

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


## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

### Розробка конструкції трьохосьового робота маніпулятора

Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
4 курсу групи РМ-21-1

  
Підпис

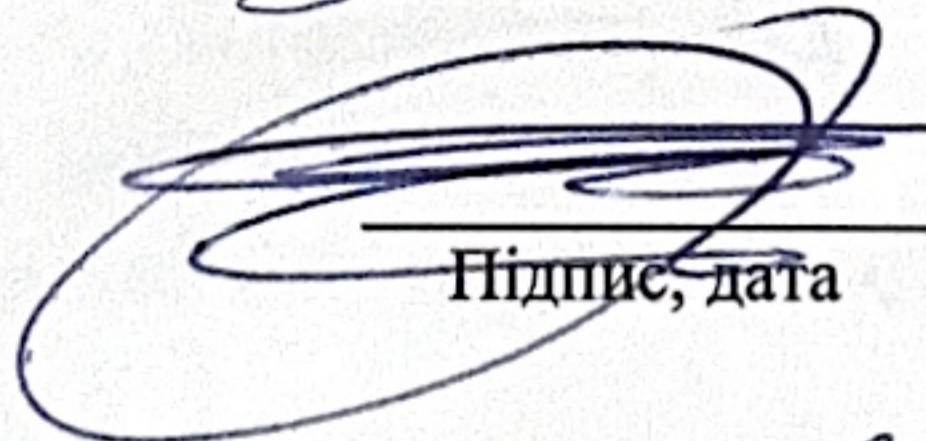
Поліщук І.О.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

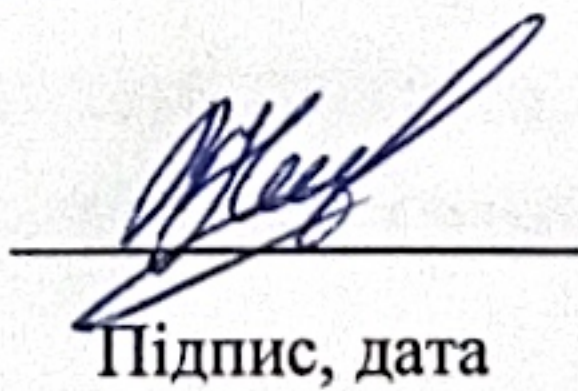
д.т.н., проф. Скиба М.Є.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

О.Т. Поліщук  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.  
Ініціали, прізвище

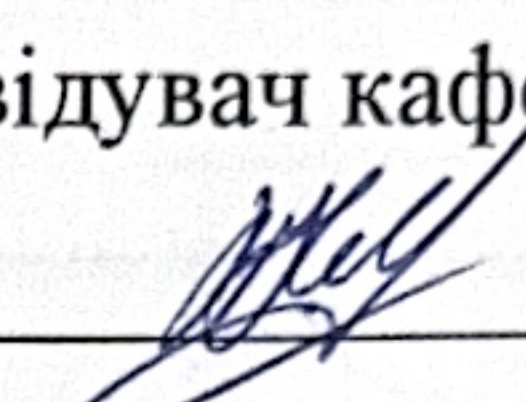
2 06 2025 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень бакалавр  
Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 131 «Галузеве машинобудування»  
Освітня програма Робототехнічні та мехатронні системи галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

  
\_\_\_\_\_

2. 06 2025

## ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

**Поліщук Ілля Олегович**

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка конструкції трьохосьового робота маніпулятора**

керівник роботи **Скиба М.Є., д.т.н, професор**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики роботів маніпуляторів аналогів**

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 **Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи**

2 **Розробка конструкції трьохосьового робота маніпулятора**

3 **Розрахунки, що підтверджують працездатність трьохосьового робота маніпулятора**

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Типи маніпуляторів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2.

Трьохосьовий робот маніпулятор. Схема структурна (A1). Аркуш 3.

Трьохосьовий робот маніпулятор. Вид загальний (A1). Аркуш 4. Основа.

Вид загальний (A1). Аркуш 5. Схват. Вид загальний (A1). Аркуш 6.

Трьохосьовий робот маніпулятор. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

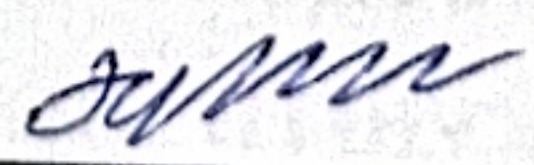
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

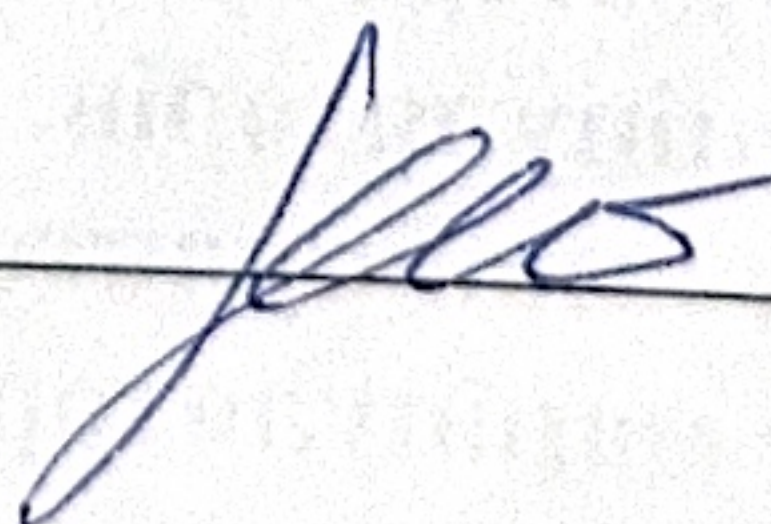
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	20.05.25р.	
2 Розробка конструкції трьохосового робота маніпулятора	01.06.25р.	
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність трьохосового робота маніпулятора	07.06.25р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	15.06.25р.	

Студент

  
Підпис

Поліщук І.О.  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Скиба М.Є.  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Поліщук Ілля Олегович**

---

2. Тема бакалаврської роботи **Розробка конструкції трьохосового робота маніпулятора**

---

---

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

---

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 76

5. У промисловості маніпулятори широко використовуються для автоматизації технологічних процесів, що дозволяє зменшити участь людини в монотонних, важких або небезпечних операціях, підвищити продуктивність та забезпечити гнучкість виробництва. В умовах серійного або індивідуально-го виробництва це сприяє адаптації виробничих систем до змін попиту та номенклатури продукції. Роботизовані маніпулятори стали невід'ємною складовою інтелектуальних виробничих середовищ, орієнтованих на принципи Індустрії 4.0. Метою бакалаврської роботи є розробка конструкції трьохосового робота-маніпулятора, яка включає створення його кінематичної схеми та побудову тривимірної комп'ютерної моделі. Такий підхід дозволяє не лише вивчити особливості руху маніпулятора, але й закласти основу для подальшої реалізації фізичного прототипу з можливістю програмного керування. Тому тема бакалаврської роботи є актуальною. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи. В другому розділі здійснено розробку конструкції трьохосового робота маніпулятора. В третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність трьохосового робота маніпулятора.

Підпис студента Ілля Поліщук

" 2 " 06 2025 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 4 від " 28 " 06 2025 р.

Оцінка проекту ЕК 5,0 / А  
Рекомендації ЕК впровадження у виробництво та в навчальний процес

---

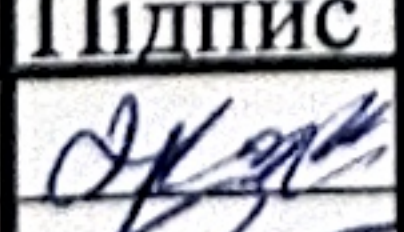
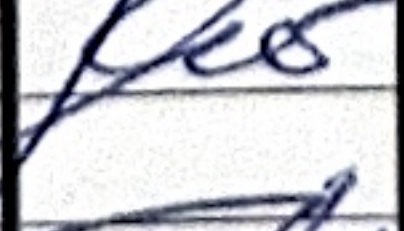
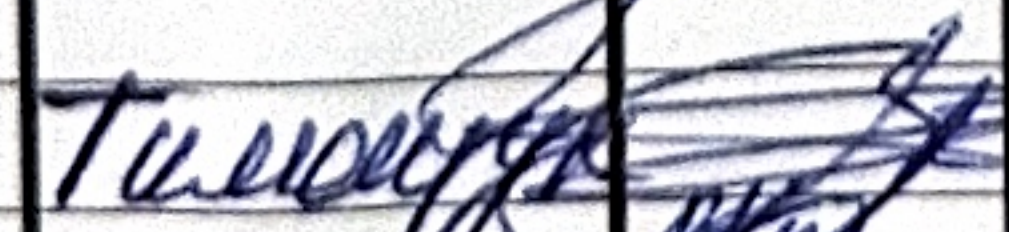


Особливі відмітки —

Технічний секретар Ілля Поліщук

" 28 " 06 2025 р.

## ЗМІСТ

		стор.
	Вступ	6
1	Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	8
1.1	Поточний стан і перспективи розвитку робототехніки в Україні	8
1.2	Типи роботів маніпуляторів	11
1.3	Класифікація роботів маніпуляторів	21
1.4	Види електродвигунів, що використовуються в маніпуляторах	23
1.5	Системи керування роботами маніпуляторами	25
1.6	Програмне забезпечення для створення 3D-моделей роботів-маніпуляторів	26
1.7	Приклади використання роботів маніпуляторів в промисловості	30
1.8	Висновки до першого розділу	35
2	Розробка конструкції трьохосьового робота маніпулятора	37
2.1	Розробка структурної кінематичної схеми робота маніпулятора	3
2.2	Вибір програмного забезпечення для проектування трьохосьового робота маніпулятора	38
2.3	Проектування ланок трьохосьового робота маніпулятора	41
2.4	Проектування основи робота маніпулятора	47
2.5	Розробка конструкції схвата	52
2.6	Розробка моделі робота-маніпулятора	58
2.8	Висновки до другого розділу	60
3	Розрахунки, що підтверджують працездатність трьохосьового робота маніпулятора	61

БРМА25.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата
Виконав		Поліщук		
Перевір.		Скиба		
Н.контр.				
Затвер.		Неймак		
Розробка конструкції трьохосьового робота маніпулятора			Літера	Арк.ш
			4	76
ХНУ гр.РМ-21-1				

3.1	Теоретичні основи	61
3.2	Розрахунок положень ланок робота маніпулятора з використанням прямої задачі кінематики	63
3.3	Аналіз і практичне застосування прямої задачі кінематики	67
3.4	Висновки до третього розділу	69
	Висновки	71
	Перелік джерел посилання	73
	Додаток А	

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку науки і техніки характеризується стрімким поширенням комп'ютерного моделювання як універсального інструменту для проектування, аналізу й оптимізації складних інженерних систем. Застосування комп'ютерних моделей дозволяє не лише досліджувати об'єкти, які складно або неможливо вивчити аналітичними методами, але й суттєво знизити витрати на створення фізичних прототипів, мінімізувати ризики та скоротити терміни розробки. Особливо важливу роль моделювання відіграє у галузі робототехніки, де точність, надійність і ефективність функціонування механізмів мають першочергове значення.

Однією з ключових сфер застосування комп'ютерного моделювання є розробка роботизованих маніпуляторів - технічних пристроїв, здатних імітувати дії людської руки. Маніпулятор як елемент роботизованої системи поєднує у собі важільну механіку, приводи та керуючу електроніку, що дозволяє йому здійснювати складні маніпуляції з об'єктами: захоплення, переміщення, позиціонування тощо. Завдяки використанню обчислювальних технологій, процес розробки таких систем охоплює побудову їхньої кінематичної структури, аналіз ступенів свободи, оцінку траєкторій руху та візуалізацію роботи в умовах реального середовища.

У промисловості маніпулятори широко використовуються для автоматизації технологічних процесів, що дозволяє зменшити участь людини в монотонних, важких або небезпечних операціях, підвищити продуктивність та забезпечити гнучкість виробництва [1-2]. В умовах серійного або індивідуального виробництва це сприяє адаптації виробничих систем до змін попиту та номенклатури продукції. Роботизовані маніпулятори стали невід'ємною складовою інтелектуальних виробничих середовищ, орієнтованих на принципи Індустрії 4.0 [1-2].

Особливістю маніпулятора з трьома ступенями свободи є можливість просторового переміщення виконавчого органа з мінімальною кількістю приводів, що забезпечує компроміс між функціональністю, точністю та енергоефективністю. У

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

таких системах реалізуються складні просторові рухи, що імітують жести справжньої руки, з використанням поворотних з'єднань. Водночас керування подібними пристроями вимагає точного математичного опису кінематики та ефективного інтерфейсу для програмування поведінки, що обумовлює необхідність створення їхньої цифрової моделі.

Метою цієї бакалаврської роботи є розробка конструкції трьохосьового робота-маніпулятора, яка включає створення його кінематичної схеми та побудову тривимірної комп'ютерної моделі. Такий підхід дозволяє не лише вивчити особливості руху маніпулятора, але й закласти основу для подальшої реалізації фізичного прототипу з можливістю програмного керування.

Актуальність теми дослідження зумовлена стрімким зростанням попиту на роботизовані системи в різних галузях та необхідністю розробки оптимальних технічних рішень на етапі комп'ютерного проєктування [3].

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

## 1.1 Поточний стан і перспективи розвитку робототехніки в Україні

Робототехніка, як один з пріоритетних напрямів сучасної науки і техніки, зазнає стрімкого розвитку у зв'язку з потребами автоматизації виробничих процесів, підвищення ефективності праці, забезпечення безпеки людини в агресивних середовищах, а також удосконалення механізмів взаємодії між людиною і технічними системами [4]. В Україні ця галузь сформувалась на стику прикладної кібернетики, машинобудування, штучного інтелекту та мовленнєвих технологій, зберігаючи сталу наукову традицію, започатковану ще в 1960-х роках.

Одним із визначальних чинників становлення української робототехніки стало створення потужних наукових шкіл у провідних вищих навчальних закладах та академічних інститутах [5]. У першу чергу варто відзначити Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, де під керівництвом академіка Т.К. Вінцюка було закладено фундаментальні принципи побудови мовленнєвих інтерфейсів для автоматизованих технічних систем. Зокрема, метод ІКДП (інтегральної кореляційно-дискримінантної процедури) дозволив реалізувати алгоритми розпізнавання окремих слів та зв'язного мовлення, що стали основою для перших українських робототехнічних комплексів з голосовим керуванням.

У подальшому ці дослідження були продовжені у Львівському національному університеті імені Івана Франка (М.П. Деркач), Харківському національному університеті радіоелектроніки (М.Ф. Бондаренко), Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара (О.М. Карпов), Одеському національному університеті імені І.І. Мечникова (Т.О. Бровченко, Е.О. Нушікян). [6] У межах цих шкіл було створено експериментальні зразки пристроїв, здатних до розпізнавання голосових команд українською мовою, а також здійснення діалогової взаємодії в реальному часі.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На сучасному етапі розвитку робототехніки в Україні особливу увагу приділено створенню інтелектуальних керованих систем, мобільних роботів і гібридних конструкцій, які здатні адаптуватись до мінливих умов середовища та виконувати автономні дії на основі сенсорного зворотного зв'язку. Зразковим прикладом є система типу «Око – рука», яка поєднує зорове сприйняття, маніпуляційні дії та регуляцію зусиль захоплення в залежності від ваги й форми об'єкта. Цей тип роботів був орієнтований на виконання завдань у шкідливих або небезпечних умовах (високі температури, радіація, агресивне середовище) та став одним із перших представників інтелектуальних машин в Україні.

Важливим напрямом є розвиток мовленнєвих технологій, зокрема розпізнавання і синтезу українського мовлення. Ці розробки дозволяють реалізовувати голосове управління технічними системами, що значно спрощує експлуатацію роботів як у виробничій, так і в побутовій сфері. Дослідницькі групи працюють над розширенням словникового запасу систем до 100 тисяч слів, підвищенням точності розпізнавання мовлення в умовах шуму, створенням природного інтонування та персоналізацією голосових відповідей.

Застосування робототехнічних систем в Україні охоплює низку важливих галузей:

- промисловість і машинобудування — впровадження роботів дозволяє підвищити продуктивність, зменшити людський фактор у небезпечних умовах праці, автоматизувати складальні, зварювальні, фарбувальні та інші технологічні операції. Розробляються промислові маніпулятори для важких механічних робіт, а також мобільні платформи для логістичних задач;

- оборонна сфера створюються автономні платформи розвідки, дистанційного розмінування, а також бойові модулі з керуванням на основі ШІ.

- медицина — ведеться розробка хірургічних роботів, які підвищують точність операцій, систем діагностики на основі комп'ютерного зору, а також реабілітаційних пристроїв з нейроінтерфейсом;

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- соціальна сфера і побут — впроваджуються роботи для догляду за людьми похилого віку, пацієнтами з обмеженими можливостями, обслуговування побутових процесів (прибирання, готування їжі, прання, моніторинг безпеки);

- освіта і культура — створення національних ігрових та освітніх роботів дозволяє залучити молодь до інженерної творчості та зменшити залежність від імпорتنих моделей з іншомовним програмним забезпеченням.

Значним напрямом досліджень є також створення протезів з нейрокеруванням, здатних реагувати на електричні сигнали м'язів та відновлювати втрачені функції людини. Такі технології мають не лише медичне, а й соціальне значення, оскільки сприяють реабілітації та поверненню до повноцінного життя.

У перспективі національні науково-технічні розробки спрямовані на:

- створення гібридних роботів з автономним прийняттям рішень у складних середовищах;

- інтеграцію мовленнєвих, візуальних та тактильних каналів сприйняття;

- побудову когнітивних моделей мислення в технічних системах;

- розвиток вітчизняного виробництва робототехнічного обладнання;

- формування міжгалузевої інфраструктури для серійного впровадження роботів.

Важливо зазначити, що перспективи розвитку робототехніки в Україні тісно пов'язані з модернізацією промислових підприємств, цифровою трансформацією освіти, підтримкою стартапів і збільшенням інвестицій у прикладні наукові дослідження. Крім того, ефективне функціонування галузі потребує системної державної політики у сфері інтелектуальної власності, стандартизації, сертифікації та технічного регулювання робототехнічних комплексів.

Отже, поточний стан робототехніки в Україні демонструє наявність наукового потенціалу, розвиненої прикладної бази та сприятливих умов для впровадження інтелектуальних машин у виробництво, медицину, освіту та соціальну сферу. Подальший розвиток галузі залежатиме від здатності інтегрувати світові досягнення з національними інженерними традиціями та забезпечити технологічний прорив у ключових сегментах.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2 Типи роботів маніпуляторів

Одним із першочергових завдань, що постає перед розробником маніпулятора, є вибір його кінематичної структури, яка визначає тип механічного з'єднання, просторову конфігурацію, кількість і послідовність ступенів свободи, а також можливості переміщення виконавчого органа [7, 8]. Вибір кінематичної схеми безпосередньо впливає на функціональність маніпулятора, його точність, гнучкість, вантажопідйомність і здатність до обходу перешкод.

