів, підключених до аналогових входів (A0, A1, A2, A3, A6, A7), використовуються як датчики положення. Програмне забезпечення зчитує аналогове значення, масштабує його на діапазон 0-180° для сервоприводів та на діапазон кроків для крокового двигуна.

Взаємодія користувача з системою здійснюється через LCD-дисплей (16x2) та чотири тактові кнопки, підключені до пінів D2, D3, D4, D5. Головне Меню (Main Menu), яке відображає основні опції: "1. Pot Control", "2. Bluetooth", "3. Auto Run", "4. Record" показано на рисунку 16. На екрані курсор (>) вказує на вибраний пункт, навігація між якими здійснюється кнопкою SCROLL (D3).

Рисунок 2.16 – Загальний вигляд LCD-дисплея з головним меню

Програмне антидребезгове оброблення кнопок реалізовано з таймаутом 300 мс, що забезпечує надійне визначення команд користувача та запобігає мимовільному прокручуванню меню. У підрежимі керування потенціометрами на дисплей додатково виводиться поточний кут або позиція вибраної осі/захвату.

Рисунок 2.17, (а) демонструє Меню Керування через Потенціометри (Pot Control). На першому рядку вказано режим, а на другому - назва поточної осі та її фактична позиція. Перемикання між осями для відображення здійснюється кнопкою SCROLL.

Рисунок 2.17, (б) демонструє Меню Дистанційного Керування через Bluetooth. На екрані відображається статус з'єднання та активні команди, що надходять бездротовим каналом.

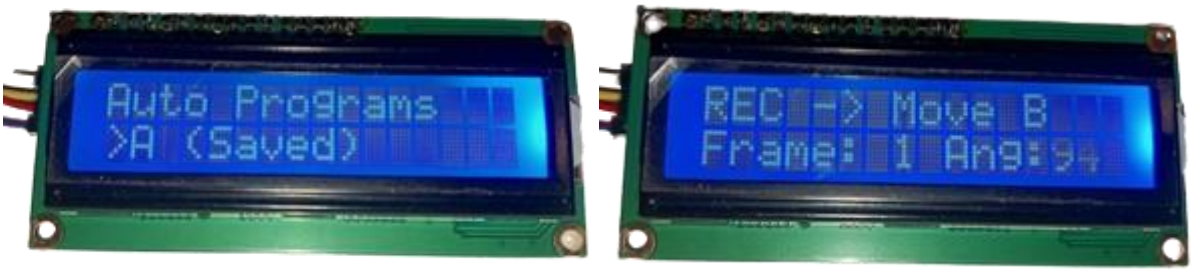
а) б)

а – меню керування через потенціометри; б – меню дистанційного керування через Bluetooth

Рисунок 2.17 – Меню режимів прямого та дистанційного керування

Меню з режимом вибору готових алгоритмів руху (Auto Menu) демонструється на рисунку 2.18, (а). На екрані відображаються доступні слоти, що дозволяє оператору обрати попередньо записаний алгоритм для відтворення. Під час роботи на екрані додатково виводиться індикація активного алгоритму та статус його виконання.

Рисунок 2.18, (б) - Режим Запису (Record Mode): Активується після вибору "4. Record" у головному меню. Екран відображає активний слот для запису та індикацію поточного кадру, що записується, і ліміту: "Frame: 0 / 15". При натисканні кнопки SELECT (D4) поточний кадр зберігається, а лічильник збільшується. Натискання BACK (D5) завершує запис і зберігає алгоритм.



а) б)

а – Меню вибору записаного алгоритму; б – Режим запису алгоритму

Рисунок 2.18 – Меню режимів типу “запис-відтворення”

У режимі автоматичного відтворення програма забезпечує плавний рух сервоприводів між записаними кадрами, а між кожним кадром виконується фіксована затримка 1000 мс для контролю траєкторії.

Програмна реалізація починається з визначення апаратних конфігурацій, що робиться через константи #define та створення керуючих об'єктів. На початку коду підключаються бібліотеки, а також створюються об'єкти для роботи з LCD-дисплеєм, кроковим двигуном та сервоприводами. Фрагмент коду, що демонструє підключення бібліотек та створення об’єктів пристроїв, наведено на рисунку 2.19.

```
#include <AccelStepper.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Servo.h>

// Створення об'єктів пристроїв
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
// Об'єкт для крокового двигуна: (режим драйвера, пін STEP, пін DIR)
AccelStepper stepper(AccelStepper::DRIVER, PIN_STEPPER_STEP, PIN_STEPPER_DIR);
// Об'єкти для сервоприводів: 5 осей маніпулятора та 1 захват (Gripper)
Servo servo1, servo2, servo3, servo4, servo5, servoGripper;
```

Рисунок 2.19 – Фрагмент коду ініціалізації об’єктів AccelStepper, Servo та LiquidCrystal_I2C

Для керування логікою системи оголошується перелічувальний тип (enum MainMode), який визначає всі можливі стани роботи. Головна змінна currentMode завжди містить поточний активний режим.

В умовах обмеженої пам'яті SRAM (2 КБ) мікроконтролера Arduino Nano, для реалізації функції запису та відтворення траєкторій руху було застосовано оптимізовану структуру Frame. Ця структура має фіксований розмір 16 байт і використовується для зберігання позицій усіх 6 приводів у певний момент часу. Оптимізація розміру структури дозволила розмістити в пам'яті двовимірний масив algorithms[3][15], що містить 3 незалежні алгоритми по 15 кадрів кожен.