У більшості випадків маніпулятори проєктуються за аналогією з кінематикою людської руки, оскільки це дозволяє ефективно імітувати дії оператора: захоплення, переміщення, орієнтацію та укладання об'єктів у просторі. Відповідно, структурна схема маніпулятора повинна забезпечувати подібні до людської руки кінематичні властивості, включаючи складові руху в плечовому, ліктьовому та зап'ястковому суглобах. Це досягається шляхом впровадження серії послідовно з'єднаних ланок з відповідними ступенями свободи.

З точки зору мінімальних функціональних вимог, маніпулятор повинен мати щонайменше три ступені рухливості (або три ступені свободи), які забезпечують можливість переміщення виконавчого механізму (інструменту чи захоплювача) в будь-яку точку робочої зони. Для виконання орієнтації інструменту в просторі додатково можуть вводитися ще три обертові ступені — таким чином формується повна шестиступенева система, що дозволяє повноцінно керувати положенням і орієнтацією об'єкта в тривимірному просторі.

Кожна ступінь рухливості управляється окремим приводом, який генерує керований обертальний або поступальний рух. У сучасних конструкціях маніпуляторів застосовуються різні типи приводів [10, 11]:

- електромеханічні — найпоширеніші завдяки точності, простоті керування та широкому діапазону швидкостей;
- гідравлічні — застосовуються у важких умовах, де необхідна велика сила та висока надійність;

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- пневматичні — використовуються в системах з низькими навантаженнями та високими вимогами до швидкодії;

- комбіновані — поєднують переваги кількох типів приводів і дозволяють адаптувати систему до складних умов експлуатації.

На практиці реалізовано велику кількість різноманітних кінематичних схем, які забезпечують просторове покриття зони обслуговування і виконання регіональних переміщень. Однак, у промисловій робототехніці найбільш широкого розповсюдження набули п'ять базових схем, які побудовані на основі послідовного з'єднання однорухомих кінематичних пар (зазвичай обертових або поступальних):

- циліндрична схема — забезпечує вертикальне переміщення та обертання навколо вертикальної осі;

- сферична (полярна) схема — включає два обертові та один радіальний ступінь свободи;

- координатна (декартова) — реалізує рух у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (X, Y, Z);

- антропоморфна схема — імітує структуру людської руки з плечем, передпліччям і зап'ястям;

- гібридна схема — поєднує елементи кількох базових структур для досягнення розширених функціональних можливостей.

Кожна з цих схем має свої переваги й обмеження з точки зору складності реалізації, зони досяжності, точності позиціонування та зручності програмування. Тому вибір конкретної конфігурації залежить від призначення маніпулятора, типу операцій, що виконуються, а також особливостей робочого середовища.

Декартовий тип [10, 11].

Маніпулятор (рис. 1.1), що працює в декартовій (прямокутній) системі координат, має одну з найпростіших кінематичних структур, завдяки чому відзначається високою точністю позиціонування та простотою керування. Його конструкція передбачає поступальні переміщення виконавчого органа (схвата) вздовж трьох взаємно перпендикулярних осей координатного простору:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

X — переміщення зліва направо;

Y — переміщення вперед-назад;

Z — переміщення вгору-вниз.

Завдяки прямолінійній траєкторії руху та відсутності складних обертових кінематичних ланок, такі маніпулятори широко застосовуються в задачах точного позиціонування, палетування, автоматизованого складання, а також у 3D-принтерах і координатних столах. Обмеженням декартової системи є її порівняно невелика маневровість та громіздка конструкція при збільшенні робочої зони, однак для операцій, що вимагають високої повторюваності й точності, вона є надзвичайно ефективною.

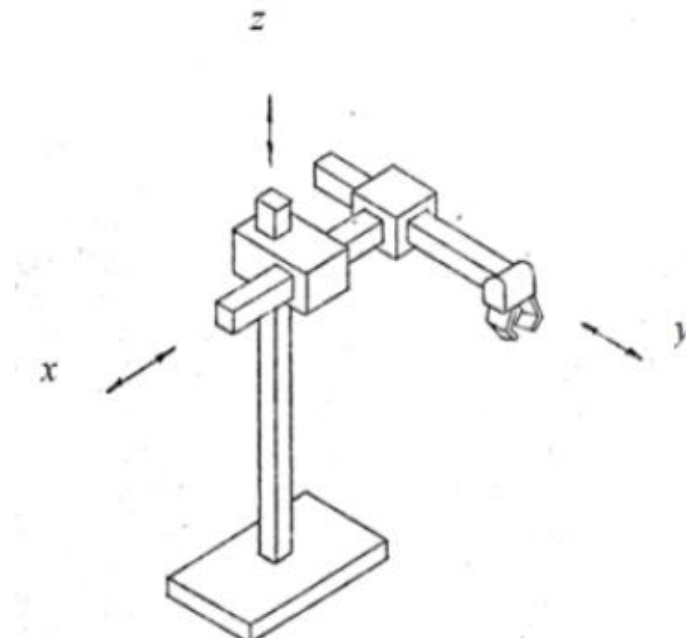


Рисунок 1.1 - Маніпулятор декартового типу

Циліндричний тип [10, 11].

Маніпулятор (рис. 1.2), що функціонує в циліндричній системі координат, має комбіновану кінематичну структуру, яка забезпечує рух схвата в трьох напрямках:

- поступальний рух уздовж вертикальної осі (Z) — підйом і опускання виконавчого органа вздовж стійки;
- радіальне переміщення (R) — висування або втягування схвата на певну відстань від осі обертання;

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- обертовий рух ( $\theta$ ) — поворот навколо вертикальної осі основи, зазвичай з обмеженим кутом обертання.

Така конфігурація дозволяє маніпулятору ефективно працювати в циліндричному робочому просторі, що утворюється навколо вертикальної осі обертання. Обмеження кута повороту, як правило, пов'язане з конструктивними або безпековими обмеженнями, однак цього цілком достатньо для виконання багатьох типових задач — зокрема завантаження/розвантаження, обслуговування верстатів, складальних операцій тощо.

Циліндричні маніпулятори поєднують простоту механіки, надійність та добру повторюваність, проте поступаються у маневреності більш складним схемам, таким як антропоморфна чи сферична.

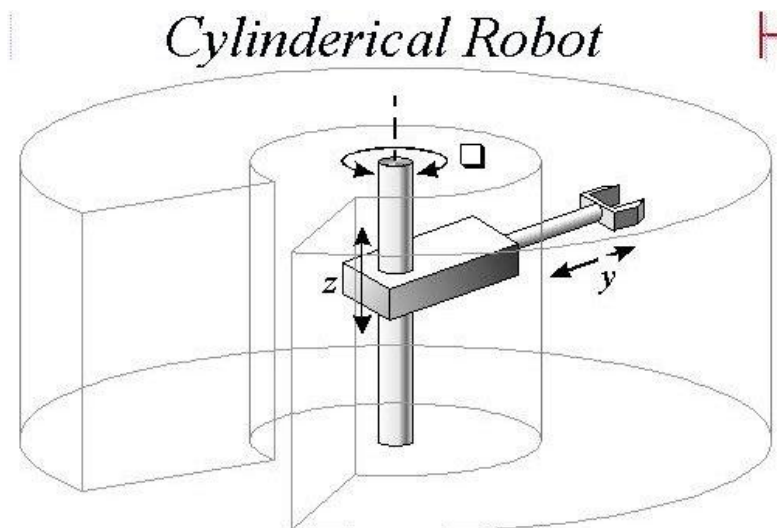


Рисунок 1.2 - Маніпулятор циліндричного типу

Сферичний тип [10, 11].

Маніпулятор (рис. 1.3), що функціонує в сферичній (або полярній) системі координат, має кінематичну структуру, яка забезпечує переміщення виконавчого органа в усіченій сферичній зоні простору. Основні ступені рухливості такого маніпулятора включають:

- радіальне переміщення — схват висувається або втягується вздовж телескопічної ланки, змінюючи відстань до об'єкта;

- поворот у вертикальній площині — виконується через обертання навколо горизонтальної осі в умовному «плечовому» шарнірі, що забезпечує переміщення вгору або вниз;

- обертання навколо вертикальної осі — дозволяє охопити об'єкти, розташовані по колу навколо основи маніпулятора.

Завдяки такій структурі досягається тривимірна мобільність у межах сферичного сектору, що робить цю схему універсальною для багатьох задач обробки, сортування та монтажу. Характерна ознака — компактність механізму при відносно великій зоні досяжності.

Сферична схема використовувалась у перших промислових роботах, таких як UNIMATE, які демонстрували достатню гнучкість, простоту керування та прийнятну точність для виконання базових автоматизованих операцій. На сьогодні подібні конструкції знаходять застосування в умовах, де необхідно забезпечити доступ до об'єктів з різних напрямків при обмеженому просторі навколо маніпулятора.

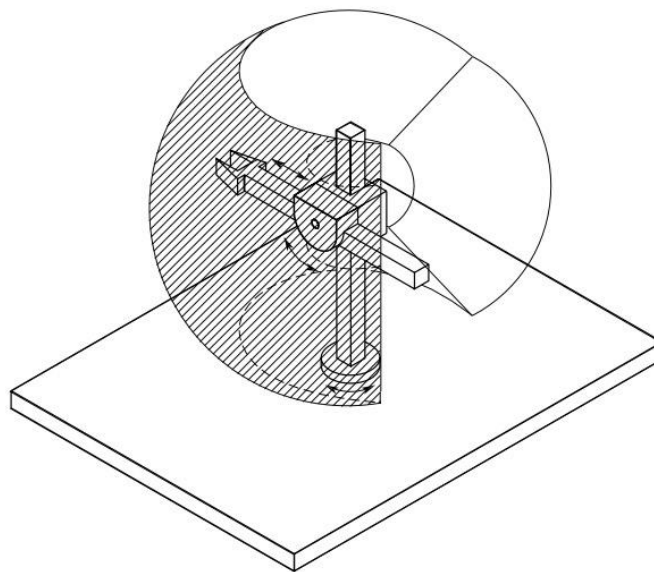


Рисунок 1.3 - Маніпулятор сферичного типу

Ангулярний тип [10-12].

Шарнірний маніпулятор (рис. 1.4), що функціонує в ангулярній (кутовій) системі координат, має повністю обертову кінематичну структуру, побудовану

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

виключно на обертальних кінематичних парах. Така конструкція не містить поступальних з'єднань, що надає маніпулятору високу гнучкість і мобільність при виконанні просторових маніпуляцій.

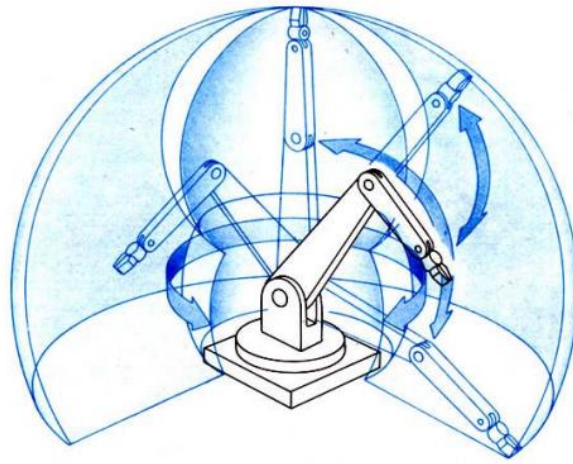


Рисунок 1.4 - Маніпулятор ангулярного типу

За своєю структурою цей тип маніпулятора найбільш наближений до антропоморфної руки людини. Він включає:

- умовне «плечове» зчленування, яке забезпечує обертання навколо вертикальної та горизонтальної осей,
- «ліктьове» зчленування, що дозволяє змінювати кут між ланками,
- «зап'ястя», яке виконує орієнтацію інструмента у просторі.

Кінематична будова дозволяє цьому маніпулятору охоплювати значно більшу робочу зону порівняно з маніпуляторами інших типів, долаючи перешкоди за складними траєкторіями. Завдяки послідовному поєднанню обертальних ланок шарнірний маніпулятор здатен:

- ефективно працювати в обмежених просторах,
- змінювати конфігурацію для уникнення зіткнень,
- виконувати високоточні дії з різною орієнтацією інструмента.

Попри численні переваги, складність керування шарнірним маніпулятором є істотним викликом. У зв'язку з тим, що рух виконавчого органа є результатом взаємодії кількох обертових ланок, побудова прямої та оберненої кінематики, а також розрахунок траєкторій вимагають високих обчислювальних ресурсів та

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

складних алгоритмів керування. Тим не менш, саме цей тип маніпулятора є найбільш універсальним і поширеним у сучасній промисловій робототехніці, зокрема в зварюванні, фарбуванні, складанні та обслуговуванні складних виробничих систем.

Тип SCARA [12].

Маніпулятор типу SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) (рис. 1.5) являє собою специфічну конструкцію, засновану на модифікованій циліндричній системі координат з обмеженою гнучкістю у вертикальному напрямку та високою рухливістю в горизонтальній площині. Його головною особливістю є те, що всі основні кінематичні пари розташовані в горизонтальній площині, що забезпечує швидке та точне позиціонування в умовах плоских робочих середовищ.

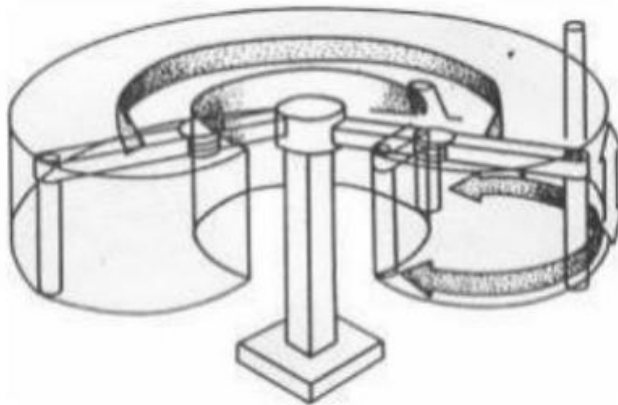


Рисунок 1.5 - Маніпулятор SCARA типу

Конструктивно SCARA-маніпулятор складається з двох або більше послідовно з'єднаних обертових ланок, які можуть розгортатись навколо вертикальної осі, створюючи характерний ефект складаної ширми. Це забезпечує швидке розгортання і складання робочого плеча під час доступу до різних точок у робочій зоні.

Рух у вертикальному напрямку, як правило, забезпечується окремим лінійним приводом, розташованим на кінці руки, що дозволяє опускати або піднімати схват для здійснення захоплення об'єкта.

Робоча зона SCARA-маніпулятора має форму усіченого циліндра, що робить його оптимальним для високошвидкісного складання, пакування, сортуван-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

ня, пайки та переміщення дрібних компонентів. Завдяки високій жорсткості в вертикальному напрямку SCARA забезпечує точність при натиску або монтажі, а його вибіркова податливість дозволяє уникати пошкоджень при невеликому перекосі елементів під час складання.

Маніпулятори цього типу знайшли широке застосування в електронній, фармацевтичній, автомобільній та пакувальній промисловості, де необхідна висока продуктивність, компактність і точне керування в обмеженому просторі.

Перспективним напрямом у розвитку сучасної робототехніки є створення гнучких маніпуляційних систем нового типу, до яких належить, зокрема, робот типу "Spine" (рис. 1.6), розроблений інженерами компанії Spine Robotics. На відміну від традиційних жорстких шарнірних або ланкових конструкцій, у цьому маніпуляторі реалізовано гнучку сегментну архітектуру, що забезпечує надзвичайно широкий діапазон рухів у складних просторових умовах.

Конструкція маніпулятора складається з послідовності чечевицеподібних дисків, що формують довгий хоботоподібний корпус. Між дисками прокладено дві пари натяжних тросів, що керують його конфігурацією. Ці троси з'єднані з поршнями гідравлічних циліндрів, які при подачі тиску змінюють натяг і, відповідно, викликають вигин або видовження окремих сегментів маніпулятора.

Високу точність і плавність рухів забезпечує наявність спеціалізованих сенсорів, які в режимі реального часу зчитують просторове положення та стан кожного сегмента, а також положення кінцевого виконавчого органа (так званого «пензля»). Зібрана інформація передається на систему керування, що здійснює адаптивне регулювання векторів натягу тросів і забезпечує необхідну траєкторію руху.

Завдяки такій конструкції робот типу "Spine" [12, 13]:

- має високу маневреність та здатність обходити перешкоди;
- забезпечує великий радіус дії при компактній базі;
- може працювати у важкодоступних або обмежених просторах;
- демонструє плавні, біомеханічні рухи, подібні до дій змії чи щупальця.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Такі маніпулятори вважаються перспективними для застосування у сфері хірургії, інспекції інфраструктури, атомній промисловості, а також у космічних місіях, де традиційні механізми обмежені в рухливості або габаритах.

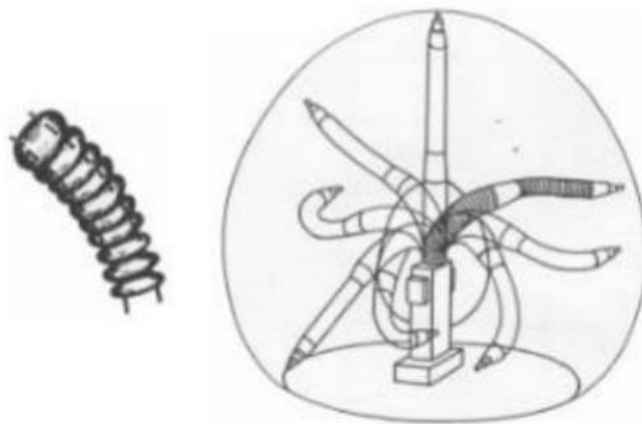


Рисунок 1.6 - Маніпулятор Spine типу

Іншою перспективною конструкцією є маніпулятор маятникового типу IRB 1000, розроблений інженерами шведської компанії ASEA. Особливістю цієї моделі є нестандартне підвісне компонування, у якому маніпулятор закріплено у верхній частині конструкції за допомогою подвійного карданного підвісу, що забезпечує високу ступінь свободи при здійсненні коливальних рухів.

У такій конфігурації маніпулятор відіграє роль маятника, що дозволяє йому переміщуватись у двох напрямках — вздовж поздовжньої та поперечної осей за допомогою направляючих, вбудованих у каркас машини. Це забезпечує широкий робочий простір та можливість обслуговування великих зон із мінімальним втручанням з боку оператора.

Завдяки використанню легких конструкційних матеріалів, ефективної кінематики та мінімізації маси рухомих частин, робот IRB 1000 демонструє значну динамічність і високу швидкодію. За даними розробників ASEA, він працює приблизно в 1,5 раза швидше, ніж традиційні шарнірні маніпулятори аналогічного призначення, що забезпечує підвищену продуктивність у циклічних виробничих операціях, зокрема зварюванні, пакуванні, маніпулюванні об'єктами та обслуговуванні конвеєрних ліній [5].

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Таким чином, маятникові маніпулятори типу IRB 1000 є прикладом інженерного пошуку компактних і надшвидких рішень, орієнтованих на зменшення інерційності, збільшення точності позиціонування та оптимізацію циклового часу виробництва.

У межах цієї роботи буде розроблено маніпулятор ангулярного типу, оскільки саме така кінематична схема має низку важливих техніко-конструктивних переваг. Зокрема, обертальні кінематичні пари, що лежать в основі ангулярної конструкції, є відносно простими у виготовленні, легко реалізуються з використанням стандартних приводів і шарнірів, а також забезпечують компактність, надійність і економічність конструкції.