Структура Frame та оголошення масиву для зберігання алгоритмів наведено на рисунку 2.20.

```
typedef struct {
  long stepperPos;
  int servoAxesAngles[4]; // Кути (цілі) для осей 3, 4, 5 та Серво 1
  int servo2Angle;
  int gripperAngle;
} Frame;

// Масив для зберігання 3 алгоритмів по 15 кадрів
Frame algorithms[3][15];
// Фактична кількість кадрів у кожному слоті
int frameCounts[3] = {0, 0, 0};
```

Рисунок 2.20 – Структура даних Frame для зберігання одного кадру руху та оголошення масиву алгоритмів

Головний цикл програми (loop()) забезпечує безперервну роботу системи, покладаючись на currentMode для виклику відповідних функцій. Вся логіка переходів між станами реалізована у функції handleButtons(). Ця функція є єдиною точкою входу для апаратних команд і містить захисний механізм.

Для забезпечення надійності вводу реалізовано програмний антидребезк з таймаутом 300 мс через відстеження часу (lastButtonPressTime), як показано на рисунку 2.21.

```
void handleButtons() {
  // Перевірка часу антидребезку (пропускаємо натискання, якщо минуло менше 300 мс)
  if (millis() - lastButtonPressTime < 300) return;

  // Зчитування стану кнопки SELECT (підключеної як INPUT_PULLUP)
  bool selectPressed = (digitalRead(PIN_BTN_SELECT) == LOW);

  if (selectPressed) {
    // Оновлення часу останнього натискання
    lastButtonPressTime = millis();

    // Логіка переходу між режимами
    if (currentMode == MAIN_MENU) {
      // Перехід у вибраний режим
      if (menuIndex == 0) currentMode = POT_CONTROL; // Перехід до керування потенціометрами
      // ... інші переходи
    } else if (currentMode == RECORD_MODE) {
      // Дія: Збереження поточного кадру
      saveFrame(currentSlot); // Зберігає поточні позиції осей у вибраний слот
    }
  }

  // ... обробка інших кнопок (SCROLL, BACK, ON/OFF)
}
```

Рисунок 2.21 – Фрагмент коду реалізації антидребезку кнопок та обробки натискання SELECT

Функція handlePotControl() активна у режимах POT_CONTROL та RECORD_MODE. Вона безперервно зчитує аналогові входи та оновлює позиції приводів. Особлива увага приділяється синхронізації Вісі 2, де Серво 1 отримує кут θ, а Серво 2 - кут 180° - θ (рис. 2.22).

```
void handlePotControl() {
  // Зчитування та перетворення аналогового значення потенціометра (для Осі 2)
  int potValueA1 = analogRead(PIN_POT_AXIS_2);
  int angle = map(potValueA1, 0, 1023, 0, 180);

  // 1. Керування реверсивною парою (Вісь 2)
  servo1.write(angle); // Керування першим сервоприводом
  servo2.write(180 - angle); // Керування другим сервоприводом у реверсному режимі

  // 2. Керування кроковим двигуном (Вісь 1)
  long targetSteps = map(analogRead(PIN_POT_AXIS_1), 0, 1023, -10000, 10000);
  stepper.moveTo(targetSteps); // Встановлення цільової позиції для крокового двигуна

  // ... керування іншими сервоприводами
}
```

Рисунок 2.22 – Логіка функції handlePotControl: керування реверсивною парою та кроковим двигуном

У режимі запису, при натисканні кнопки SELECT, викликається функція saveFrame(), яка фіксує поточні значення приводів у наступний вільний елемент масиву algorithms. Цей процес забезпечує, що до структури Frame записуються фактичні цифрові позиції, досягнуті кроковим двигуном stepper.currentPosition() та встановлені кути сервоприводів servo.read().

Фрагмент коду, що відображає запис позицій приводів у структуру, наведено на рисунку 2.23.

```
void saveFrame(int slot) {
  // Перевірка, чи не перевищено максимальну кількість кадрів (15) у слоті
  if (frameCounts[slot] < 15) {
    int currentFrame = frameCounts[slot];

    // Збереження позиції крокового двигуна
    algorithms[slot][currentFrame].stepperPos = stepper.currentPosition();

    // Збереження кутів сервоприводів
    algorithms[slot][currentFrame].servo1Angle = servo1.read();
    algorithms[slot][currentFrame].servo2Angle = servo2.read();
    // ... збереження інших осей та захвату

    frameCounts[slot]++;
    // Збільшення лічильника кадрів у цьому слоті
    // Відображення на LCD: "Frame: X / 15 Saved"
  }
}
```

Рисунок 2.23 – Фрагмент функції saveFrame: збереження позицій приводів у поточний кадр

Функція відтворення runAutoProgram() забезпечує послідовне виконання кадрів, приділяючи особливу увагу плавності рухів та синхронізації приводів. Після виконання рухів усіх приводів, програма вставляє фіксовану затримку 1000 мс перед початком наступного кадру. Функція moveServoSmoothly() (яка викликається у runAutoProgram) реалізує покрокову інтерполяцію руху для сервоприводів. Це досягається інкрементуванням/декрементуванням кута сервоприводу на 1° за фіксований мінімальний інтервал часу.

Логіка виконання алгоритму відтворення представлена на рисунку 2.24.

```
void runAutoProgram(int slot) {
  for (int i = 0; i < frameCounts[slot]; i++) {
    Frame currentFrame = algorithms[slot][i];

    // 1. Встановлення цільової позиції для крокового двигуна
    stepper.moveTo(currentFrame.stepperPos);
    while (stepper.distanceToGo() != 0) {
      // Крековий двигун рухається, доки не досягне цілі (блокуючий цикл
      stepper.run();
    }

    // 2. Плавний рух сервоприводів (не блокує)
    moveServoSmoothly(servo1, currentFrame.servo1Angle, 10);
    moveServoSmoothly(servo2, currentFrame.servo2Angle, 10);
    // ... рух інших осей

    // 3. Синхронізаційна пауза між кадрами
    delay(1000);
  }
  currentMode = MAIN_MENU; // Повернення після завершення
}
```

Рисунок 2.24 – Логіка функції runAutoProgram: послідовне виконання кадрів, очікування крокового двигуна та синхронізаційна пауза

Ця архітектура забезпечує надійну роботу маніпулятора у всіх режимах, поєднуючи точність крокового двигуна з гнучкістю сервоприводів, керованих через ефективний програмний інтерфейс. Загальний код системи керування представлений у Додатку А.