Ще однією істотною перевагою цієї конфігурації є велика зона обслуговування, що утворюється за рахунок комбінації декількох обертальних ланок. Така структура дозволяє ефективно працювати навіть в умовах обмеженого простору, оскільки гнучка кінематична побудова дає змогу обходити перешкоди складними просторовими траєкторіями, недоступними для маніпуляторів із поступальними переміщеннями.

Водночас реалізація системи керування для ангулярного маніпулятора є значно складнішою, ніж для пристроїв з декартовою схемою. Переміщення виконавчого органа у прямокутній системі координат вимагає координації обертальних рухів кожної з ланок, оскільки навіть незначне відхилення одного з кутів призводить до сумарної похибки положення кінцевого ефектора. Це обумовлює необхідність розв'язання обернених кінематичних задач з високою точністю та використання сучасних алгоритмів компенсації похибок, зокрема методів зворотного зв'язку за координатами, сенсорної корекції положення або адаптивного керування.

Отже, вибір ангулярної схеми маніпулятора є обґрунтованим з точки зору конструктивної простоти, функціональної гнучкості та ефективного використання простору, але вимагає глибокого опрацювання системи керування для забезпечення належної точності та надійності роботи.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3 Класифікація роботів маніпуляторів

Маніпулятори є ключовим компонентом у структурі сучасної робототехніки, становлячи близько 85–90% усіх роботизованих систем, що застосовуються у промисловості, науці, медицині та побуті [14]. Їх широке впровадження пояснюється здатністю виконувати широкий спектр операцій з високим рівнем точності, повторюваності та автономності. Класифікація маніпуляторів здійснюється за низкою ознак, які дозволяють детально систематизувати їхні функціональні, конструктивні та експлуатаційні характеристики.

Одним із провідних класифікаційних підходів є поділ за галуззю застосування. У керамічній промисловості маніпулятори використовуються для видавлювання сировини, подачі заготовок до крокетних машин, глазурування, шліфування після випалу та завантаження печей. У скляній галузі вони виконують завантаження/розвантаження термоформувальних машин. У швейному виробництві роботи подають матеріали до машин, забезпечуючи точне й швидке позиціонування. У деревообробці використовуються для складання виробів, нанесення лаку, встановлення кріплень. Вони також ефективно працюють у шкіряній, гумовій, азбестообробній та харчовій галузях, де виконують дії з оброблення, сортування, транспортування і контроль якості матеріалів та продукції.

За ступенем універсальності маніпулятори бувають:

- універсальними, здатними адаптуватися до різних типів устаткування та задач, часто з гнучким програмним середовищем;
- спеціалізованими, призначеними для виконання кількох обмежених функцій у межах вузького процесу;
- спеціальними, що виконують одну фіксовану операцію, як правило, з жорстко закріпленим інструментом.

За типом операцій розрізняють маніпулятори, які здійснюють основні технологічні функції, зокрема свердління, зварювання, монтаж або обробку, та ті, що виконують допоміжні дії — подачу, розвантаження, очищення, калібрування, або технічне обслуговування виробничого обладнання.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Кінематична класифікація передбачає поділ за формою робочої зони, що визначає геометрію досяжності інструмента. Розрізняють:

- прямокутну (декартову) — для точних лінійних переміщень;
- циліндричну — зі спільною вертикальною віссю обертання;
- сферичну (полярну) — з дугоподібними траєкторіями;
- ангулярну (шарнірну) — з високою гнучкістю руху;
- SCARA-систему — для горизонтального складання;
- комбіновану — для складних або спеціалізованих задач.

Конструкція маніпулятора також залежить від типу приводів: електроприводи (переважно у компактних і середніх системах), гідравлічні (для важких і силових дій), пневматичні (у швидкодіючих, але менш точних системах).

Важливим параметром є вантажопідйомність, яка класифікується так:

- надлегкі — до 1 кг (демонстраційні або навчальні моделі);
- легкі — 1–10 кг (для складання малих деталей);
- середні — 10–200 кг (широке виробниче використання);
- важкі — 200–1000 кг (автоматизовані лінії);
- надважкі — понад 1 т (обслуговування великогабаритного обладнання).

За кількістю маніпуляторних елементів (рук) розрізняють однорукі та багаторукі системи. Вони можуть бути стаціонарними, встановленими на фундамент або каркас, або мобільними — здатними переміщуватися по рейках, направляючих або самостійно пересуватися у просторі. За способом монтажу системи бувають підлоговими, підвісними або інтегрованими у технологічне обладнання.

Залежно від способу керування, маніпулятори поділяються на:

- програмовані (з фіксованим сценарієм дій);
- адаптивні (реагують на зміни середовища);
- інтелектуальні (використовують машинне навчання, обробку зображень та сенсорні системи).

Оцінка швидкодії виконується за лінійною швидкістю виконавчих органів:

- низька — до 0,5 м/с (для точних і безпечних переміщень);
- середня — 0,5–1 м/с (основна маса сучасних роботів);

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- висока — понад 1 м/с (високошвидкісні або пневматичні системи).

За точністю позиціонування маніпулятори поділяють на:

- низької точності — понад 1 мм;

- середньої точності — від 0,1 до 1 мм;

- високої точності — менше 0,1 мм (мікромеханіка, медицина).

Окремо розглядаються параметри технічного рівня, до яких належать: надійність (середній час безвідмовної роботи), кількість керованих ступенів свободи, зручність програмування, питома вантажопідйомність (відношення корисного навантаження до маси робота), вихідна потужність (продукт маси та швидкості переміщення), габаритні показники тощо. Ці характеристики дозволяють здійснювати порівняльну оцінку різних моделей маніпуляторів та обирати оптимальні варіанти для конкретних умов експлуатації.

Таким чином, класифікація маніпуляторів є невід'ємною частиною системного підходу до проєктування, вибору та впровадження роботизованих систем. Вона дозволяє враховувати специфіку задач, технологічні вимоги, експлуатаційні умови, а також перспективу масштабування або модернізації системи.

#### 1.4 Види електродвигунів, що використовуються в маніпуляторах

У роботизованих маніпуляторах приводи є одним з ключових елементів, що забезпечують обертальні або поступальні рухи ланок. Серед усіх типів приводів найпоширенішими є електричні двигуни, оскільки вони характеризуються високою точністю, зручною інтеграцією в системи керування, простотою обслуговування та відносно низькою вартістю. Залежно від вимог до швидкодії, моменту, точності позиціонування та умов експлуатації, у конструкції маніпуляторів можуть застосовуватись такі типи електродвигунів [15]:

##### 1. Колекторні двигуни постійного струму (DC-мотори).

Ці двигуни забезпечують просте та зручне регулювання швидкості шляхом зміни напруги живлення. Вони використовуються у малопотужних системах і навчальних роботах. Їх переваги — компактність, дешевизна, лінійна залежність

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкості від напруги. Основним недоліком є наявність щітково-колекторного вузла, який потребує періодичного обслуговування.

## 2. Безколекторні двигуни постійного струму (BLDC).

Безколекторні мотори мають високу надійність і довговічність завдяки відсутності механічного зносу щіток. Вони забезпечують високу точність керування швидкістю й позицією, тому широко використовуються в точних маніпуляторах, сервосистемах і дронах. Необхідність в електронному комутаторі (контролері) ускладнює конструкцію, але значно розширює функціональні можливості.

## 3. Крокові двигуни.

Ці двигуни реалізують обертання валу дискретними кроками, що дозволяє точно задавати положення без зворотного зв'язку (у відкритому контурі керування). Вони широко застосовуються в компактних системах, 3D-принтерах, настільних роботах і маніпуляторах з невисокими динамічними навантаженнями. Основні переваги — простота програмного керування та надійність. Недоліком є ризик втрати кроків під час перевантаження або вібрацій.

## 4. Сервоприводи (на базі DC або BLDC двигунів з енкодером).

Сервоприводи — це готові вузли, що містять двигун, датчик зворотного зв'язку та контролер. Вони забезпечують високу точність позиціонування, стабільність і можливість реалізації складних алгоритмів керування (PID, адаптивне, інтелектуальне). Такі приводи найчастіше застосовуються в промислових маніпуляторах, де потрібна висока надійність і повторюваність рухів.

## 5. Асинхронні двигуни змінного струму.

Асинхронні мотори використовуються в потужніших маніпуляторах, де важливими є енергоефективність, довговічність і низький рівень обслуговування. Для керування ними застосовуються частотні перетворювачі (інвертори), які дозволяють змінювати швидкість і напрямок обертання. Вони менш точні, ніж серводвигуни, але виграють за потужністю і ресурсом роботи.

## 6. Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM).

Ці двигуни поєднують високу енергоефективність, точність та швидкодію. Вони використовуються в роботах, де важливі компактність, висока потужність і

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керуваність. PMSM часто реалізуються у вигляді сервоприводів для векторного керування.

Залежно від рівня складності системи, технічних вимог до маніпулятора, а також умов експлуатації, вибір типу електродвигуна має значний вплив на точність, швидкодію, енергоефективність та ресурс роботи системи. У розроблюваному трьохступеневому маніпуляторі доцільним є застосування електричних сервоприводів на базі безколекторних двигунів, що забезпечують компактність, точність позиціонування і зручність реалізації керування за кутовими координатами.

### 1.5 Системи керування роботами маніпуляторами

Система керування є ключовою складовою будь-якого роботизованого маніпулятора, оскільки вона забезпечує точне, скоординоване та ефективне виконання заданих дій [16]. Саме від типу й реалізації системи керування залежать точність позиціонування, плавність руху, швидкодія та адаптивність маніпулятора до змін навколишнього середовища. Головне завдання системи керування полягає у формуванні команд, які приводять виконавчі механізми маніпулятора в рух, забезпечуючи при цьому переміщення робочого органу в задану точку простору з необхідною орієнтацією.

Системи керування класифікуються за кількома ознаками. За способом реалізації розрізняють програмне (автоматичне), ручне та напівавтоматичне керування. У програмному режимі робот виконує наперед задану послідовність команд без втручання оператора, що типово для серійного виробництва. Ручне керування використовується на етапах тестування, навчання або в ситуаціях, де потрібна гнучкість та пряма участь оператора. Напівавтоматичні системи поєднують автоматизовані процедури з можливістю ручного коригування, забезпечуючи більшу адаптивність.

За типом побудови системи розрізняють дискретні (позиційні), контурні (траєкторні), адаптивні та інтелектуальні системи керування. Позиційні системи дозволяють переміщувати маніпулятор від однієї координати до іншої без плавно-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

го слідування за контуром, що обмежує їх у складних задачах. Контурні системи забезпечують безперервне керування рухом по заданій траєкторії з можливістю інтерполяції або використання математичних моделей. Адаптивні системи здатні змінювати свої параметри залежно від навантаження чи зміни умов роботи, використовуючи дані від сенсорів. Інтелектуальні системи керування застосовують алгоритми штучного інтелекту, нейромережі, логіку нечітких множин та машинне навчання для прийняття рішень у складних ситуаціях, що потребують самонавчання або складної обробки даних.

За типом зворотного зв'язку системи бувають із відкритим та замкненим контуром. У відкритому контурі керування відсутній контроль поточного положення ланок, що знижує точність. У системах із замкненим контуром, навпаки, використовуються енкодери, датчики кута або положення, які дозволяють коригувати керувальні сигнали в реальному часі. Такі системи забезпечують високу точність і стабільність функціонування навіть при збуреннях або механічних похибках.

Також системи керування розділяються за ієрархічними рівнями. На нижньому рівні відбувається безпосереднє керування приводами та виконавчими органами. Середній рівень відповідає за реалізацію окремих операцій: позиціонування, захоплення, маніпулювання. Верхній рівень забезпечує логіку взаємодії маніпулятора із зовнішнім середовищем, планування траєкторії, взаємодію з іншими системами або оператором.

## 1.6 Програмне забезпечення для створення 3D-моделей роботів-маніпуляторів

У сучасному машинобудуванні та робототехніці використання програмного забезпечення для тривимірного (3D) моделювання є обов'язковим етапом при розробці конструкції маніпуляторів. Завдяки САД-системам (Computer-Aided Design) розробники мають можливість створити точну віртуальну модель майбутнього пристрою, виконати її кінематичний і динамічний аналіз, оцінити робо-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

чу зону, визначити точки навантаження і виявити потенційні колізії ще до етапу виготовлення.

Існує низка програмних продуктів, що забезпечують повний цикл інженерного проектування роботів-маніпуляторів — від побудови деталей до симуляції рухів та генерування технічної документації. Нижче наведено короткий опис найбільш поширених із них.

SolidWorks — одна з найпопулярніших професійних CAD-систем (рис.1.7) [17].

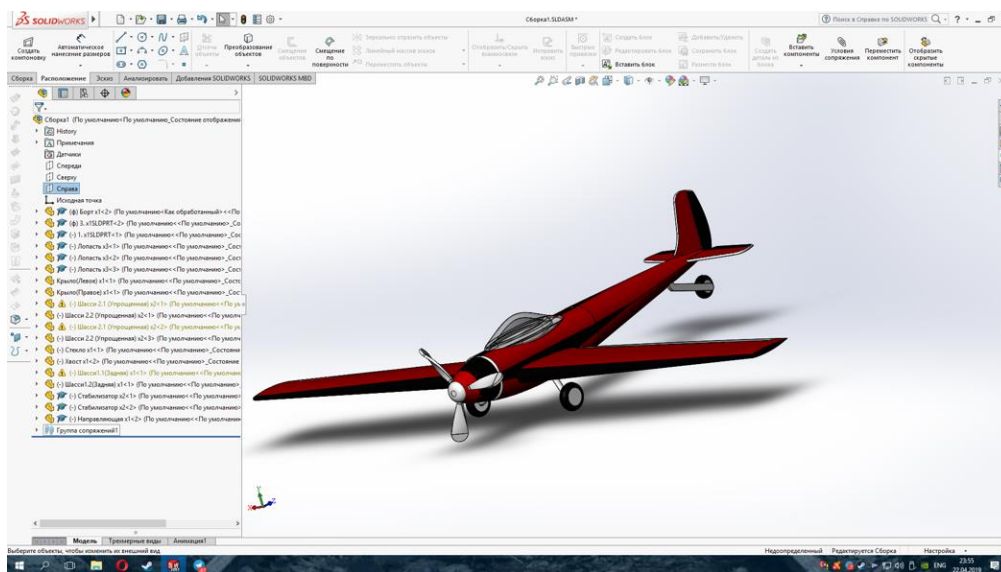


Рисунок 1.7 – Вікно програми SolidWorks

Забезпечує параметричне 3D-моделювання, створення складальних одиниць, анімацію механізмів і моделювання кінематики. Доступні модулі для аналізу міцності, перевірки зіткнень, візуалізації траєкторій руху. SolidWorks також має бібліотеки стандартних вузлів та інтеграцію з системами ЧПК, що спрощує підготовку до виробництва.

Autodesk Inventor — потужна інженерна платформа для проектування складних механізмів (рис.1.8) [18]. Підтримує параметричне та динамічне моделювання, обчислення навантажень, аналіз гнучких з'єднань і симуляцію руху в реальному часі. Широко використовується у промисловості для створення роботизованих систем, включаючи маніпулятори.

									Арк.
									27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

БРМА25.00.00.000 ПЗ

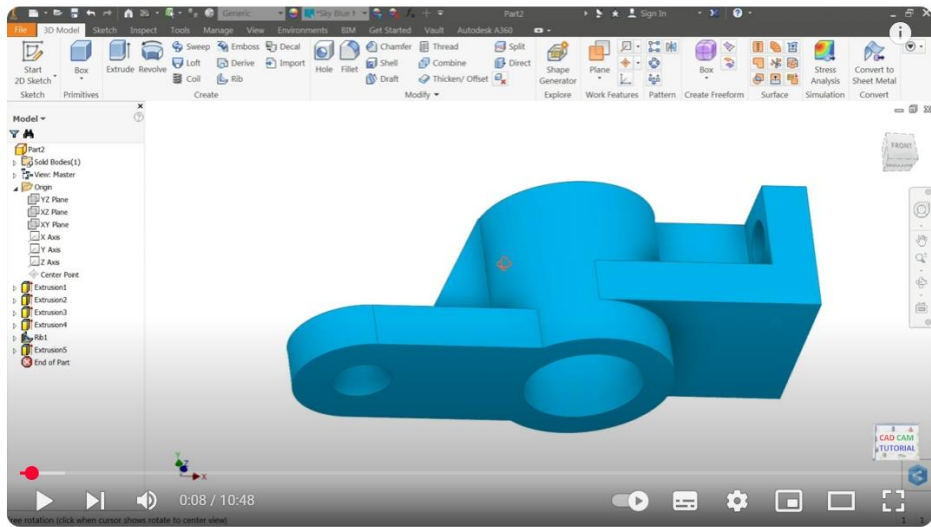


Рисунок 1.8 – Вікно програми Autodesk Inventor

Fusion 360 — хмарна CAD/CAE/CAM-система від Autodesk, яка об'єднує 3D-моделювання, моделювання руху, віртуальне тестування та виготовлення (рис.1.9) [19].

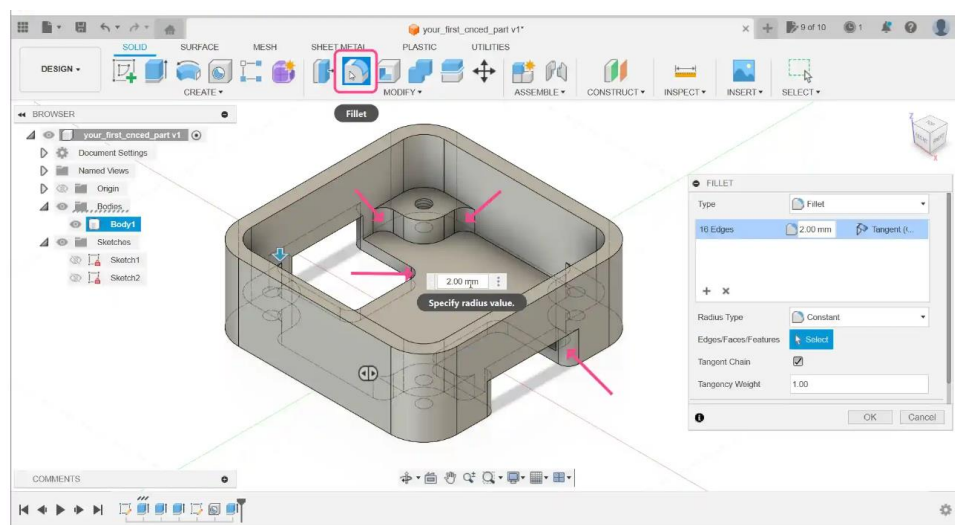


Рисунок 1.9 – Вікно програми Autodesk Fusion 360

Має зручний інтерфейс, хмарну синхронізацію та можливість спільної роботи над проектами. Fusion 360 особливо популярний серед інженерів-розробників і стартапів завдяки доступності і потужному функціоналу.

FreeCAD — безкоштовна програмна платформа з відкритим кодом (рис.1.10) [20]. Підтримує параметричне моделювання, має модулі для аналізу кінематики, побудови технічної документації, створення анімацій і тестування механізмів. Незважаючи на менш розвинений інтерфейс порівняно з комерційни-

									Арк.
									28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА25.00.00.000 ПЗ				

ми продуктами, FreeCAD активно використовується для навчальних і дослідницьких цілей.