Висновки до другого розділу

У даному розділі було успішно виконано розробку системи керування навчальним роботом-маніпулятором. На основі кінематичного аналізу проведено оптимізацію конструкції шляхом її спрощення до п'ятиосьової конфігурації, що, разом із розробкою конструкції захватного пристрою, забезпечило необхідну функціональність при зниженні інженерної складності. Як центральний елемент апаратної частини обрано мікроконтролер Arduino Nano. Спроєктовано та реалізовано конструкцію блоку керування, який використовує аналогові потенціометри для вводу та LCD-екран з модулем I²C для візуалізації зворотного зв'язку.

Ключовим архітектурним рішенням стала реалізація принципу прямого кутового керування у ручному режимі, що дозволяє студентам інтуїтивно контролювати кожен шарнір, спрощуючи освоєння базової кінематики. Розроблений програмний код включає базові алгоритми керування ШІМ-сигналами та протоколи I^2C, що забезпечують повний функціонал навчального комплексу: ручне та дистанційне керування, навчання та автоматичне відтворення траєкторії. Таким чином, сформована повна технічна специфікація та готова до реалізації апаратно-програмна архітектура.

3 КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ. МЕТОДИКА ВИРІШЕННЯ ПРЯМОЇ ТА ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧ КІНЕМАТИКИ

У цьому розділі виконуються основні розрахунки, необхідні для аналізу та програмної реалізації роботи п’ятиосьового роботизованого маніпулятора, розробленого в межах даної роботи. Розрахункова частина охоплює дослідження кінематичних характеристик системи, а саме - визначення співвідношень між положеннями ланок та координатами кінцевого ефектора у просторі.

3.1 Кінематична модель маніпулятора

Для побудови математичної моделі руху роботизованого маніпулятора необхідно формалізувати його геометричну структуру. Основою такого опису є кінематична модель, функціональне призначення якої полягає у встановленні однозначної залежності між набором узагальнених координат суглобів та просторовим положенням і орієнтацією кінцевого виконавчого органу (ефектора) у системі координат.

Одним із найпоширеніших методів побудови кінематичних моделей є метод Денавіта–Хартенберга (D–H). Його суть полягає в тому, що для кожної пари сусідніх ланок визначається окрема система координат, а взаємне положення цих систем описується чотирма параметрами - двома лінійними та двома кутовими. Такий підхід дозволяє чітко формалізувати просторову структуру маніпулятора та звести складні геометричні співвідношення до набору стандартних матричних перетворень, що суттєво спрощує подальші аналітичні розрахунки [19].

Розроблений у даному проєкті маніпулятор має п’ять обертальних ступенів свободи, які утворюють послідовний шарнірний ланцюг із шести ланок, пронумерованих від нульової до п’ятої. Нульова ланка відповідає базі або «землі» робота, тому система вважається п’ятиланковою. Така конфігурація забезпечує

позиціювання ефектора у тривимірному просторі з можливістю часткового керування його орієнтацією. Перші три осі формують просторове положення захоплювача, а четверта і п’ята - забезпечують нахил та орієнтацію інструмента. Це дозволяє реалізувати більшість базових маніпуляційних операцій, характерних для промислових роботів навчального призначення.

Для точного опису руху маніпулятора необхідно закріпити за кожною ланкою власну систему координат, яка жорстко зв’язана з нею та повторює всі її переміщення відносно попередньої. Таким чином, при русі i-ї ланки її система координат змінює положення відносно i_{-1}-ої, що дозволяє однозначно визначати просторове положення всіх елементів конструкції.

Алгоритм прив’язки систем координат, запропонований Денавітом і Хартенбергом, застосовується послідовно для кожної пари сусідніх ланок. Він передбачає чотири основні дії, які дозволяють формально описати просторове розташування осей та створити основу для подальшого розрахунку параметрів D–H. У результаті отримується уніфікована система, що дає змогу легко переходити від координат бази до координат кінцевого виконавчого органу.

Саме цей підхід і використано під час побудови кінематичної моделі п’ятиосьового маніпулятора, структура якого наведена на рисунку 3.1. Кінцевим результатом застосування цього алгоритму є Таблиця параметрів Денавіта–Хартенберга, яка є необхідною та достатньою основою для формування однорідних матриць перетворення та, відповідно, розв'язання прямої та оберненої задач кінематики маніпулятора.

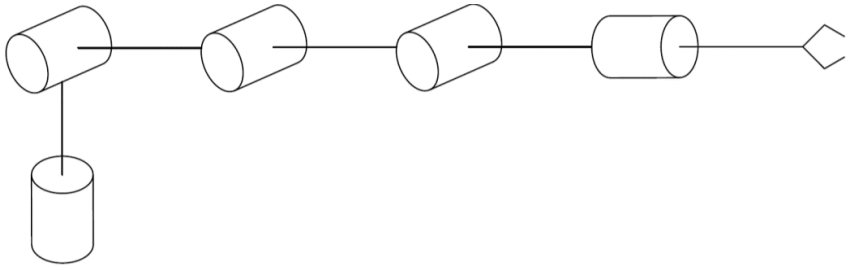


Рисунок 3.1 – Кінематична структура маніпулятора

Насамперед, необхідно визначити, що вісь z_i завжди співпадає з віссю обертання або поступального руху відповідного суглоба. Це є основним орієнтиром для побудови систем координат, адже саме навколо цієї осі здійснюється рух ланки. В даному випадку зчленування є обертальними, тому вісь z_i проходить уздовж осі обертання.