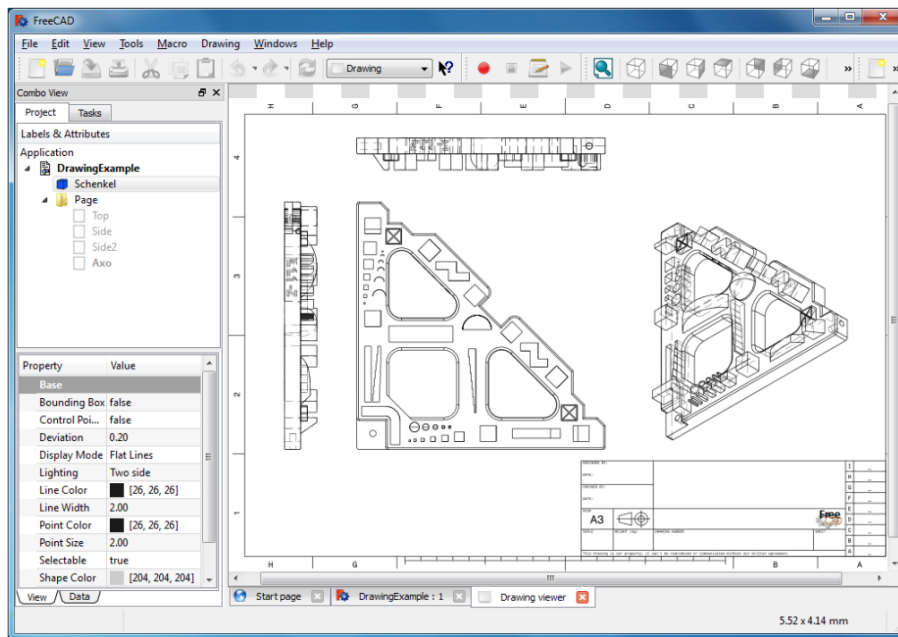


Рисунок 1.10 - Вікно програми FreeCAD

Onshape — сучасна хмарна CAD-система, яка працює в браузері та забезпечує повну функціональність без потреби встановлення (рис.1.11) [21]. Підтримує версіонування моделей, командну роботу в режимі реального часу та інтеграцію з інструментами симуляції руху. Підходить для колективної розробки складних роботизованих механізмів.

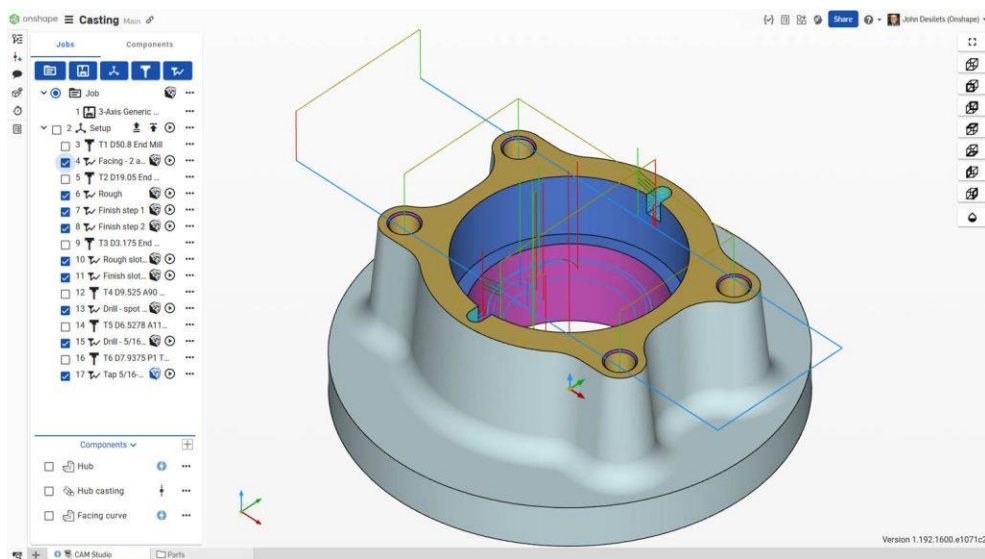


Рисунок 1.11 - Вікно програми Onshape

									Арк.
									29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Tinkercad — просте та інтуїтивно зрозуміле середовище для базового 3D-моделювання (рис.1.12) [22]. Орієнтоване переважно на початковий рівень користувачів. Забезпечує швидке створення базових геометричних форм, часто використовується для підготовки макетів до 3D-друку.

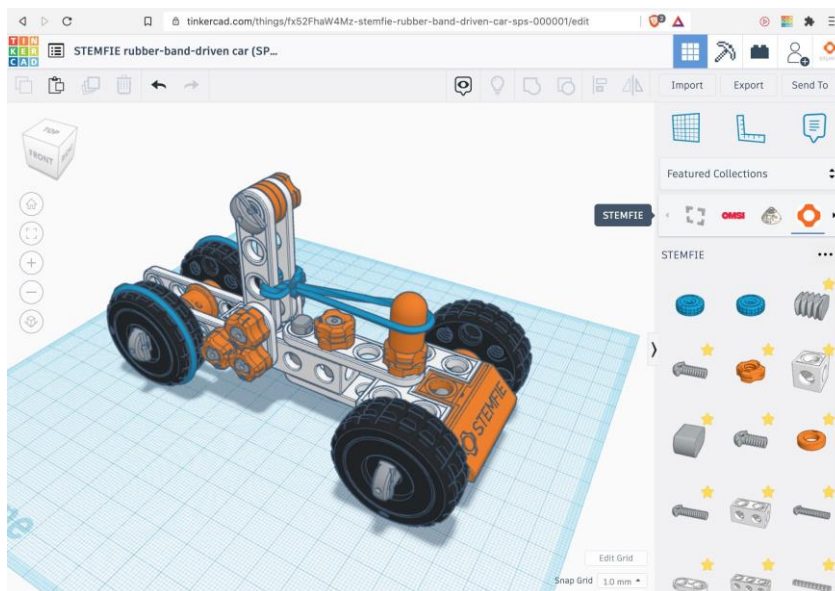


Рисунок 1.11 - Вікно програми Tinkercad

Кожне з наведених програмних рішень має свої переваги залежно від поставлених цілей: для точного інженерного проєктування з високою складністю найкраще підходять SolidWorks, Inventor або Fusion 360; для освітніх і дослідницьких цілей ефективними є FreeCAD чи Tinkercad; для розподіленої командної розробки — Onshape.

Використання сучасних CAD-систем дозволяє не лише підвищити ефективність конструювання маніпуляторів, але й забезпечити повноцінну інтеграцію в подальші етапи виробництва — від 3D-друку до управління рухами в реальному середовищі.

### 1.7 Приклади використання роботів маніпуляторів в промисловості

Роботи-маніпулятори відіграють ключову роль у модернізації виробничих процесів, забезпечуючи автоматизацію трудомістких, точних і небезпечних опе-

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30





Рисунок 1.13 - Промисловий робот для вирізання з металу

У електронній промисловості високоточні маніпулятори здійснюють встановлення мікрокомпонентів на друковані плати, наносять електропровідні доріжки, виконують контроль якості за допомогою камер машинного зору. Тут критично важливими є мікроскопічна точність, повторюваність та дотримання антистатичних вимог.

У харчовій та пакувальній промисловості роботи використовуються для дозування, сортування, укладання продукції, герметичного пакування, наклеювання етикеток (рис.1.14) [25]. Упровадження маніпуляторів дозволяє дотримуватись високих стандартів санітарії, мінімізуючи контакт людини з харчовими продуктами.

У фармацевтичному виробництві маніпулятори працюють у стерильних середовищах, виконують точне дозування рідин, переміщення ампул, герметизацію упаковок, а також сортування препаратів. Їх використання гарантує стерильність, високу точність і безпечність процесів.



Рисунок 1.14 – Промисловий робот для пакування продукції

У текстильній і легкій промисловості маніпулятори забезпечують подачу матеріалів на швейні або лазерні машини, автоматизоване сортування готової продукції, фіксацію або маркування текстилю. Вони здатні працювати з м'якими, гнучкими або легко деформованими матеріалами, що вимагає спеціалізованих хватних пристроїв (рис.1.15) [26].



Рисунок 1.15 – Роботи при виготовленні взуття

У будівельній індустрії роботи-маніпулятори використовуються для автоматизованого укладання цегли, нанесення клеїв, шпаклівок або ізоляційних матеріалів (рис.1.16) [27]. У системах 3D-будівництва деякі маніпулятори керують

екструдерами, які формують будівельні конструкції з полімерних або бетонних сумішей.



Рисунок 1.16 – Маніпулятори в будівельній справі

У хімічній та нафтопереробній галузі роботи застосовуються для маніпуляцій із реактивами, завантаження в резервуари, керування вентилями або обслуговування лабораторного обладнання в умовах потенційної вибухонебезпеки або токсичного середовища (рис.1.17) [28].



Рисунок 1.17 – Використання робота на підприємстві хімічної промисловості

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Загалом, використання роботів-маніпуляторів дозволяє підприємствам досягти високого рівня автоматизації, оптимізувати логістичні та виробничі процеси, скоротити витрати на оплату праці, а також забезпечити стабільну якість продукції. Широка адаптивність таких систем дає змогу оперативно перебудовувати виробничі лінії відповідно до змін номенклатури або обсягів замовлень.

### 1.8 Висновки до першого розділу

Проведений аналіз зроблений в першому розділі показав, що роботи-маніпулятори становлять основу сучасної промислової автоматизації, охоплюючи близько 85–90 % усіх роботизованих систем у світі. Вони класифікуються за низкою критеріїв: за функціональним призначенням, конструктивними ознаками, типом приводу, ступенем точності, швидкістю, способом керування та геометрією робочої зони. У результаті цього розмаїття конструкцій формується широкий спектр маніпуляторів, здатних адаптуватися до вимог різних виробничих середовищ.

Окрему увагу приділено ангулярним (шарнірним) маніпуляторам, які завдяки своїй гнучкості, великій зоні обслуговування та компактності конструкції демонструють високу ефективність в умовах складних траєкторій руху. Проте для точного керування такими системами потрібне складне координатно-кутове регулювання, що вимагає ретельного моделювання, точного обрахунку кутів кожної ланки та врахування сумарних похибок позиціонування.

У розділі також розглянуто найпоширеніші типи маніпуляторів за системами координат (декартові, сферичні, циліндричні, ангулярні, SCARA, Spine, маятникові) з наведенням прикладів їх застосування. Проаналізовано сфери використання маніпуляторів у промисловості — від автомобілебудування, електроніки та металургії до фармацевтичної, харчової й легкої промисловості. На прикладах показано, що інтеграція роботів у виробництво сприяє зменшенню ручної праці, підвищенню точності, якості та швидкості виконання технологічних операцій.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Крім того, проаналізовано програмне забезпечення, яке дозволяє здійснювати 3D-моделювання та віртуальне тестування роботизованих систем. Платформи типу SolidWorks, CATIA, Siemens NX, RoboDK, а також MATLAB/Simulink і ROS забезпечують широкий функціонал для конструювання, симуляції кінематики, оптимізації траєкторій та інтеграції з фізичними контролерами.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

## 2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТРЬОХОСЬОВОГО РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА

### 2.1 Розробка структурної кінематичної схеми робота маніпулятора

Було розроблено структурно кінематичну схему маніпулятора (рис. 2.1, аркуш [БРМА25.00.00.000С1]), яка слугує основою для подальшого тривимірного моделювання та розрахунків. У запропонованій конфігурації передбачено використання додаткових з'єднувальних ланок і шарнірних елементів, що формують паралельну структуру механізму. Такий підхід дає змогу реалізувати сталу орієнтацію виконавчого органу (схвата) в просторі під час переміщення його робочого центру по робочій зоні маніпулятора.

Особливістю даної кінематичної схеми є стабільне паралельне положення схвата відносно бази незалежно від значень кутів повороту окремих ланок (позначених як  $q_1$  і  $q_2$ ). Це досягається завдяки синхронному функціонуванню ланцюгів паралельного механізму, які забезпечують компенсацію зміщень, що виникають при зміні положення кожного з обертальних шарнірів. Така структура дозволяє суттєво спростити розв'язання зворотної кінематичної задачі та забезпечує більш точне і передбачуване позиціонування виконавчого органу, що є критично важливим у задачах маніпулювання.

Запропонована кінематична схема є базовим етапом подальшого створення 3D-моделі та її симуляційного тестування в CAD-середовищі з метою аналізу траєкторій руху, зусиль в ланках і потенційних похибок позиціонування.

На рисунку 2.2 зображено конфігурацію маніпулятора, що демонструє ключову особливість запропонованої кінематичної схеми: незалежно від зміни кутів повороту основних ланок, орієнтація виконавчого органу (схвата) залишається сталою — паралельною до базової горизонтальної площини. Така властивість є критично важливою у маніпуляційних задачах, пов'язаних із захопленням, транспортуванням та точним встановленням об'єктів, оскільки дозволяє зберігати вертикальну орієнтацію переміщуваного предмета протягом усього робочого циклу.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевага цієї кінематичної структури полягає в тому, що вона усуває необхідність у введенні додаткової, третьої керованої обертальної ланки, яка зазвичай відповідає за орієнтацію схвата відносно простору. Таким чином, відбувається спрощення структури системи керування, що знижує загальну складність програмного та апаратного забезпечення, мінімізує похибки синхронізації між приводами та підвищує надійність функціонування.

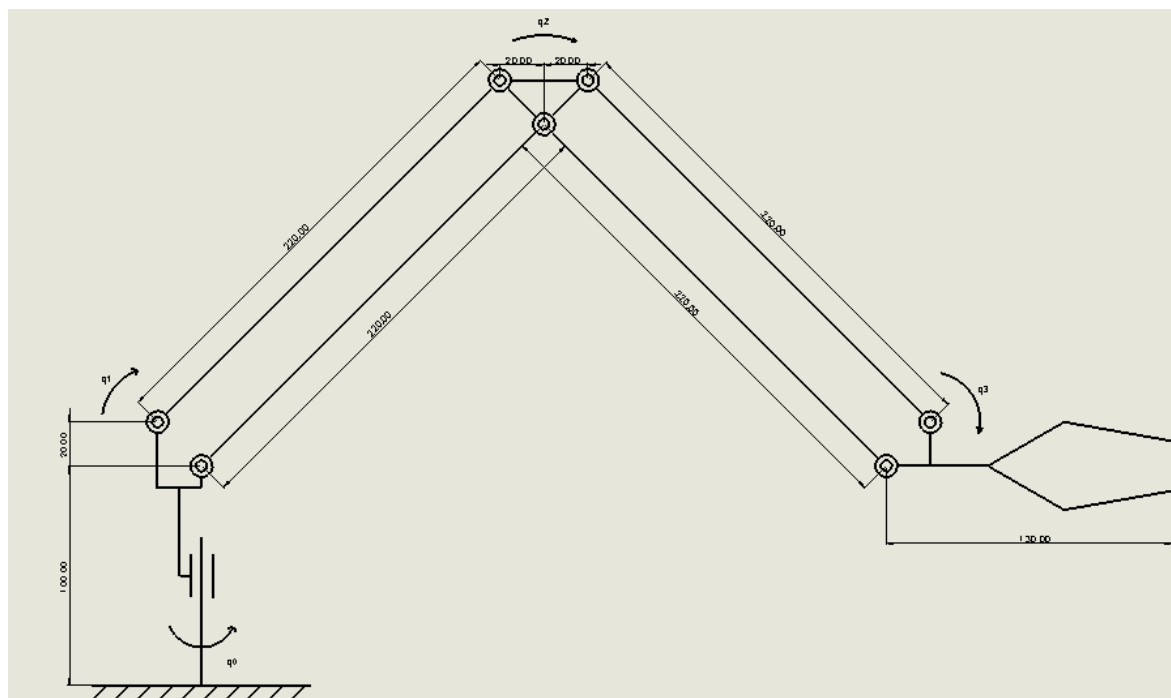


Рисунок 2.1 – Структурно кінематична схема маніпулятора

Незважаючи на наявність великої кількості пасивних шарнірних з'єднань і передавальних ланок, уся конструкція приводиться в дію лише трьома основними сервоприводами, які встановлені у вузлах обертання провідних ланок. Додатковий привід використовується виключно для керування захопленням (стисканням/розтисканням) схвата. Це рішення забезпечує оптимальне співвідношення між конструктивною складністю та функціональними можливостями маніпулятора, а також дозволяє зменшити габарити та масу рухомих частин.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

У цілому, така конструкція сприяє підвищенню точності позиціонування, зменшенню інерційного навантаження та забезпечує плавність рухів, що особливо важливо при роботі з крихкими або дрібними об'єктами.

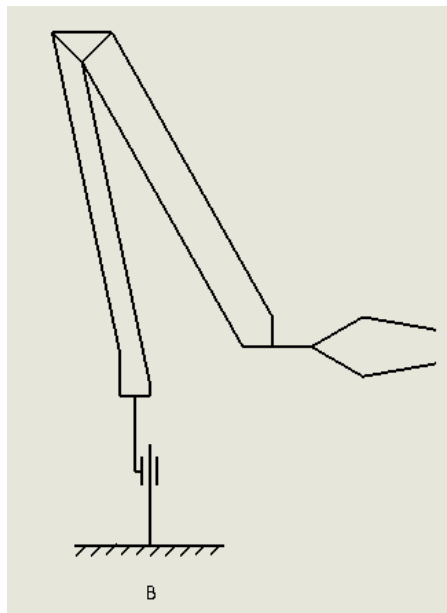
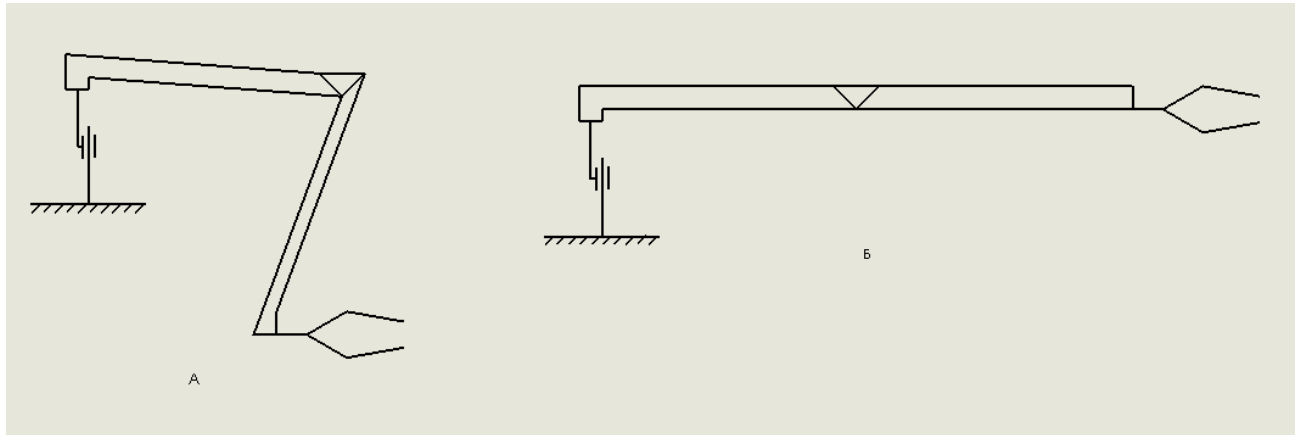


Рисунок 2.2 - Приклад роботи паралельного механізму і рухливості  
робота маніпулятора

## 2.2 Вибір програмного забезпечення для проєктування трьохосьового робота маніпулятора

Одним із ключових завдань при проєктуванні сучасних мехатронних систем, зокрема роботизованих маніпуляторів, є побудова точної тривимірної цифрової моделі. Така модель виконує не лише функцію візуалізації геометрії виробу,

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

але й слугує базою для перевірки кінематичних властивостей, узгодженості рухомих ланок, оцінки габаритної взаємодії між елементами та уникнення механічних конфліктів у процесі роботи. Для цього необхідне надійне та функціонально потужне програмне забезпечення системи автоматизованого проектування (CAD).

У даній роботі для створення 3D-моделі трьохосьового робота-маніпулятора було обрано програмне забезпечення SolidWorks, яке визнане світовим стандартом у сфері конструкторського проектування [17]. Цей програмний продукт розроблений компанією Dassault Systèmes і широко використовується в машинобудуванні, приладобудуванні, електроніці, біомедичній інженерії та автоматизації виробництва.

Серед ключових переваг SolidWorks слід відзначити можливість параметричного моделювання деталей і складальних одиниць, що дозволяє гнучко змінювати конструкцію за допомогою зміни вихідних геометричних або розрахункових параметрів. Крім того, програмне середовище забезпечує повну підтримку моделювання складальних з'єднань, шарнірних пар, напрямних і обмежень, що особливо актуально для механізмів з декількома ступенями свободи.

SolidWorks дозволяє автоматизовано створювати асемблеї зі складних конструкцій, встановлювати кінематичні зв'язки між компонентами, виявляти колізії у русі, визначати зони досяжності та аналізувати робочі конфігурації пристрою. Значною перевагою також є вбудовані засоби генерації технічної документації, включаючи повноцінні робочі креслення, специфікації, розміри, допуски та інші елементи, необхідні для подальшого виготовлення деталей на виробництві.

Варто зауважити, що SolidWorks підтримує експорт файлів у численні формати для САМ-систем і 3D-друку (наприклад, STL, STEP, IGES), що спрощує інтеграцію у виробничі процеси або створення фізичних прототипів. Додатково програмне забезпечення надає інструменти для оцінки масо-інерційних характеристик моделі, що важливо при балансуванні ланок та виборі приводів.

Таким чином, вибір SolidWorks як основного інструменту проектування у межах цієї роботи забезпечує точне, гнучке та технологічно сумісне середовище для створення 3D-моделі трьохосьового маніпулятора. Це сприяє підвищенню

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якості конструкції, пришвидшує процес технічної підготовки проєкту та дозволяє перейти до наступного етапу — реалізації та випробування фізичного зразка.

## 2.3 Проєктування ланок трьохосьового робота маніпулятора

### 2.3.1 Проєктування 1-ї і 2-ї ланок

Сервоприводи моделі DF15RMG, які будуть використанні в електричній частині робота вже оснащені стандартними монтажними кронштейнами заводського виконання, що значно спрощує їхню інтеграцію в конструкцію трьохосьового маніпулятора (рис.2.3) [29]. Ці кронштейни мають уніфіковану геометрію з фіксованим розташуванням монтажних отворів, що забезпечує стандартизований підхід до з'єднання з іншими деталями конструкції. Усі монтажні отвори мають певний діаметр, міжцентрову відстань і орієнтацію в просторі, що дозволяє точно визначити положення сервоприводу відносно об'єктної бази під час проєктування.

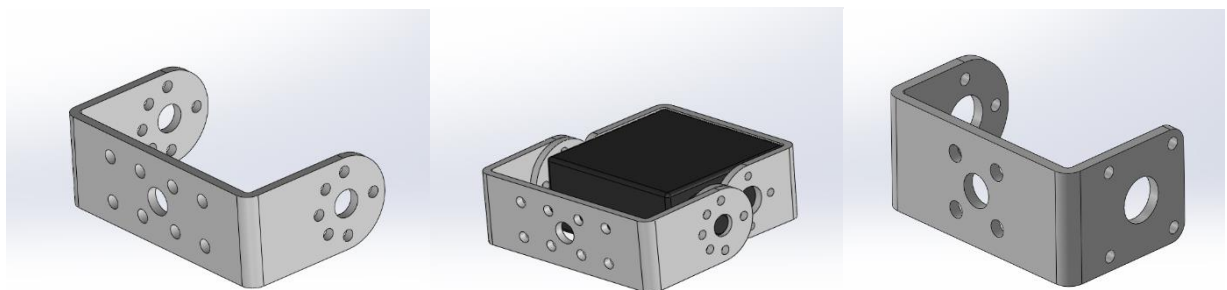


Рисунок 2.3 - 3D модель сервоприводу DF15RMG і його кронштейнів

На етапі проєктування ланок маніпулятора було передбачено конструкцію монтажних отворів, повністю ідентичних до отворів кронштейнів сервоприводів за всіма основними параметрами — діаметром, кількістю, симетрією та міжосьовою відстанню [30, 31]. Такий підхід забезпечив можливість надійного та точного з'єднання за допомогою стандартних кріпильних елементів — болтів або гвинтів з

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

метричною різьбою. Це дозволило досягти точного суміщення осей обертання та забезпечити оптимальну передачу крутного моменту без люфтів і деформацій.

Особливу увагу було приділено забезпеченню високої жорсткості та стабільності з'єднання, що є критично важливими для надійної роботи маніпулятора. Враховуючи характер дії змінних динамічних навантажень у процесі функціонування, навіть незначні відхилення у положенні або кріпленні могли б призвести до зниження точності позиціонування, появи вібрацій, несиметричного навантаження на підшипники або передчасного зношення приводів.

Під час моделювання також було дотримано допусків на виготовлення монтажних отворів — як за діаметром, так і за площинністю контактної поверхні, що запобігло можливим перекосам при збиранні. Завдяки цьому було усунуто ризики деформації корпусу сервопривода при затягуванні кріплень, що унеможливило виникнення похибок у побудові траєкторії руху кінцевого виконавчого органу.

Таким чином, точне відтворення геометрії стандартних кронштейнів у конструкції ланок дало змогу не лише забезпечити зручність і точність монтажу, а й зберегти цілісність кінематичної схеми маніпулятора, гарантувати надійність передачі моменту і стабільність його динамічної роботи.

У процесі проєктування було враховано, що сервоприводи моделі DF15RMG, встановлені разом із металевою рейкою, утворюють цілісну конструктивну ланку маніпулятора, яка є невід'ємною частиною його кінематичної структури (рис. 2.4). Згідно з проєктними вимогами, загальна довжина цієї ланки мала становити 220 мм, що є критично важливим параметром для збереження правильної геометрії механізму та забезпечення високої точності переміщення виконавчого органу.

Для досягнення необхідної довжини було проведено точні вимірювання габаритних розмірів сервоприводів, зокрема висоти корпусу, відстані від осі вала до монтажної площини та ширини з урахуванням кріплення. На основі цих даних було розраховано залишкову довжину рейки, яка доповнила конструкцію до заданого розміру. Також було спроектовано монтажні отвори в рейці з урахуванням

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

просторового розташування та міжосьових відстаней, відповідних отворам на кронштейнах сервоприводів.

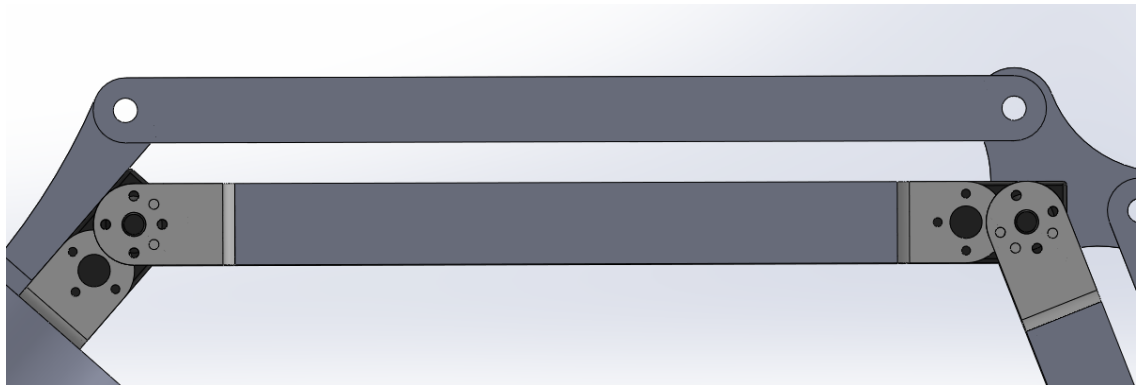


Рисунок 2.4 - Модель 1-ї ланки

Під час моделювання особливу увагу було приділено уникненню геометричних перекосів, які могли б призвести до зниження точності позиціонування або механічного заклинювання вузлів. Правильне визначення довжини рейки забезпечило узгодженість кінематичної схеми, плавну й синхронну роботу ланок, а також стабільну передачу зусилля між ними без люфтів чи паразитних деформацій.

Таким чином, завдяки точним розрахункам і врахуванню конструктивних особливостей сервоприводів, було реалізовано надійну геометричну відповідність, що гарантує правильну роботу механізму та відповідність усім функціональним вимогам.

Рейка, використана при проектуванні другої ланки маніпулятора, конструктивно є ідентичною до тієї, що застосовувалася в першій ланці. Це рішення ґрунтується на принципі уніфікації елементів, який дозволяє суттєво спростити виробництво, зменшити номенклатуру деталей і забезпечити взаємозамінність компонентів у випадку ремонту чи модернізації. Уніфіковані вузли також полегшують складання та скорочують витрати часу на виготовлення.

Однак при проектуванні другої ланки було виявлено необхідність точного дотримання заданої геометричної довжини – 220 мм, що визначає положення кінцевого виконавчого органу відносно осі обертання сервоприводу. Враховуючи

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмеження, зумовлені габаритами стандартного кронштейна, було прийнято рішення застосувати модифікований варіант кронштейна, який забезпечує зміщення точки кріплення схвата на необхідну відстань.

Таким чином, друга ланка має комбіновану конструкцію, яка включає три основні елементи: сервопривід, уніфіковану металеву рейку та спеціально адаптоване кріплення для встановлення схвата. Взаємна компоновка цих елементів дозволила з високою точністю досягти проєктної довжини ланки без порушення узгодженості кінематичної структури. Особливу увагу під час моделювання було приділено точному розташуванню отворів і з'єднувальних площин, щоб уникнути перекосів, які могли б спричинити похибки у траєкторії руху.

На рисунку 2.5 представлено деталізовану геометричну модель другої ланки маніпулятора, де чітко візуалізовано пропорції між компонентами та контроль дотримання заданої міжосьової відстані. Такий підхід до проєктування дозволяє забезпечити не лише точне позиціонування кінцевого елемента, але й синхронну, узгоджену роботу всієї конструкції маніпулятора в межах заданої кінематичної моделі. Крім того, збереження жорсткості і геометричної відповідності у вузлах сприяє зниженню вібрацій та підвищенню точності позиціонування під час динамічних режимів експлуатації.

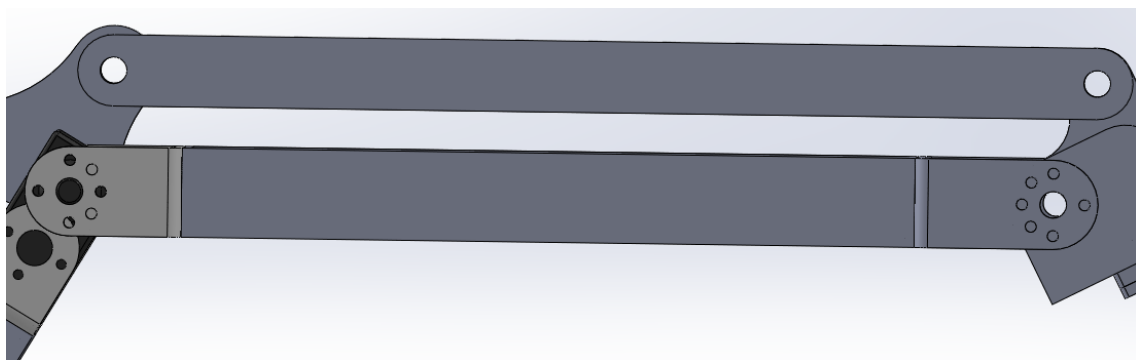


Рисунок 2.5 - Модель 2 - ї ланки

У результаті проведених розрахунків і моделювання було виготовлено рейку для другої ланки маніпулятора довжиною 164 мм (рис. 2.6). Така довжина була обрана з урахуванням конструктивних розмірів встановлених сервоприводів і

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

адаптованого кріплення схвата, що дозволило точно дотриматися загальної проектної довжини ланки — 220 мм. Рейка виготовлена з алюмінієвого профілю з попередньо обробленими монтажними отворами, що забезпечує її надійне з'єднання з іншими елементами конструкції та збереження геометричної точності кінематичного механізму.

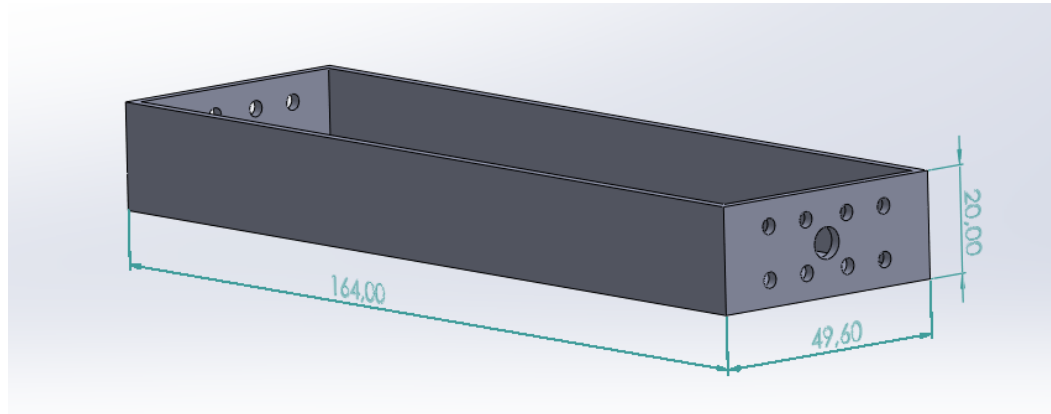


Рисунок 2.6 - Тривимірний вид рейки

Ланки, що застосовуються у паралельному механізмі маніпулятора, були виготовлені однакової довжини — по 220 мм кожна (рис. 2.7). Такий підхід дозволив реалізувати симетричну кінематичну структуру, в якій обидві ланки мають ідентичні геометричні параметри, що значно спрощує процес проектування, зменшує кількість варіантів монтажу і виключає ймовірність помилок під час збирання.

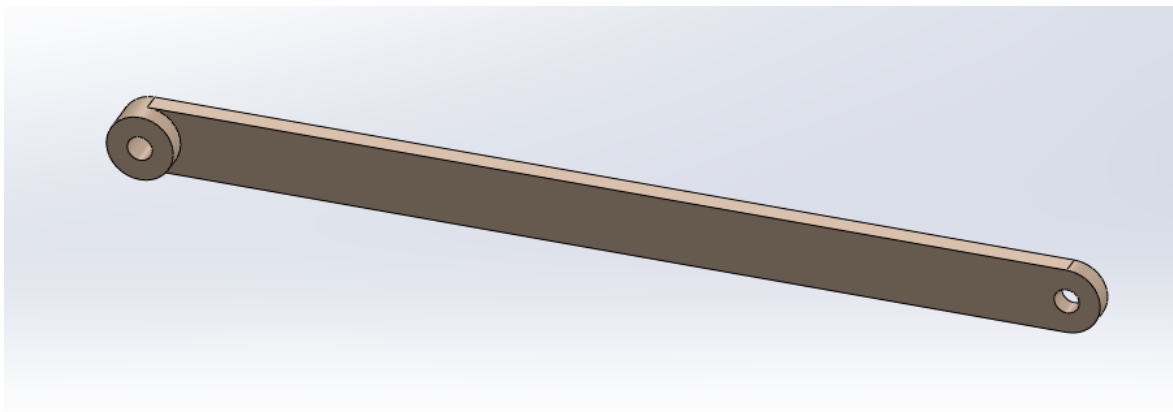


Рисунок 2.7 - Ланка паралельного механізму

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Уніфікація ланок дозволила скоротити номенклатуру виготовлюваних деталей, знизити витрати на обробку й зберігання компонентів, а також спростила розрахунки при побудові комп'ютерної моделі маніпулятора. Крім того, за рахунок використання однакових елементів було забезпечено рівномірний розподіл маси й навантаження в системі, що позитивно вплинуло на динаміку руху, точність позиціонування й загальну стійкість механізму.

У разі необхідності обслуговування або заміни, уніфіковані ланки дають змогу швидко відновити працездатність системи без потреби в індивідуальному виготовленні нових деталей, що особливо важливо для технічного супроводу конструкції в умовах дослідної або серійної експлуатації.

На рисунку 2.8 представлено модель деталі, яка утворює три шарнірних з'єднання та виконує функцію центральної ланки в конструкції паралельного механізму маніпулятора. Цей компонент має ключове значення для забезпечення коректної роботи всієї кінематичної структури, оскільки саме через нього здійснюється зв'язок між приводною ланкою (валом сервоприводу другої ланки) та двома симетричними допоміжними ланками, які формують паралельну геометрію системи.

Конструктивно ця ланка виконує одразу декілька функцій: слугує опорною платформою для з'єднання трьох рухомих елементів, передає обертальний момент від сервоприводу до кінцевого виконавчого механізму, а також забезпечує синхронність руху всіх шарнірів у рамках заданої кінематичної схеми. Завдяки наявності трьох точно розташованих отворів під вісь обертання, елемент гарантує збереження паралельності та орієнтації кінцевої ланки маніпулятора незалежно від кутових положень привідних ланок.

Для стабільної роботи системи ця деталь була виготовлена з міцного матеріалу з підвищеними характеристиками жорсткості та мінімальними допусками на виготовлення. Високоточна обробка посадкових отворів забезпечує співвісність шарнірних з'єднань, знижує ризик люфтів або перекосів і дозволяє точно відтворити задану траєкторію руху виконавчого органу. Таким чином, ця центральна ланка паралельного механізму не лише об'єднує основні вузли, але й

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

виступає гарантом надійної, плавної та точної роботи всього маніпулятора в умовах змінних навантажень.