Далі обирається вісь x_i. Вона спрямовується вздовж спільної нормалі між осями z_i та z_{i-1}, тобто є перпендикулярною одночасно до обох цих осей. Іншими словами x_i лежить у площині, що проходить через обидві осі z_i та z_{i-1}, і перетинає їх під прямим кутом. Якщо ж осі z_i та z_{i-1}, перетинаються, то вісь x_i вибирається так, щоб вона була перпендикулярною до z_i у точці перетину. У випадку, коли вони паралельні, x_i можна провести довільно, головне - щоб вона залишалася перпендикулярною до z_i.

Вісь y_i визначаєтсья за правилом правої руки для визначення напрямку векторів, тобто таким чином, щоб система координат залишалася правобічною:

$$\overrightarrow{y_i} = \overrightarrow{z_i} \cdot \overrightarrow{x_i}. \tag{3.1}$$

На завершення обирається система кординат n, що є пов’язаною із кінцевим ефектором маніпулятора - захватом. У типовій конфігурації сучасних промислових роботів, де останнє кінематичне зчленування є обертальним - осі z_n та z_{n-1} є колінеарними.

За таких умов, перетворення від системи координат до шуканої системи реалізується за допомогою послідовності двох операцій: зсуву вздовж осі z_{n-1} на фіксовану відстань d_n та подальшого повороту навколо осі z_{n-1} на змінний кут θ_n.

Схематичне зображення п’ятиосьового маніпулятора з нанесеними локальними системами координат x_i, y_i та z_i за методом Денавіта–Хартенберга подано на рисунку 3.2.

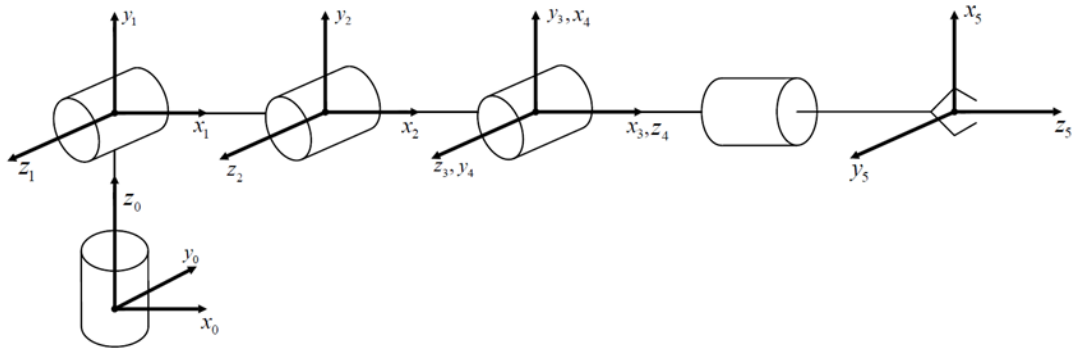


Рисунок 3.2 – Кінематична схема маніпулятора із системами координат, призначеними за методом D-H

Метод Денавіта–Хартенберга дозволяє спростити опис положення ланки в просторі, оскільки він зменшує необхідну кількість координат для визначення системи з шести (три лінійні та три кутові) до лише чотирьох, які називаються параметрами Денавіта–Хартенберга.

- a_i - довжина ланки (відстань між осями Z_i та Z_{i+1});
- α_i - кут між цими осьями навколо осі X_i;
- d_i - зміщення вздовж осі Z_i;
- θ_i - кут обертання навколо осі Z_i.

Параметри a_i та α_i є незмінними величинами, які визначаються конструктивними особливостями маніпуляторів і застосовні до всіх кінематичних схем.

Щодо решти параметрів, d_i та θ_i, то в кожному випадку лише один із них залишається постійним, а інший - змінним. Це залежить від типу шарніра: Для обертального зчленування кут θ_i є змінною величиною, тоді як зміщення d_i є фіксованим (постійним), а для поступального зчленування: ситуація протилежна, зміщення d_i є змінним, а кут θ_i - постійним.

Отже, вихідними параметрами для складання таблиці D–H, а також для подальшого розрахунку задач кінемаатики розробленого робота-маніпулятора є такі конструктивні величини [20]:

- d_1 - Висота основи маніпулятора - 156 мм;
- a_2 - Довжина ланки плеча - 178 мм;
- a_3 - Довжина ланки руки - 164 мм;
- d_5 - Довжина ланки зап'ястя з захватом - 195 мм.

Для подальших розрахунків параметри кожної ланки систематизовано у вигляді таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри DH для 5-осьового робота-маніпулятора

Ланка	a_i(мм)	α_i(◦)	d_i(мм)	θ_i
1	0	90	156	θ_1
2	178	0	0	θ_2
3	164	0	0	θ_3
4	0	90	0	$\theta_4 + \pi/2$
5	0	0	195	θ_5

3.2 Пряма задача кінематики маніпулятора

Першочерговим завданням прямої задачі кінематики (ПЗК) є розрахунок точних координат, а також просторового положення інструменту чи захвата маніпулятора, спираючись на відомі узагальнені координати його ланок.

Під час розв'язання прямої задачі кінематики завжди фігурують дві системи координат. Перша - це вихідна (інерційна) система $o_0x_0y_0z_0$, а друга - кінцева система $o_{\text{n}}x_{\text{n}}y_{\text{n}}z_{\text{n}}$, яка жорстко пов'язана з робочим органом, у даному випадку кінцевим ефектором. Положення та орієнтація однієї системи відносно іншої однозначно визначається шістьма незалежними параметрами: трьома лінійними та трьома кутовими координатами.