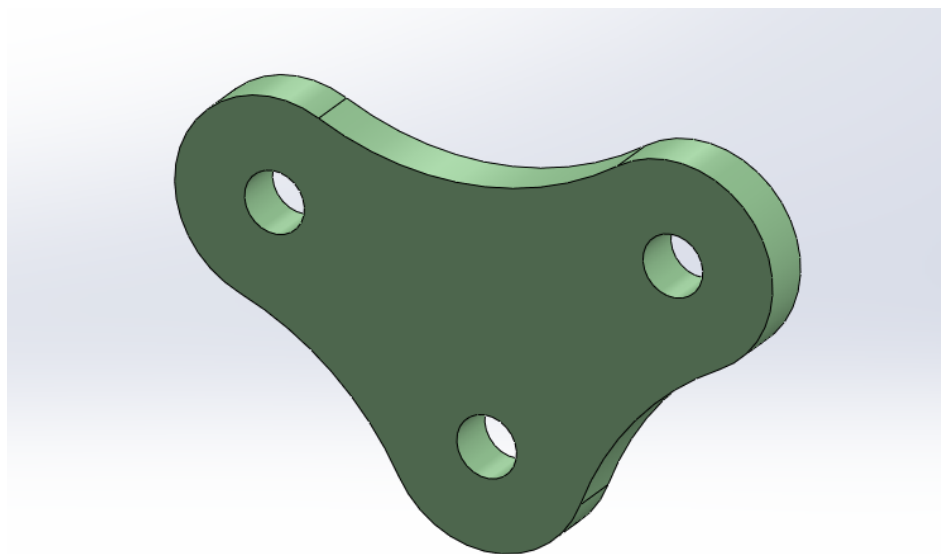


Рисунок 2.8 - Центральна деталь паралельного механізму

#### 2.4 Проектування основи робота маніпулятора

Основа маніпулятора виконує ключову роль у забезпеченні механічної стабільності всієї конструкції, оскільки сприймає сумарне навантаження від маси робочих ланок, сервоприводів, схвата, а також динамічні сили, що виникають під час роботи пристрою. Особливу увагу під час проектування було приділено забезпеченню стійкості до перекидання, вібрацій та деформацій, що можуть призвести до втрати точності позиціонування або виходу з ладу окремих вузлів [29, 30].

З конструктивної точки зору, основа має циліндричну форму, яка була обрана як найбільш доцільна для реалізації поворотного ступеня свободи навколо вертикальної осі. У середині основи передбачено монтаж серводвигуна SR430, який виконує функцію приводу обертання першої ланки маніпулятора. Цей сервопривід встановлюється вертикально, з розташуванням валу по центру циліндричної порожнини, що забезпечує компактність компоновки та зручність підведення електроживлення. Кріплення SR430 реалізується через стандартний монтажний фланець, для якого у внутрішній частині корпусу основи передбачено

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

відповідні отвори. Зовнішній корпус сервоприводу щільно посаджено в посадкове гніздо, що забезпечує жорстку фіксацію та виключає люфти під навантаженням.

На верхній площині основи реалізовано вузол кріплення для першої ланки маніпулятора. Положення ланки фіксується за допомогою кронштейна, який жорстко приєднується до фланця SR430, дозволяючи передавати обертальний момент від приводу безпосередньо на ланку. Для забезпечення сумісності було точно витримано розташування отворів і осьову симетрію, що показано на рис. 2.9 (аркуш [БРМА25.01.00.000В3]). Таке конструктивне рішення гарантує узгоджене обертання першої ланки відносно основи та збереження точності просторового положення всієї кінематичної схеми.

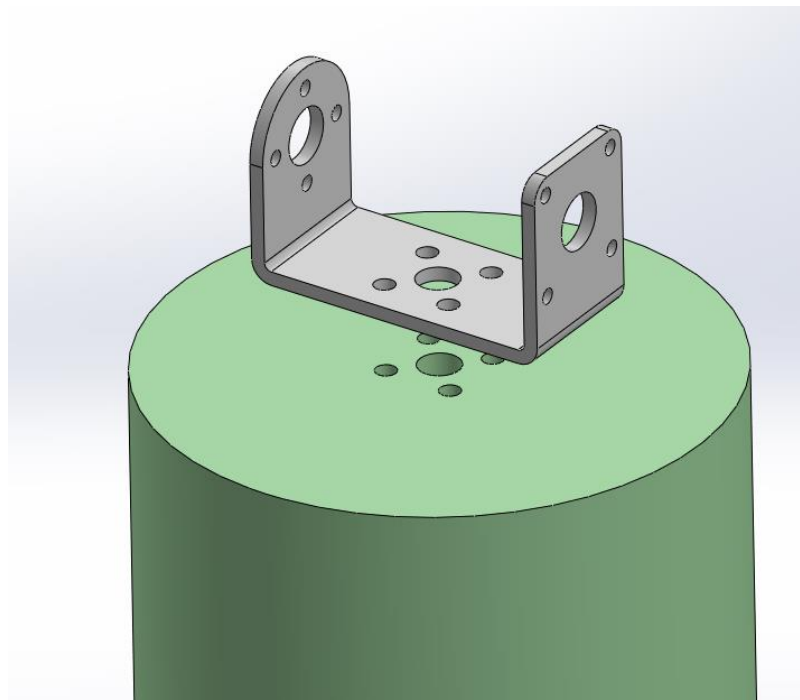


Рисунок 2.9 - Кріплення кронштейну серводвигуна до основи

Крім того, в нижній частині основи реалізовано систему жорсткого кріплення до горизонтальної опори за допомогою чотирьох наскрізних отворів під гвинтове з'єднання. Завдяки цьому забезпечується стійке положення всієї конструкції навіть при великих навантаженнях або швидких переміщеннях. Таким чином, основа є не лише опорним, але й функціонально активним елементом

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

маніпулятора, що забезпечує точну передачу зусиль, правильну геометрію кінематичного ланцюга і надійну роботу системи в цілому.

Всередині конструкції основи передбачено спеціально розроблену систему кріплень, призначену для точного, надійного та жорсткого встановлення сервоприводу SR430, який відповідає за реалізацію обертального руху першої ланки маніпулятора навколо вертикальної осі. Всі монтажні елементи та посадкові поверхні було спроектовано з урахуванням геометрії корпусу приводу, конфігурації його фланця, розміщення монтажних отворів, а також допустимих навантажень, що виникають у процесі експлуатації.

Особливу увагу було приділено точності розташування центру вала сервоприводу — його геометрична вісь співпадає з віссю симетрії циліндричної основи. Таке центрування є критично важливим для уникнення осьового зміщення, яке могло б призвести до динамічного дисбалансу при обертанні. Навіть незначне відхилення осі вала від центру викликає асиметричний розподіл навантажень, що спричиняє нерівномірний знос опорних підшипників, підвищення вібрацій і, як наслідок, зниження точності позиціонування кінцевого виконавчого органа. Завдяки центральному розміщенню забезпечується рівномірний розподіл зусиль у місцях кріплення, що підвищує загальну жорсткість з'єднання та знижує ризик утворення деформацій або мікротріщин при тривалому використанні.

Конструкція кріплень виконана таким чином, щоб забезпечити максимально щільну та стійку посадку сервоприводу у корпус основи. Застосовані технологічні допуски дозволяють уникнути люфтів і зсувів, а також гарантують точне суміщення монтажних отворів, що значно спрощує складання вузла. Завдяки цим технічним рішенням забезпечується передача крутного моменту без паразитних втрат, зменшується накопичення люфтів у кінематичному ланцюгу та забезпечується висока точність відтворення рухів при багатократних циклах.

Додатковою перевагою проєктного рішення є модульність вузла — зручність монтажу, демонтажу та технічного обслуговування приводу в умовах обмеженого доступу або під час регламентних робіт. Це значно підвищує ремонтпридатність системи та скорочує час сервісного обслуговування.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

У результаті, така конструкція забезпечує комплексну механічну надійність та функціональну ефективність всієї обертальної частини маніпулятора, створюючи стабільну базу для точного та довготривалого функціонування. На рис. 2.10 зображено відповідну реалізацію монтажу сервоприводу SR430 всередині основи, де чітко видно його симетричне положення, кріпильні елементи та конфігурацію посадкової зони.

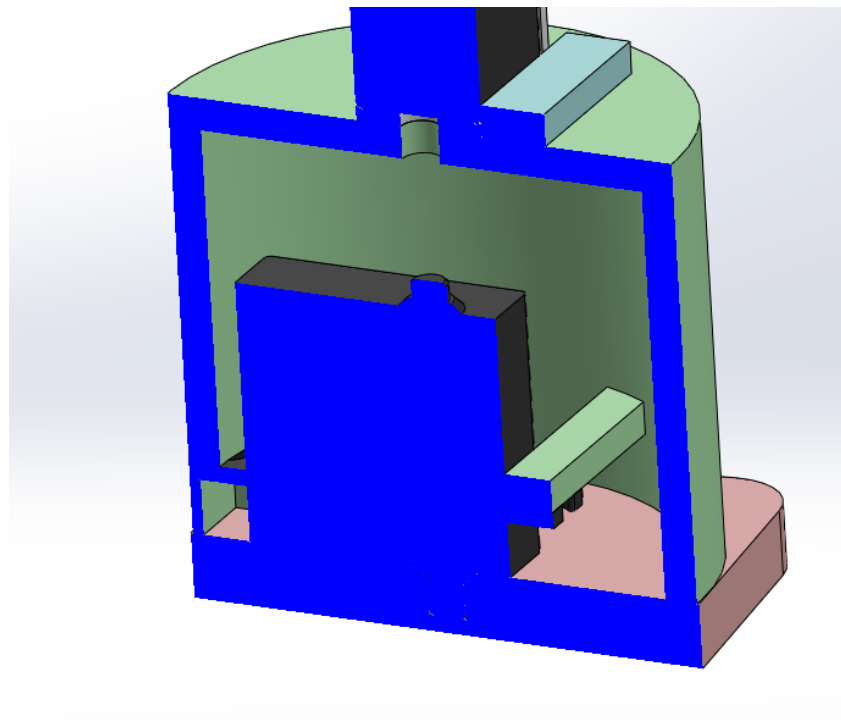


Рисунок 2.10 - Основа маніпултра у розрізі

Основа маніпулятора, зображена на рис.2.11, виконує функцію головної опорно-несучої деталі всієї конструкції. Вона реалізована у вигляді горизонтальної плоскої платформи, яка забезпечує стійкість, жорсткість і правильне просторове розташування всіх вузлів і механізмів маніпулятора. Важливою конструктивною особливістю цієї основи є наявність центрального отвору, що точно співпадає з віссю симетрії платформи. Отвір спроектований з урахуванням габаритних і монтажних параметрів сервоприводу та призначений для його встановлення всередині корпусу основи.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Співвісність валу сервоприводу та центральної осі платформи має принципове значення. Завдяки цьому забезпечується геометрична симетрія всієї системи, а також стабільне та рівномірне обертання маніпулятора навколо вертикальної осі без паразитних вібрацій або осьових зміщень. Будь-яке відхилення від центру призводить до дисбалансу, який, у свою чергу, може спричинити додаткові навантаження на підшипникові вузли, знижувати точність позиціонування виконавчого органу та призводити до передчасного зносу елементів кінематичної системи.

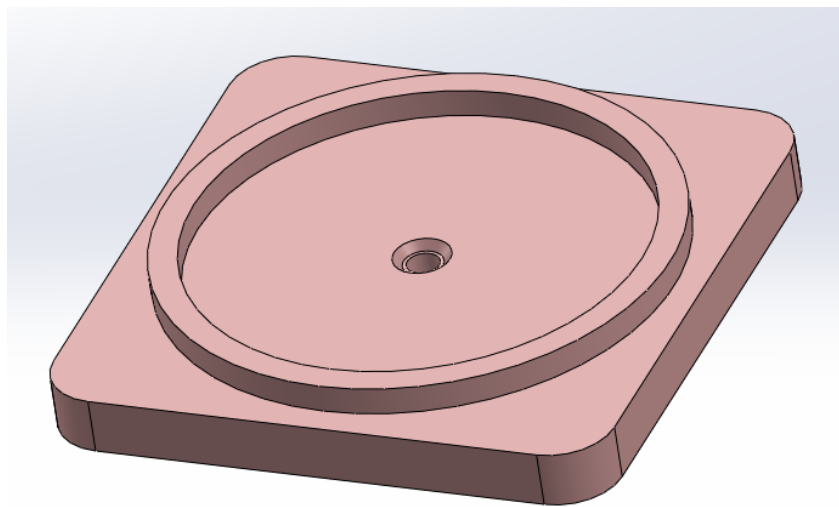


Рисунок 2.11 - Основа для обертання

По периметру платформи передбачено спеціальний підвищений бортик, який виконує низку важливих функцій. По-перше, він підсилює жорсткість з'єднання між основою та механічною частиною маніпулятора, забезпечуючи міцну фіксацію навіть у режимах динамічного навантаження. По-друге, бортик виконує функцію механічного обмежувача — він не дозволяє конструкції зміщуватися чи повертатися поза заданими межами, що критично важливо для підтримання точного положення в умовах циклічної або імпульсної роботи приводу. Це дає змогу зберігати правильну геометрію кінематичного ланцюга і гарантує точне виконання команд системи керування.

Плоска форма основи обрана не випадково: вона забезпечує велику опорну площу, що сприяє рівномірному розподілу навантажень і значно зменшує

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

ймовірність перекидання маніпулятора, особливо під час переміщення об'єктів з нерівномірною масою або при різких змінах напрямку руху. Таке рішення є надзвичайно ефективним для підвищення загальної стійкості конструкції без необхідності в зовнішніх противагах або додаткових опорах.

Конструкція основи також забезпечує зручність монтажу, завдяки симетричній формі та простій геометрії кріплень. Усі кріпильні отвори виконано з високою точністю та відповідно до стандартів, що спрощує інтеграцію з іншими вузлами й мінімізує помилки під час складання. Враховуючи ці фактори, основа маніпулятора виконує не лише опорну функцію, а й є ключовим компонентом у структурі кінематичного ланцюга, забезпечуючи точну взаємодію з сервоприводом, а також стабільність і плавність обертальних рухів всієї системи.

Таким чином, платформа, на якій базується маніпулятор, об'єднує в собі механічну міцність, кінематичну точність і функціональну ефективність, що дозволяє забезпечити довготривалу й безвідмовну роботу пристрою в умовах автоматизованого виробництва, лабораторних стендів або дослідницьких платформ, де кожна похибка у позиціонуванні може вплинути на результат процесу.

## 2.5. Розробка конструкції схвата

Модель схвата спроектовано на основі класичної конструкції двопальцевого захоплювача, яка є однією з найбільш поширених і ефективних у сфері робототехніки [30-32]. Такий тип механізму забезпечує надійне та симетричне захоплення об'єктів різної форми і розмірів, завдяки чому він активно застосовується в маніпуляційних системах, орієнтованих на автоматизацію захоплення, переміщення та встановлення предметів.

У конструкції захоплювача передбачено шість рухомих деталей, які формують механічну групу з паралельною кінематикою. Ці елементи жорстко або шарнірно з'єднуються між собою, утворюючи дві симетричні гілки, що забезпечують синхронне відкривання та закривання пальців. Кожна рухома деталь має власну функцію у трансмісії зусилля від сервоприводу до кінцевих виконавчих

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

елементів. Зокрема, до складу механізму входять тяги, шарніри та важелі, які передають обертальний рух у поступальний або навпаки, в залежності від конфігурації та напрямку дії приводу.

Основа захоплювача виконує роль корпусного елемента, до якого закріплюються всі інші компоненти. Вона забезпечує необхідну жорсткість системи та точність взаємного розташування рухомих частин. Крім того, в основі передбачені монтажні отвори для кріплення захоплювача до кінцевої ланки маніпулятора. Саме ця взаємодія є критичною для забезпечення точності позиціонування схвата у тривимірному просторі.

На рис. 2.9 (аркуш [БРМА25.02.00.000В3]) представлено схематичну 3D-модель двопальцевого схвата, де наочно зображено основні складові його конструкції та кінематичні зв'язки між рухомими деталями. Завдяки компактному та модульному виконанню, цей механізм легко інтегрується до конструкції маніпулятора та забезпечує високу повторюваність захоплення, що є особливо важливим у завданнях типу pick-and-place.

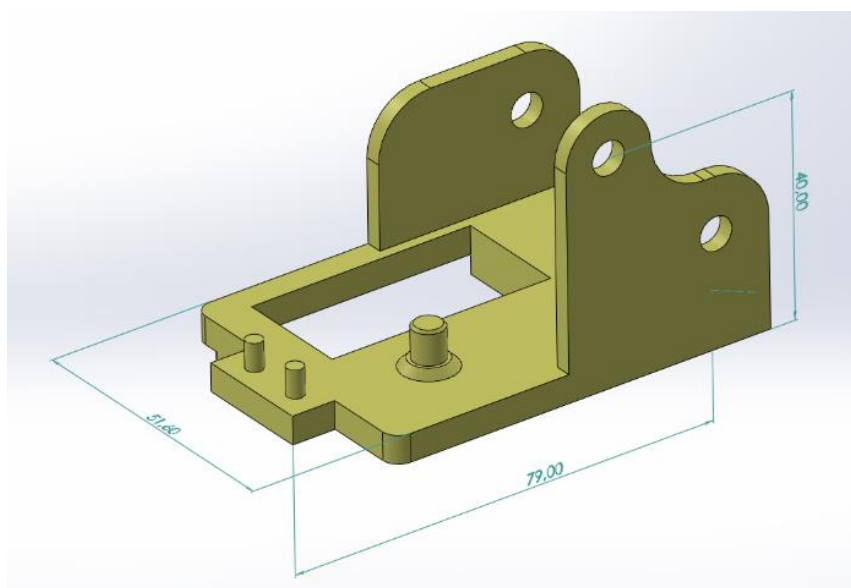


Рисунок 2.12 - Модель основи схвату

Розташування рухомих деталей, а також їхня геометрична конфігурація були збережені відповідно до перевіреної стандартної схеми двопальцевого захоплювача. Такий підхід дозволяє забезпечити високу надійність і функціональність механізму за умов повторюваних циклів роботи. Усі деталі схвата спроектовано з

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

урахуванням оптимальної кінематики, що гарантує синхронне та рівномірне переміщення обох пальців, зберігаючи паралельність їхніх робочих поверхонь під час захоплення об'єктів різних розмірів і форми.

Згідно з конструктивним рішенням, усі рухомі елементи, представлені на рис. 2.13, з'єднуються між собою за допомогою болтів із метричною різьбою діаметром 3 мм. Такий діаметр кріплення було обрано як компроміс між забезпеченням достатньої жорсткості з'єднань і збереженням компактних розмірів механізму. Крім того, різьбові з'єднання діаметром 3 мм забезпечують можливість багаторазового демонтажу без пошкодження елементів, що важливо під час експлуатації, обслуговування або модифікації конструкції.