Координати довільної точки P у базовій (інерційній) системі $o_0x_0y_0z_0$ (вектор k^0) можуть бути отримані з її координат у кінцевій системі $o_{\text{n}}x_{\text{n}}y_{\text{n}}z_{\text{n}}$

(вектор k^n) за допомогою матриці перетворення T_n^0 відповідно до виразу:

$$k^0 = T_n^0 k^n, \tag{3.2}$$

де T_n^0 це матриця однорідного перетворення, яка надає інформацію про лінійне зміщення та просторову орієнтацію системи $o_{\mathrm{n}} x_{\mathrm{n}} y_{\mathrm{n}} z_{\mathrm{n}}$ відносно системи $o_0 x_0 y_0 z_0$.

Матриця T_n^0 є квадратною матрицею розміром 4×4 та має наступну загальну структуру:

$$T_n^0 = \begin{bmatrix} n_{\mathrm{x}} & s_{\mathrm{x}} & a_{\mathrm{x}} & p_{\mathrm{x}} \\ n_{\mathrm{y}} & s_{\mathrm{y}} & a_{\mathrm{y}} & p_{\mathrm{y}} \\ n_{\mathrm{z}} & s_{\mathrm{z}} & a_{\mathrm{z}} & p_{\mathrm{z}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_n^0 & s_n^0 & a_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{3.3}$$

де R_n^0 - матриця орієнтації кінцевої системи $o_{\mathrm{n}} x_{\mathrm{n}} y_{\mathrm{n}} z_{\mathrm{n}}$ відносно базової $o_0 x_0 y_0 z_0$; n_n^0 - вектор напрямку осі x_{n}; s_n^0 - вектор напрямку осі y_{n}; a_n^0 - вектор напрямку осі z_{n}; p_n^0 - це вектор-стовпець що описує лінійне зміщення початку системи кординат $o_{\mathrm{n}} x_{\mathrm{n}} y_{\mathrm{n}} z_{\mathrm{n}}$ відносно $o_0 x_0 y_0 z_0$.

Для коректного застосування матриці однорідних перетворень вектори координат точки у просторі які зазвичай мають три компоненти (x, y, z), повинні бути доповнені четвертою компонентою - одиницею.

Це перетворення тривимірних декартових координат у чотиривимірні однорідні координати дозволяє здійснити операцію множення:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_n^0 \begin{bmatrix} x_{\mathrm{n}} \\ y_{\mathrm{n}} \\ z_{\mathrm{n}} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

де лівий стовбець, що являє собою вектор k^0, представляє координати

точки у базовій системі $o_0x_0y_0z_0$, а права частина (вектор k^n) представляє координати тієї ж точки у кінцевій системі $o_{\mathrm{n}}x_{\mathrm{n}}y_{\mathrm{n}}z_{\mathrm{n}}$.

Після визначення чотьрьох параметрів для кожної ланки маніпулятора, з них необхідно побудувати матриці однорідного перетворення T_{i}, яі описують перехід від системи координат ланки $i-1$ до системи координат ланки i:

$$T_{\mathrm{i}} = T_{\mathrm{z},\theta_i} T_{\mathrm{z},d_i} T_{\mathrm{x},a_i} T_{\mathrm{x},\alpha_i}. \tag{3.5}$$

У розгорнутому вигляді це послідовне перетворення виглядає так:

$$T_{\mathrm{i}} = \begin{bmatrix} R_{\mathrm{z},\theta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & p_{\mathrm{d}_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & p_{\alpha_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\mathrm{x},\alpha_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & \mathrm{d}_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

де i - номер ланки; R_{z,θ_i} і R_{x,α_i} - базові матриці обертання навколо осей z та x відповідно; p_{d_i} та p_{α_i} - вектори лінійного зміщення з ненульовими компонентами $p_{\mathrm{z}} = \mathrm{d}_i$ та $p_{\mathrm{x}} = a_i$. Звідси слідує їхнє представлення у вигляді однорідних векторів:

$$p_{\mathrm{d}_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathrm{d}_i \end{bmatrix}, p_{\alpha_i} = \begin{bmatrix} a_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{3.7}$$

Підстановка параметрів Денавіта-Хартенберга у загальну формулу дозволяє розрахувати індивідуальні матриці перетворення для всіх n ланок робота:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} cos\theta_1 & 0 & sin\theta_1 & 0 \\ sin\theta_1 & 0 & -cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \mathrm{d}_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{3.8}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} cos\theta_2 & -sin\theta_2 & 0 & a_2cos\theta_2 \\ sin\theta_2 & cos\theta_2 & 0 & a_2cos\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} cos\theta_3 & -sin\theta_3 & 0 & a_3cos\theta_3 \\ sin\theta_3 & cos\theta_3 & 0 & a_3cos\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos\left(\theta_4 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & \sin\left(\theta_4 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ \sin\left(\theta_4 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & -\cos\left(\theta_4 + \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} cos\theta_5 & -sin\theta_5 & 0 & 0 \\ sin\theta_5 & cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \mathrm{d}_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Загальну матрицю однорідного перетворення, яка встановлює зв'язок між базовою та кінцевою системою кординат, отримують послідовним множенням індивідуальних матриць перетворень для кожної ланки:

$$T_n^0 = T_1^0 T_2^1 \dots T_n^{n-1} = \begin{bmatrix} R_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

де R_n^0 - матриця обертання що описує орієнтацію; p_n^0 - вектор що задає положення системи захвата відносно базової системи.

3.3 Обернена задача кінематики маніпулятора

Обернена задача кінематики (ОЗК) полягає у визначенні узагальнених координат (тобто кутів у з'єднаннях або лінійних зміщень) маніпулятора, необхідних для досягнення заданого положення та орієнтації його робочого органу. Ця задача є складнішою, ніж пряма задача кінематики (ПЗК), оскільки

вона часто призводить до невизначеності рішення: одному бажаному положенню захвата в просторі можуть відповідати кілька різних конфігурацій самого робота. Крім того, не існує універсального алгоритму для вирішення ОЗК, оскільки метод розв'язання суттєво залежить від унікальної конструкції маніпулятора. Для розв'язання ОЗК вихідними даними є шість параметрів, що описують цільовий стан (три кутові та три лінійні координати), а також параметри Денавіта-Хартенберга, які відображають геометрію робота. Сама обернена задача кінематики традиційно поділяється на дві окремі підзадачі: ОЗК по положенню та ОЗК по орієнтації.

Обернена задача кінематики по положенню.

Вирішення поставленої задачі ґрунтується на конструктивній властивості, відомій як сферичне зап'ястя. Ця геометрична умова виконується, якщо осі обертання трьох кінцевих шарнірів робота-маніпулятора збігаються в одній точці. Відповідно до даної моделі, ці осі перетинаються в точці o_3.

Цільові кординати для кінцевого ефектора приймаються такими: $p_5^0 = (X, Y, Z) = (290{,}96{,}450)$ мм. Цільова орієнтація: нейтральна - вертикальне розташування кінцевого ефектора $R_5^0 = I$.

Застосувавши суму векторів:

$$p_5^0 = p_3^0 + \mathrm{d}_5 R_5^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{3.14}$$

виразимо координати точки o_3:

$$p_3^0 = p_5^0 - \mathrm{d}_5 R_5^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{3.15}$$

де $p_3^0 = [x_3^0, y_3^0, z_3^0]^T$.

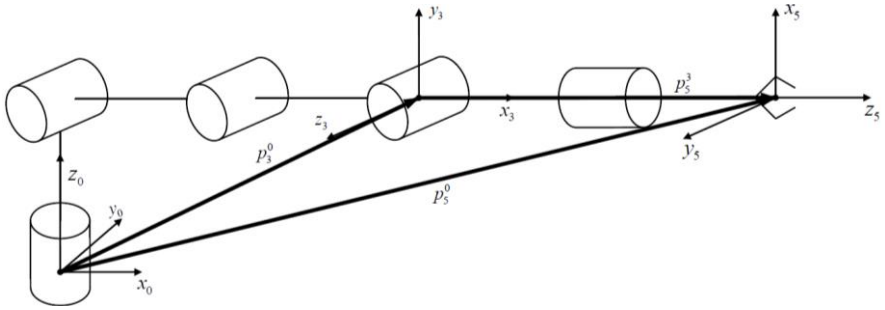


Рисунок 3.3 – Сума векторів при кінематичній декомпозиції

З використанням поточного розташування маніпулятора як вихідних даних, проводиться знаходження першої узагальненої координати.

$$\theta_1 = atan2(y_3^0, x_3^0) = atan2(96{,}290) = 18.32^{\circ}. \quad (3.16)$$

Вже на цьому етапі розрахунку виникає невизначеність рішення. Оскільки значення тангенса повторюється з періодом π одному і тому ж розрахованому значенню відповідають дві можливі координати, які відрізняються на кут π. З огляду на це, другий варіант координати θ може бути розрахований альтернативним способом:

$$\theta_1 = atan2(y_3^0, x_3^0) + \pi. \quad (3.17)$$

Для подальшого аналітичного розрахунку узагальнених координат необхідно попередньо визначити довжини трьох відрізків, які вводяться наступним чином:

$$b = (z_3^0 - d_1) = 255 - 156 = 99 \text{ мм}, \quad (3.18)$$

$$c = \sqrt{(x_3^0)^2 + (y_3^0)^2} = \sqrt{290^2 + 96^2} = 305.477 \text{ мм}, \quad (3.19)$$

$$a = \sqrt{b^2 + c^2} = \sqrt{99^2 + 305{,}477^2} = 321.118 \text{ мм}. \quad (3.20)$$

Дані три відрізки формують прямокутний трикутник, де відрізок a - виступає в ролі гіпотенузи, b - зміщення по висоті o_3 відносно o_1, а c - є проекцією відстані від o_1 до o_3 на площину x_0y_0.

Використовуючи теорему Піфагора, знаходиться:

$$a^2 = b^2 + c^2. \tag{3.21}$$

Далі, комбінуючи теорему косинусів та тригонометричні тотожності, розраховується:

$$a^2 = a_2^2 + a_3^2 - 2a_2a_3\cos(\pi - \theta_3) = a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3\cos\theta_3. \tag{3.22}$$

Звівши формули (16) і (17) в одну, можливо їх записати як:

$$b^2 + c^2 = a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3\cos\theta_3, \tag{3.23}$$

звідки можливо виразити $\cos\theta_3$:

$$\cos\theta_3 = \frac{a^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} = \frac{321.118^2 - 178^2 - 164^2}{2 \cdot 178 \cdot 164} = 0.7599. \tag{3.24}$$

Далі, на основі тригонометричної тотожності, виражається $\sin\theta_3$:

$$\sin\theta_3 = \pm\sqrt{1 - cos^2\theta_3} = \sqrt{1 - 0.7599^2} = 0.6501. \tag{3.25}$$

Кути $\theta_1 - \theta_5$ являють собою узагальнені координати, тобто змінні величини, представлені на рисунку 3.4.