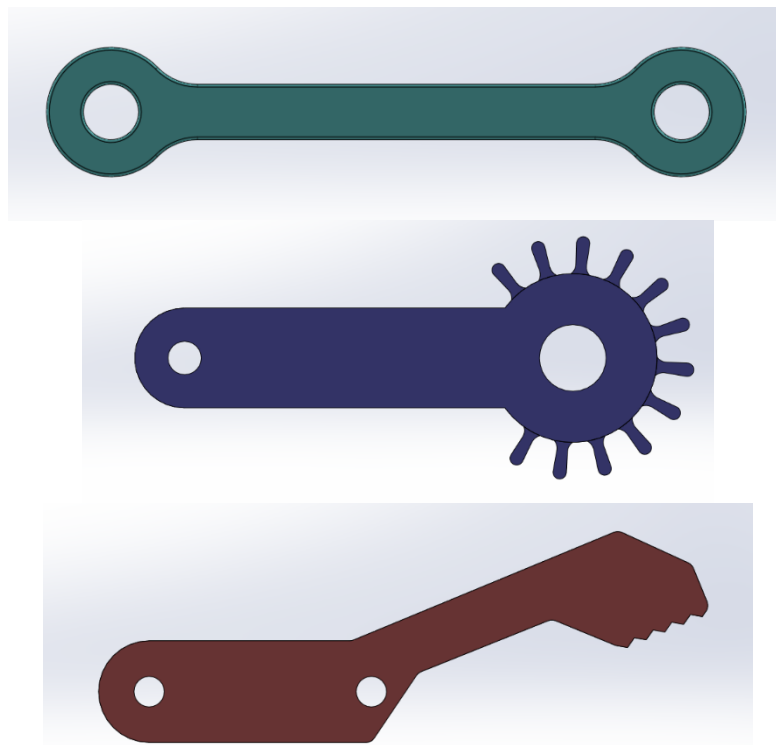


Рисунок 2.13 - Парні рухомі деталі схвата

Особливу роль у механізмі відіграє деталь із вбудованими зубчастими елементами, яка виконує функцію трансмісії крутного моменту від вала сервоприводу до важелів пальців. Для встановлення цієї деталі на вал приводу передбачено отвір збільшеного діаметра — 6 мм, який точно відповідає діаметру вала сервоприводу. Це дозволяє здійснити жорстке та співвісне з'єднання без необхідності у

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

додаткових втулках або адаптерах, що значно знижує люфт у кінематичному ланцюгу, підвищує точність реакції на сигнали керування та зменшує втрати енергії при передачі руху.

Завдяки такому конструктивному рішенню забезпечується висока точність позиціонування захоплювача в момент замикання пальців, що є особливо критичним при роботі з малогабаритними або крихкими предметами. Крім того, мінімізація кількості проміжних елементів не лише покращує кінематичну відповідність, але й спрощує процес збирання і підвищує загальну надійність конструкції, що важливо для безперервної роботи в умовах промислового або навчального середовища.

На рисунку 2.14 (аркуш [БРМА25.00.00.000ДІ]) представлено 3D-моделі зібраного схвата з різних положень у складі з сервоприводом моделі SR430.

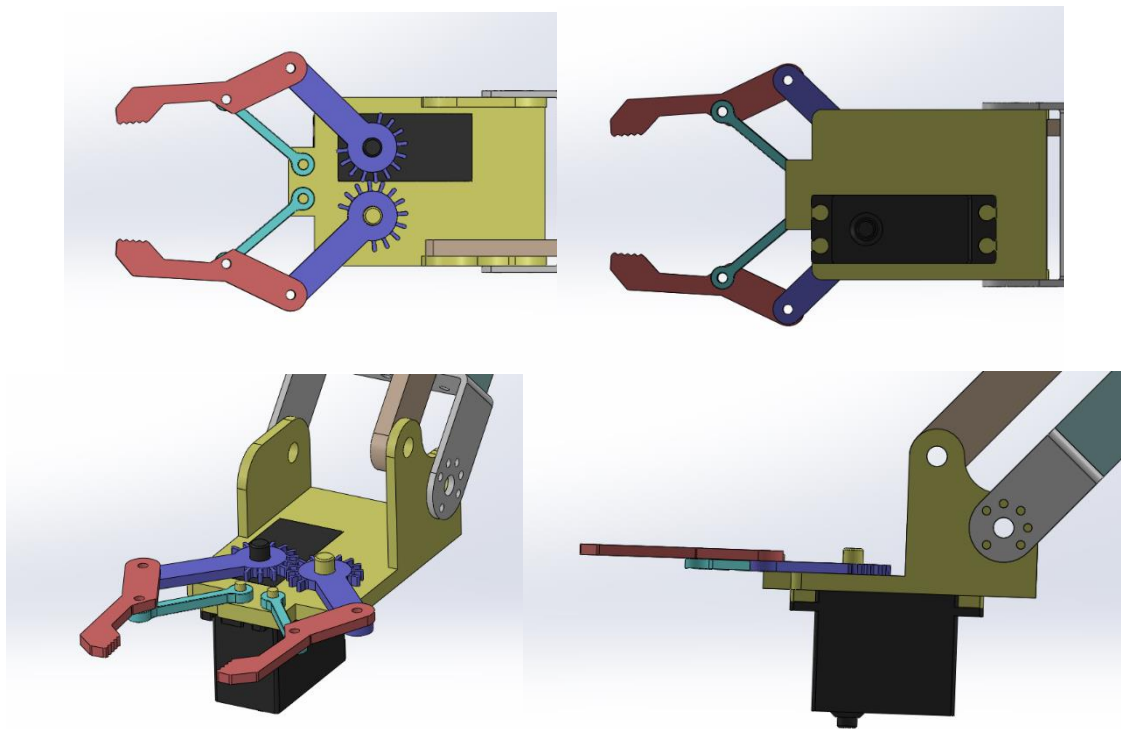


Рисунок 2.11 - Зображення моделі схвата з різних ракурсів

Варто детально зосередитися на тому, що довжина схвата є динамічною величиною, яка безпосередньо залежить від кута розкриття його пальців, і цей параметр відіграє ключову роль у забезпеченні точності та надійності функціонування маніпулятора. Саме ця залежність визначає здатність виконавчого органу

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

адаптуватися до різних розмірів об'єктів, які необхідно захопити, утримати чи перемістити. При цьому навіть незначне відхилення кута розкриття може впливати на геометричні параметри всієї захоплювальної частини, що, у свою чергу, вимагає коригування положення всього маніпулятора для збереження точності взаємодії з об'єктом.

На рисунку 2.13 наведено приклад емпіричних вимірювань, які ілюструють зміну довжини схвата при різних кутах його розкриття.

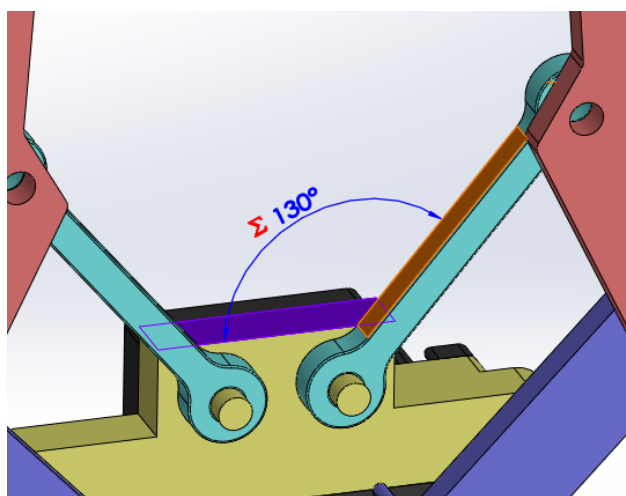


Рисунок 2.12 - Кут між основою схвату і направляючої ланки механізму схвату

Для забезпечення об'єктивності та повторюваності результатів, базовою площиною відліку було обрано горизонтальну основу схвата, а сам кут визначався між нею та однією з направляючих ланок, які безпосередньо відповідають за відкриття й закриття пальців (див. рис.2.12). Такий підхід до вимірювання забезпечує високу точність визначення геометричних змін, що виникають при функціонуванні механізму, і дозволяє проводити подальший кінематичний аналіз конструкції.

Зібрані значення були систематизовані у таблиці 2.1, яка наочно демонструє взаємозв'язок між кутом розкриття та довжиною схвата. Зокрема, чітко простежується нелінійна залежність цих параметрів, яка має бути врахована при розробці алгоритмів керування, особливо в тих випадках, коли захоплення відбувається з

високою частотою або за змінних умов. Також така таблиця є необхідною базою для створення математичної моделі схвата або використання інтерполяційних функцій у ПЗ для точного визначення робочого положення у реальному часі.

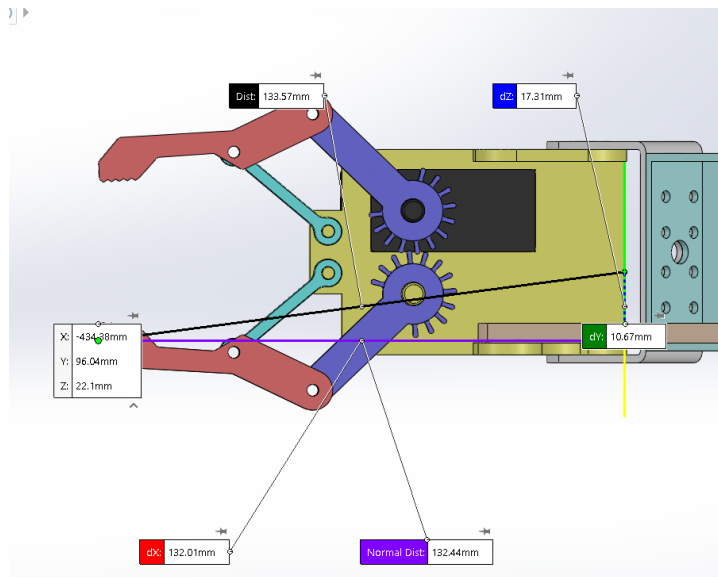


Рисунок 2.13 - Приклад вимірювань у програмі SOLIDWORKS

Таблиця 2.1 – Значення

Кут розкриття	Ширина захвату	Довжина захвату
100°	0	138,8
150°	35,2	132,5
180°	58,5	108,5

Урахування зміни довжини схвата залежно від кута розкриття дозволяє розробникам оптимізувати траєкторії руху маніпулятора, виключити перевищення допустимих навантажень на пальці, забезпечити стабільність захоплення навіть при роботі з об'єктами нестандартної форми або делікатними матеріалами. Це особливо актуально в галузях, де важлива висока повторюваність, точність та

адаптивність, зокрема в електроніці, біомедицині, мікромеханіці або автоматизованих системах контролю якості.

Таким чином, виконані вимірювання, побудова таблиці та їх аналіз є невід'ємною частиною процесу проектування, які формують фундамент для побудови ефективної, адаптивної та стабільної системи керування роботизованим захоплювальним пристроєм.

## 2.6 Розробка моделі робота-маніпулятора

Після завершення етапу створення цифрових моделей усіх складових елементів конструкції маніпулятора було виконано збірку повної тривимірної моделі в програмному середовищі CAD, яка ілюструє кінцевий вигляд змонтованого пристрою (рис. 2.8, аркуш [БРМА25.00.00.000ВЗ]). Збірка здійснювалася з урахуванням реального положення отворів, площин стику, осей обертання та конструктивних зазорів, що забезпечило максимально точне відтворення взаємного розміщення деталей у робочому стані.

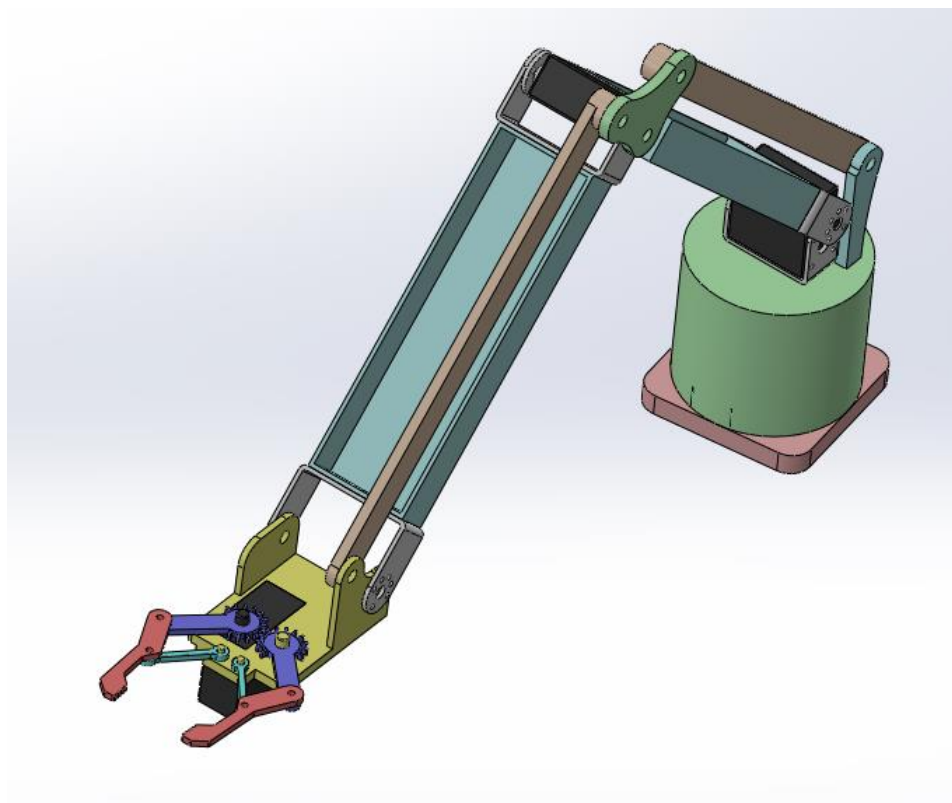


Рис. 2.8 Повна модель маніпулятора

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Для оптимізації візуального сприйняття та полегшення виявлення меж між складовими, кожному компоненту було призначено індивідуальне забарвлення. Це стосується як функціональних ланок (основи, рейок, поворотних елементів), так і кріпильних вузлів, сервоприводів, деталей паралельного механізму та схвата. Такий підхід значно покращує читабельність моделі, дозволяє швидко ідентифікувати конструктивні елементи, а також слугує ефективним інструментом для аналізу структури та конфігурації механізму в межах його кінематичного ланцюга.

Отримане зображення повністю відображає логіку побудови тривісного маніпулятора, зокрема – послідовність з'єднання компонентів, орієнтацію осей обертання, співвідношення довжин ланок, положення приводів, а також використання паралельного механізму, який забезпечує сталу орієнтацію схвата в просторі. Видима геометрія з'єднань дозволяє візуально оцінити правильність суміщення деталей, відсутність колізій та коректність функціонального розподілу навантажень між вузлами.

Окрім представлення зовнішнього вигляду, така модель виконує функцію віртуального прототипу, який є обов'язковим етапом перед виготовленням фізичної конструкції. Завдяки 3D-збірці стало можливим перевірити сумісність посадкових поверхонь, точність монтажних отворів, положення елементів керування та відсутність перешкод у траєкторії руху. Крім того, модель може використовуватися як основа для подальшої симуляції, розрахунків механіки, створення технічної документації або виведення специфікацій деталей у автоматизованому режимі.

Таким чином, створення інтегрованої тривимірної моделі дозволило не лише візуалізувати готовий виріб, але й значно знизити ризики проектування, забезпечити високу точність збірки та підтвердити функціональну придатність конструкції до реального виготовлення.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

## 2.7 Висновки до другого розділу

В другому розділі було здійснено поетапне проектування трьохосового маніпулятора ангулярного типу з урахуванням особливостей його кінематичної схеми, конструкції та вимог до точності і стабільності роботи. Розроблено структурну схему пристрою, яка передбачає використання паралельного механізму для утримання схвата в постійно горизонтальному положенні незалежно від положення ланок. Така кінематична конфігурація дозволяє забезпечити точне позиціонування кінцевого виконавчого органу без потреби в додаткових приводах орієнтації.

Були спроектовані і змодельовані всі основні елементи маніпулятора — основа, ланки, з'єднувальні елементи, центральна ланка паралельного механізму, а також двопальцевий схват з механізмом передачі руху. Під час проектування окрема увага приділялася точності розміщення отворів для кріплення сервоприводів (типу SR430 і DF15RMG), що забезпечило правильне передавання крутного моменту та мінімізацію люфтів. Усі критичні вузли було виконано з урахуванням вимог до симетрії, співвісності й жорсткості.

Створена 3D-модель у середовищі SolidWorks дала змогу перевірити відповідність геометричних параметрів, оцінити кінематичну послідовність і виявити потенційні конфлікти в конструкції до виготовлення. Також були враховані особливості довжин рейок, взаєморозташування ланок, монтаж сервоприводів і кріплення схвата. Змодельована конструкція підтвердила працездатність і доцільність обраного рішення, забезпечуючи плавну і точну координацію рухів при мінімізації механічних втрат.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

## 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ТРЬОХО-СЬОВОГО РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА

### 3.1 Теоретичні основи

Пряма задача кінематики є однією з ключових теоретичних і прикладних задач у сфері робототехніки, оскільки вона визначає основу для подальшого аналізу, керування та програмування роботизованих маніпуляторів [8, 33-35]. Її суть полягає у визначенні просторового положення та орієнтації кінцевого виконавчого органа (ефектора) у глобальній базовій координатній системі на основі відомих параметрів приводів — зазвичай це кути обертання для обертових кінематичних пар або лінійні переміщення для поступальних. Тобто, знаючи конфігураційні координати суглобів, можна визначити, де у фізичному просторі перебуває інструмент, захват або сенсор, закріплений на кінці маніпулятора.

Вирішення прямої задачі кінематики дає змогу сформувати математичну модель системи в декартовому (робочому) просторі, що є необхідною умовою для розрахунку траєкторій, оцінки досяжності робочої зони, симуляції рухів та проведення візуалізації. У роботах із трьома і більше ступенями свободи ця задача потребує використання методів формального математичного опису, серед яких найпоширенішим є метод Денавіта–Хартенберга (ДН-параметри), що дозволяє систематизовано побудувати матриці однорідних перетворень між координатними системами, прив'язаними до кожної ланки маніпулятора. Матриці трансформацій об'єднуються у єдину матрицю повного перетворення, що описує кінцеве положення ефектора щодо бази.

З інженерної точки зору, пряма кінематика лежить в основі побудови алгоритмів керування маніпулятором. Наприклад, під час автономної роботи або взаємодії з оператором система повинна інтерпретувати керуючі сигнали, що відповідають положенню суглобів, і перетворити їх у координати у просторі, які можна використовувати для контролю шляху, уникнення перешкод та синхронізації з іншими елементами автоматизованого середовища. Без цього

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

етапу неможливо побудувати ефективне зворотне кінематичне моделювання, яке навпаки дозволяє обчислити конфігураційні координати суглобів за заданим положенням ефектора.

У програмному забезпеченні для моделювання роботизованих систем (MATLAB Robotics Toolbox, ROS MoveIt!, V-REP, CoppeliaSim, Gazebo, SolidWorks Motion тощо) пряма кінематика використовується для візуалізації, перевірки коректності конструкції, симуляції поведінки механізму в реальному часі та забезпечення реалістичного відтворення динаміки рухів. Наприклад, вона дозволяє в реальному часі відображати положення маніпулятора на екрані або перевірити, чи досягається певна цільова точка без порушення кінематичних обмежень.

Крім практичного значення, пряма кінематика має і глибоке наукове підґрунтя. Вона є основою для аналізу ізотропності маніпулятора, сингулярних конфігурацій (станів, у яких система втрачає керованість), а також визначення зон досяжності, де ефектор може працювати з заданою точністю. Дослідження у сфері кінематичної редундантності (надлишкових ступенів свободи) також базуються на прямих кінематичних перетвореннях. У задачах оптимізації й автоматичного синтезу конструкцій пряма кінематика слугує ключовим компонентом об'єктивної функції, а в системах штучного інтелекту — навчальною основою для побудови моделей руху, що вчать на прикладах.

Таким чином, пряма задача кінематики виступає фундаментальним елементом у всьому ланцюжку життєвого циклу роботизованого маніпулятора — від його математичного опису та комп'ютерного моделювання до реального керування та вдосконалення конструкції. Її коректне формулювання й реалізація є критично важливими для створення надійних, точних та ефективних автоматизованих систем. Тому вивчення прямої кінематики має центральне місце у навчальних програмах інженерів-мехатроніків, робототехніків, автоматників і фахівців з кіберфізичних систем.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

### 3.2 Розрахунок положень ланок робота маніпулятора з використанням прямої задачі кінематик

На рис.3.1 наведено схему робота маніпулятора з позначеннями.