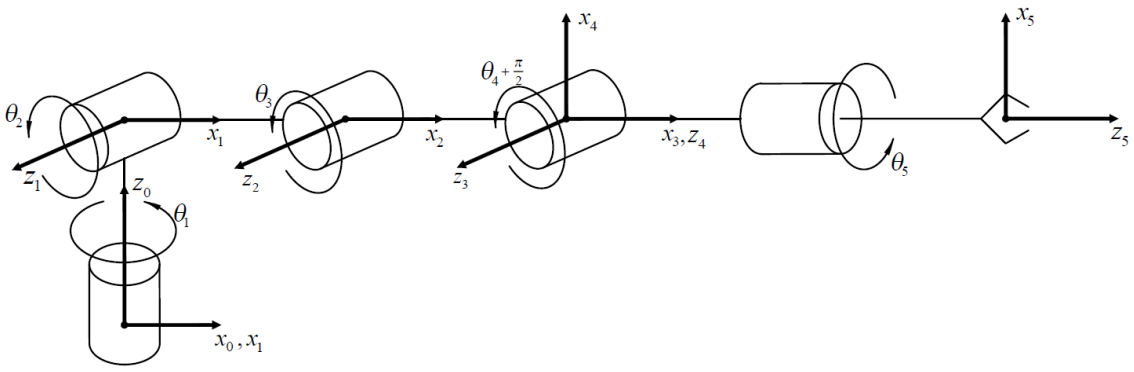


Рисунок 3.4 – Визначення параметрів θ_i

Остаточно, узагальнену координату θ_3 можливо знайти за наступним виразом:

$$\theta_3 = atan2\left(\pm\sqrt{1-cos^2\theta_3}, \cos\theta_3\right), \tag{3.26}$$

$$\theta_3 = atan2(+0.6501, 0.7599) = 37.97^{\circ}.$$

Обчислення кута θ_2 здійснюється шляхом знаходження різниці між двома допоміжними кутами:

- кута α, утвореного відрізками a та c;
- кута β, утвореного відрізками a та a_2.

Узагальнена координата θ_2 виражається наступним чином:

$$\theta_2 = \alpha - \beta. \tag{3.27}$$

Використовуючи тригонометричні співвідношення, що визначають тангенси кутів α та β:

$$\tan\alpha = \frac{b}{c}, \tag{3.28}$$

$$\tan\beta = \frac{a_3 \sin\theta_3}{a_2 + a_3 \cos\theta_3}, \tag{3.29}$$

перепишемо вираз (27) у вигляді:

$$\theta_2 = atan2(b, c) - atan2(a_3 \sin\theta_3 + a_2 + a_3 \cos\theta_3), \tag{3.30}$$

$$\theta_2 = atan2(99{,}305.477) - atan2(165 \cdot 0.6501 + 178 + 164 \cdot 0.7599) = -1.53^{\circ}.$$

Таким чином, були отримані аналітичні вирази, які дозволили обчислити і визначити перші три узагальнені координати θ_1, θ_2 та θ_3.

Обернена задача кінематики по орієнтації.

Відомо, що загальна матриця обертання R_5^0, яка описує орієнтацію захвата відносно базової системи є добутком матриці обертання R_3^0 та матриці обертання R_5^3. Оскільки послідовні обертання навколо однієї осі композиційно поєднуються множенням справа:

$$R_5^0 = R_3^0 R_5^3, \tag{3.31}$$

де R_5^0 це задана цільова матриця орієнтації захвата; R_3^0 це матриця обертання, розрахована на етапі розв'язання прямої задачі для перших трьох ланок.

Для того, щоб знайти кути зап'ястя, необхідно виділити його матрицю обертання R_5^3. Використовуючи ортогональні властивості матриці обертання $(R^{-1} = R^T)$:

$$R_5^3 = (R_3^0)^{-1} R_5^0 = (R_3^0)^T R_5^0. \tag{3.32}$$

Матриця R_5^3 формується за допомогою трьох останніх узагальнених координат, які, зазвичай, відповідають кутам Ейлера:

$$R_5^3 = R_{z,\varphi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (3.33)$$

де r_{ij} - це числові коефіцієнти, які є результатом перемноження транспонованої матриці перших трьох ланок $(R_3^0)^T$ та цільової матриці орієнтації R_5^0. Кожен r_{ij} являє собою конкретне числове значення, яке, згідно з теоретичною структурою матриці R_5^3, має відповідати певній комбінації синусів і косинусів невідомих кутів θ_4 та θ_5.

$$R_5^3 = R_{z,\varphi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} 0.7358 & 0.2436 & 0.6305 \\ -0.6001 & -0.1988 & 0.7749 \\ 0.3143 & -0.9493 & 0 \end{bmatrix}.$$

Далі можливо обчислити остаточні узагальнені координати, за такими формулами:

$$\theta_4 = \theta = atan2\left(\pm\sqrt{1 - r_{33}}, r_{33}\right) = atan2(0.7749, 0.6305) = 50.84^{\circ}, \quad (3.34)$$

$$\theta_5 = \varphi = atan2(\pm r_{23}, \pm r_{13}) = atan2(0.3143, -0.9493) = 161.02^{\circ}. \quad (3.35)$$

Фінальний набір узагальнених координат для p_5^0 = (290, 96, 450) мм:

$$\theta = \begin{bmatrix} 18.32^{\circ} \\ -1.53^{\circ} \\ 39.97^{\circ} \\ 50.84^{\circ} \\ 161.02^{\circ} \end{bmatrix}.$$

Важливо, що для однієї і тієї ж цільової орієнтації можуть існувати кілька можливих конфігурацій зап'ястя. Ця множинність рішень вимагає, щоб програмний код обирав єдиний розв'язок, зазвичай з мінімальним переміщенням суглобів, для забезпечення плавності траєкторії.

Висновки до третього розділу

У даному розділі успішно виконано кінематичний аналіз п'ятиосьового роботизованого маніпулятора. Для побудови математичної моделі та формалізації його геометричної структури використано метод Денавіта–Хартенберга (D–H), який дозволив звести складні співвідношення до стандартних матричних перетворень. На основі цього було сформовано необхідну Таблицю параметрів D–H.