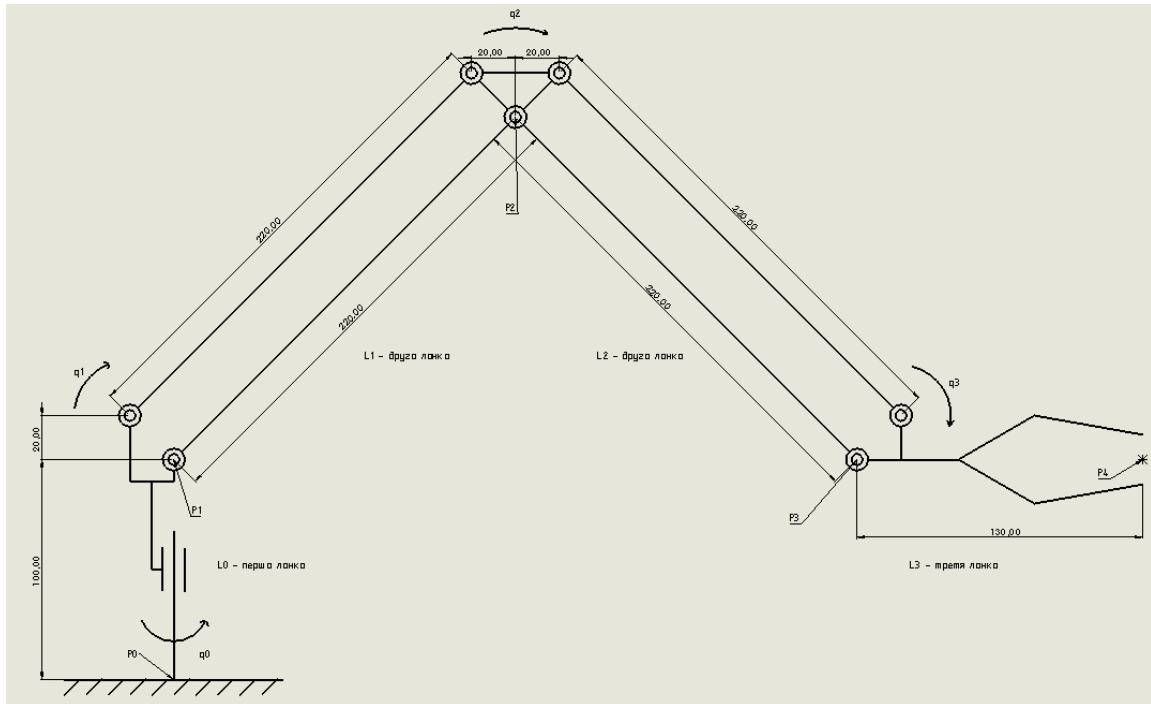


Рис. 3.1 Схема робота маніпулятора з позначеннями

Розроблена схема (рис.3.1) показує основні кути, ланки і точки трьохступеневого маніпулятора.

У даній схемі:

- $q_0, q_1, q_2$  - кути повороту;
- $L_0, L_1, L_2, L_3$  - довжини ланок;
- $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4$  - точки положення ланок.

Рішення прямої задачі [8].

Задаємо кути у радіанах і відстані:

$$q_0 = 60 \frac{\pi}{180} = 1,047,$$

$$q_1 = 20 \frac{\pi}{180} = 0,349,$$

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

$$q_2 = 40 \frac{\pi}{180} = 0,698,$$

$$q_3 = -(q_1 + q_2) = -1,047. \quad (2.1)$$

Задаємо довжину ланок, мм:

$$L_0 = 100, L_1 = 220, L_2 = 220, L_3 = 130.$$

Матриці переносу:

$$AL_0 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$AL_1 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$AL_2 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$AL_3 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Матриці повороту [8]:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

$$Aq0 := \begin{pmatrix} \cos(q0) & -\sin(q0) & 0 & 0 \\ \sin(q0) & \cos(q0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$Aq1 := \begin{pmatrix} \cos(q1) & 0 & \sin(q1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q1) & 0 & \cos(q1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$Aq2 := \begin{pmatrix} \cos(q2) & 0 & \sin(q2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q2) & 0 & \cos(q2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$Aq3 := \begin{pmatrix} \cos(q3) & 0 & \sin(q3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q3) & 0 & \cos(q3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Розрахунок матриць положення точок:

$$A0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A1 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.99983 & -0.01827 & 0 & 0 \\ 0.01827 & 0.99983 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 100 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.99983 & -0.01827 & 0 & 0 \\ 0.01827 & 0.99983 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 100 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A2 := \begin{pmatrix} 0.99983 & -0.01827 & 0 & 0 \\ 0.01827 & 0.99983 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 100 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.99998 & 0 & 0.00609 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.00609 & 0 & 0.99998 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 220 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.99981 & -0.01827 & 0.00608 & 1.3376 \\ 0.01826 & 0.99983 & 0.00011 & 0.0242 \\ -0.00609 & 0 & 0.99998 & 319.9956 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A3 := \begin{pmatrix} 0.99981 & -0.01827 & 0.00608 & 1.3376 \\ 0.01826 & 0.99983 & 0.00011 & 0.0242 \\ -0.00609 & 0 & 0.99998 & 319.9956 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\cdot \begin{pmatrix} 0.99992 & 0 & 0.01218 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.01218 & 0 & 0.99992 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 220 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.99965 & -0.01827 & 0.01825 & 221.26191 \\ 0.01825 & 0.99983 & 0.00033 & 4.04078 \\ -0.01826 & 0 & 0.99982 & 315.97636 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A4 := \begin{pmatrix} 0.99965 & -0.01827 & 0.01825 & 221.26191 \\ 0.01825 & 0.99983 & 0.00033 & 4.04078 \\ -0.01826 & 0 & 0.99982 & 315.97636 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\cdot \begin{pmatrix} 0.99983 & 0 & -0.01827 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.01827 & 0 & 0.99983 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 130 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.999811 & -0.01827 & -0.00002 & 351.23721 \\ 0.01825 & 0.99983 & -0.000003 & 6.41328 \\ 0.00001 & 0 & 0.99998 & 315.97766 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A1 = A0 \cdot Aq0 \cdot AL0,$$

$$A2 = A1 \cdot Aq1 \cdot AL1,$$

$$A3 = A2 \cdot Aq2 \cdot AL2,$$

$$A4 = A3 \cdot Aq3 \cdot AL3.$$

Координати точок маніпулятора [8]:

$$X := \begin{pmatrix} A0_{0,3} \\ A1_{0,3} \\ A2_{0,3} \\ A3_{0,3} \\ A4_{0,3} \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} A0_{1,3} \\ A1_{1,3} \\ A2_{1,3} \\ A3_{1,3} \\ A4_{1,3} \end{pmatrix} \quad Z := \begin{pmatrix} A0_{2,3} \\ A1_{2,3} \\ A2_{2,3} \\ A3_{2,3} \\ A4_{2,3} \end{pmatrix},$$

$$X = A4_{0,3} = 350; Y = A4_{1,3} = 6.4; Z = A4_{2,3} = 315.$$

### 3.3 Аналіз і практичне застосування прямої задачі кінематики

Пряма задача кінематики відіграє критично важливу роль у проєктуванні, програмуванні та експлуатації роботизованих систем, оскільки саме вона дозволяє обчислювати положення та орієнтацію виконавчого органу маніпулятора в просторі на основі заданих параметрів привідних суглобів [1, 35]. Вона є центральним інструментом для формування траєкторій руху, контролю положення, уникнення зіткнень та забезпечення точності дій робота в реальних і віртуальних середовищах.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

У промисловості задача прямої кінематики лежить в основі функціонування численних автоматизованих систем, зокрема маніпуляторів, які здійснюють зварювання, складання, гвинтове з'єднання, переміщення, пакування та нанесення покриттів. Програмне забезпечення керування використовує прямі кінематичні розрахунки для візуалізації руху, виявлення межі робочої зони, формування оптимальних маршрутів руху та перевірки зіткнень у цифровому макеті перед запуском системи в роботу. Особливо важливо це для багатовісних систем, де від точності геометричного обчислення залежить повторюваність позиціонування — критичний параметр для роботів, які працюють у високоточному виробництві, наприклад, електроніки чи мікромеханіки.

У медицині, зокрема в галузі роботизованої хірургії, пряма кінематика дозволяє в реальному часі відстежувати положення хірургічних інструментів, які керуються як безпосередньо, так і через дистанційні маніпулятори. Завдяки цьому хірург має змогу з високою точністю позиціювати кінцевий елемент, компенсуючи тремтіння рук або обмеження простору. Використання прямої кінематики в таких системах, як da Vinci, дозволяє забезпечити безпечну та ефективну взаємодію інструмента з тілом пацієнта, запобігаючи надмірному навантаженню на тканини.

У сфері комп'ютерної графіки, тривимірного моделювання та віртуальної реальності пряма кінематика дозволяє будувати реалістичні скелетні структури персонажів або об'єктів. На основі обчислення положення кінцівок за відомими суглобовими параметрами створюється правдоподібна анімація, яка враховує реальні фізичні обмеження. Це є важливою частиною процедур rigging'у в ігрових рушіях і анімаційних пакетах, таких як Unity, Unreal Engine, Blender чи Maya.

Також варто згадати застосування прямої кінематики у мобільній робототехніці, де вона використовується для маніпуляторів на автономних транспортних платформах. Тут пряма задача дає змогу оцінити фактичне положення маніпуляторів у просторі відносно навігаційної системи, що критично для взаємодії з навколишнім середовищем, підбору об'єктів і виконання адаптивних дій.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У космічній галузі кінематичне моделювання дозволяє розраховувати положення панелей, антен, механічних захоплювачів у вакуумі або в умовах мікрогравітації, де будь-яке відхилення може спричинити критичну ситуацію. Завдяки прямим кінематичним моделям здійснюється тестування маніпуляцій на орбітальних станціях, роботизованих маніпуляторах шатлів, сервісних космічних платформах.

Таким чином, пряма задача кінематики є не просто математичною формальністю, а функціональним базисом для проектування, симуляції, діагностики та експлуатації роботизованих систем у широкому спектрі галузей. Вона дозволяє забезпечити надійне й точне управління маніпуляторами, сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів, безпеці медичних процедур та реалізму віртуального контенту. Її використання є невід’ємною частиною сучасного інженерного інструментарію для реалізації складних автоматизованих та інтелектуальних технічних систем.

### 3.4 Висновки до третього розділу

В третьому розділі було проведено повний теоретичний, аналітичний та прикладний аналіз прямої задачі кінематики, що є фундаментальним елементом у проектуванні та керуванні трьохосьовим роботом-маніпулятором. У розділі розглянуто математичну сутність прямої кінематики як процесу визначення просторового положення та орієнтації виконавчого органа на основі заданих конфігураційних параметрів привідних ланок. Було пояснено, що ця задача формує базу для подальших розрахунків траєкторій, симуляцій, візуалізації та зворотної кінематики.

На основі методології Денавіта–Хартенберга побудовано послідовні матриці трансформації, що описують положення кожної ланки відносно базової координатної системи. Проведено числові розрахунки положення точок кінематичного ланцюга за заданих кутів обертання та довжин ланок, що підтвердило коректність розробленої геометричної моделі робота.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особлива увага в розділі приділена практичному застосуванню прямої кінематики: у промислових роботах, медичних системах, мобільній робототехніці, космічних маніпуляторах і комп'ютерній графіці. Продемонстровано, що саме ця задача забезпечує точність позиціонування, запобігання зіткненням, контроль зон досяжності та ефективну інтеграцію маніпулятора в автоматизовані комплекси.

Таким чином, на основі проведених розрахунків і прикладів доведено працездатність кінематичної моделі трьохосьового маніпулятора та важливість прямої задачі як критично важливого етапу у створенні функціонально надійних і точних робототехнічних систем.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

## ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило системно проаналізувати сучасні підходи до класифікації, проектування, моделювання та аналітичного обґрунтування трьохосьових роботів-маніпуляторів ангулярного типу. У першому розділі розглянуто загальні поняття, типологію та функціональні можливості маніпуляторів, а також особливості їхнього застосування в сучасному виробництві. Встановлено, що ангулярні конструкції завдяки гнучкості, компактності та широкій робочій зоні є перспективними для реалізації високоточного позиціонування та складних рухів у просторі. Особливу увагу було приділено ролі програмного забезпечення, яке дозволяє не лише моделювати геометрію та кінематику пристроїв, а й здійснювати симуляцію їх дій у віртуальному середовищі, що істотно скорочує цикл проектування.

У другому розділі реалізовано повний цикл конструювання маніпулятора з трьома ступенями свободи, включаючи побудову кінематичної схеми, розробку базових механічних елементів, підбір сервоприводів і створення 3D-моделі в середовищі SolidWorks. Конструкція була орієнтована на використання паралельного механізму для стабілізації схвата у горизонтальній площині. Геометрична точність, дотримання співвісності та симетрії, а також оптимізація кріплень для приводів забезпечили функціональність, надійність і зручність експлуатації. Результатом стало створення повноцінної інтегрованої моделі, готової до виготовлення та тестування, яка враховує усі кінематичні й конструктивні вимоги.

У третьому розділі обґрунтовано теоретичні та прикладні аспекти прямої задачі кінематики — основного інструменту для аналізу положення кінцевого виконавчого органа в просторі. На основі методології Денавіта–Хартенберга побудовано математичну модель, виконано чисельні розрахунки та здійснено аналіз її застосувань у різних галузях. Це дозволило не лише підтвердити правильність обраної конфігурації механізму, а й сформуванати аналітичну базу для подальшого розширення функціоналу, включаючи зворотну кінематику, динаміку та системи управління.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У цілому, результати проекту доводять технічну доцільність обраної конструкції та обґрунтовують можливість її подальшої практичної реалізації як у навчальних, так і у виробничих умовах. Побудована модель трьохосьового ангулярного маніпулятора відповідає вимогам гнучкості, точності та адаптивності до задач автоматизованих систем нового покоління.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Михайлов, Є. П. Навчальний посібник з дисципліни "Маніпулятори та промислові роботи": для студентів бакалаврів / Є. П. Михайлов, В. М. Лінгур; Одес. нац. політехн. ун-т. Одеса, 2019. - 232 с.

2. Основи робототехніки: навчальний посібник / Н.В. Морзе, Л.О. ВарченкоТроценко, М.А. Гладун. Кам'янець-Подільський: ПП Буйницький О.А., 2016.-182 с.

3. Донченко М. В. Технології комп'ютерного проектування : навч. посіб. / М. В. Донченко. - Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. - 364 с.

4. Розвиток робототехніки у виробництві в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sbrobotics.ua/stati/rozvitok-robototekhnki-u-virobnicztvi-v-ukrayini/>

5. Робототехніка в Україні: сучасний стан та перспективи розвитку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://blog.agrokebety.com/AgrokebetyPRO\\_M11](https://blog.agrokebety.com/AgrokebetyPRO_M11).

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

7. Трет'як А.В. Основи робототехніки: навчальний посібник для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А.В. Трет'як, А.М. Кльон. – Полтава, видавництво національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 135 с.

8. Цвіркун Л.І. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.

9. Основи робототехніки: конспект лекцій для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форми навч., спец.: 141

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, / Державний біотехнологічний університет; упоряд. М.С. Сорокін, – Харків: [б. в.], 2024. –94с.

10. Аніщенко М. В. Промислові роботи [Електронний ресурс] : навч. посібник / М. В. Аніщенко ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Електрон. текст. дані. – Харків : НТУ "ХПІ", 2025. – 464 с.

11. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технологічні комплекси: Навчальний посібник. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 392 с.

12. Розробка алгоритму керування роботизованим маніпулятором на базі апаратно-програмних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/827/1/Trostianskyi\\_bach.pdf](https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/827/1/Trostianskyi_bach.pdf)

13. Робот-маніпулятор з технологією м'якого захвату [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d22c8b57-63cf-4b9f-84ea-c203ee9ef080/content>

14. Класифікація маніпуляторів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kaf-av.tntu.edu.ua/index.php/mn-abiturient/mn-articles/676-art-industrial-robots>.

15. Електромеханічна система промислового маніпулятора [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6c668280-be55-4a4d-9ef5-37e14da52db1/content>

16. Розробка алгоритму керування роботизованим маніпулятором на базі апаратно-програмних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/827/1/Trostianskyi\\_bach.pdf](https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/827/1/Trostianskyi_bach.pdf)

17. SolidWorks. Для чого він потрібен [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://noosphereengineering.com/news/solidworks.-dlya-chogo-vin-potriben>

18. Autodesk Inventor [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=hX8D2OdmBio>

19. Autodesk Fusion 360 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sumy.lvivservice.com.ua/vstanovlennya-autodesk-fusion-360>

20. FreeCAD [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://daad.org.ua/6166-freecad-shcho-tse-za-programa.html#google\\_vignette](https://daad.org.ua/6166-freecad-shcho-tse-za-programa.html#google_vignette)

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

21. Onshape CAM Studio [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://develop3d.com/simulation/first-look-onshape-cam-studio/>

22. STEMFIE parts under Tinkercad featured collections [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.stemfie.org/?view=article&id=79:find-stemfie-parts-in-tinkercad-featured-collections&catid=13>

23. Машинобудування України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vseosvita.ua/test/mashynobuduvannia-ukrainy-625614.html>

24. Охисрте [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.wikiwand.com/es/articles/Soldadura\\_por\\_combusti%C3%B3n\\_%28aut%C3%B3gena%29](https://www.wikiwand.com/es/articles/Soldadura_por_combusti%C3%B3n_%28aut%C3%B3gena%29)

25. Роботи KUKA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.instagram.com/p/DJCYUeeIoSu/>

26. Виробництво взуття [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.hcncglobal.com/news/shoe-manufacturing-intelligent-molding-solution-63366189.html>

27. Будівельні технології майбутнього [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://budport.com.ua/buildnews/30853-stroitelnye-tehnologii-buduschego>

28. Промисловий робот [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kapelou.com/product/promislovij-robot>

29. Серво DF15RMG [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino-kit.com.ua/servo-df15rmg-tilt-nabor-20kg.html>

30. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: монографія /І. Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, В. В.Євсєєв, С. П. Новоселов, Н. П. Демська. Х. ; 2022. 427 с.

31. Поліщук Л.К. Верстатні комплекси. Проектування роботів та маніпуляторів. Частина 1 : навчальний посібник / Поліщук Л. К. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 132 с.

32. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник. Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. – 232с.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

33. Стенцель Й.І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування: Навч. посібник -К.: ІСДО.1993.-320с.

34. Араффа Х. О. Автоматизація процесів планування та стабілізації руху антропоморфного крокуючого апарату (АКА). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 13.05.07 «Автоматизація процесів керування» (015 – автоматизація та приладобудування). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

35. Автоматизація вихрострумової дефектоскопії об'єктів зі складною геометрією поверхні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://asnk.kpi.ua/docs/anotations/master/LevchenkoO\\_ua.pdf](https://asnk.kpi.ua/docs/anotations/master/LevchenkoO_ua.pdf)

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

ДОДАТОК А

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77