Використовуючи цю модель, успішно розв'язано дві ключові задачі кінематики:

- пряма Задача Кінематики: Розв'язана шляхом послідовного множення однорідних матриць перетворення, що дозволило отримати загальну матрицю T_n^0, яка однозначно визначає просторове положення та орієнтацію кінцевого ефектора;

- обернена Задача Кінематики: Розв'язана геометричним методом, заснованим на властивості сферичного зап'ястя, та була декомпонована на підзадачі по положенню й орієнтації. Отримано аналітичні вирази для обчислення всіх узагальнених координат, враховуючи при цьому невизначеність рішення.

Таким чином, створено повну та точну математичну модель робота-маніпулятора. Ця модель має ключове значення для всього проєкту: вона може використовуватися як необхідний навчальний матеріал для вивчення основ кінематики, а головне - вона забезпечує основу для подальшої модернізації системи керування. Зокрема, отримані аналітичні вирази будуть використані для інтеграції в більш потужні керуючі платформи, що дозволить перейти від поточного прямого кутового керування до повноцінного керування в просторі координат (X,Y,Z).

ВИСНОВКИ

У ході виконання даної кваліфікаційної роботи було повністю досягнуто поставлену мету - теоретична розробка та програмно-алгоритмічна реалізація системи керування роботом-маніпулятором, призначеної для використання як навчально-дослідницький стенд. Для цього було послідовно вирішено низку важливих завдань.

Проведено аналітичний огляд сучасних систем, обґрунтовано необхідність власної розробки та виконано технічне проєктування. Обґрунтована оптимізація кінематичної схеми шляхом переходу до 5-осьової моделі, що спростило математичне моделювання. У рамках роботи також розроблено конструкцію захватного пристрою та конструкцію блоку керування. Розроблено повну кінематичну модель з використанням методу Денавіта–Хартенберга (D–H). На її основі аналітично розв'язано пряму та обернену задачі кінематики, отримавши вичерпні вирази для обчислення кутів ланок.

Створено програмну та алгоритмічну реалізацію керуючого коду для мікроконтролера. При цьому в ручному режимі керування було реалізовано метод принципу прямого кутового керування, що забезпечує високу інтуїтивність освоєння кінематики. Також створено інтерактивний користувацький інтерфейс. Проведено апаратне тестування ключових компонентів системи, яке підтвердило коректність розроблених математичних моделей та алгоритмів керування.

Таким чином, розроблена система керування є повністю готовим проєктом з точки зору архітектури, моделювання та алгоритмів, що має значну освітню цінність. Отримані аналітичні розв'язки ОЗК є основою, яку у майбутньому можна використати для модернізації системи керування шляхом переходу на потужніший мікроконтролер, що дозволить реалізувати керування роботом у просторі координат (X,Y,Z) замість поточного кутового керування.

Подальші перспективи роботи полягають у збірці та тестуванні фізичної конструкції, а також у розробці системи динамічного керування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Research and Education in Robotics: A Comprehensive Review, Trends, Challenges, and Future Directions. // Robotics. 2024. Vol. 13. Iss. 4.

2. Ніколайчук В.М. Основи робототехніки: Навчальний посібник - Рівне: НУВГП, 2008, – 76 с.

3. ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://kaf-av.tntu.edu.ua/index.php/mn-abiturient/mn-articles/676-art

4. Six-Axis High-Speed Assembly and Handling Robot. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial /assembly-handling/gp-series/gp8

5. Braccio Robotic Arm. Arduino Documentation: [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://docs.arduino.cc/retired/getting-started-guides/Braccio/

6. uArm Swift Pro documentation. UFactory Documentation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.google.com/search?q=https://ufactory-docs.readthedocs.io/en/latest/uarm_swift_pro/.

7. OWI-535 Robotic Arm Edge. OWI Inc. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.google.com/search?q=https://www.owirobot.com/product/owi-535-robotic-arm-edge/.

8. Banzi M., Shiloh M. Getting Started with Arduino. - 3rd ed. - Sebastopol: Maker Media, 2014. - 280 p.

9. Алімісіс Д. Educational robotics: Open questions and new challenges // Global Engineering Education Conference (EDUCON): [Матеріали конференції]. 2013. P. 135–139.

10. Пінковський Д.С. Розробка конструкції промислового робота з використанням адитивних технологій – Хмельницький: ХНУ,2024, - 61 с.

11. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. СУЧАСНІ АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ 3D ДРУКУ. ОСОБЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ – Вінниця: ВНТУ 2021. – 106 с.

12. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. – Хмельницький: ХНУ, 2017 – 9 с.

13. Nano Плати Ардуїно. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Nano/

14. Prathiba B. et al. A review of Arduino board's, Lilypad's & Arduino shields. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. Iss. 20. P. 10074–10080.

15. Bhatia K. R., et al. Dc motor control system through android application using Arduino nano. // International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science (IJIACS). 2014. Vol. 3. Iss. 5. P. 104–109.

16. Підключення LCD дисплея 2004 до плати Ардуїно. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://robostore.com.ua/rabota-s-lcd-displeem-2004/?srsltid=AfmBOordA-RsEXCYXe5VSmm4TA6-tMtM1Y1XVbHFkKS 79leRkTpe_fL

17. Вибір крокового двигуна. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://geekmatic.in.ua/ua/vibor_shagovogo_dvigatelia

18. Microchip Technology. ATmega328P Datasheet. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P

19. Craig, John J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 4th ed. Pearson Education, 2018.

20. Prada, E., Murali, S., Miková, Ľ., Ligušová, J. Application of Denavit Hartenberg method in service robotics. Acta Mechatronica – International Scientific Journal. 2020. Vol. 5, No. 4, P. 47–52.

ДОДАТКИ