

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

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра інформаційних систем та технологій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«__» _____ 2025 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Інформаційне забезпечення
робототехнічних систем»
спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»
на тему: «Автоматизована система на базі дельта-робота для роботи в
умовах обмеженого простору»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ІК-11

Топчій Олександр Сергійович

Керівник:

Доцент кафедри ІСТ, к.т.н., доц.,

Батрак Євгеній Олександрович

Рецензент:

Доцент кафедри ОТ, к.т.н, доц.,

Волокита Артем Миколайович

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

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра інформаційних систем та технологій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 126 «Інформаційні системи та технології»

Освітньо-професійна програма «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Топчію Олександру Сергійовичу

1. Тема проєкту «Автоматизована система на базі дельта-робота для роботи в умовах обмеженого простору», керівник проєкту Батрак Євгеній Олександрович к.т.н., доц., затверджені наказом по університету від «23» травня 2025 р. № 1705-с
2. Термін подання студентом проєкту: 9 червня 2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту: система повинна бути спроможна до реалізації маніпуляційних операцій в умовах обмеженого простору. Передбачається можливість використання різного корисного навантаження та методів керування системою. Система має бути універсальна, компактна, проста у побудові та обслуговуванні.
4. Зміст пояснювальної записки: вступ, дослідження предметної області, аналіз готових технічних рішень, побудова структурної та функціональної схем, вибір технічних засобів, побудова 3D-моделі робота, аналіз кінематики та розроблення алгоритму керування, тестування та симуляція.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): структурна схема, функціональна схема, схема

електрична принципова, складальний кресленик дельта-робота, складальний кресленик рами кріплення робота, схема алгоритму прямої задачі кінематики, схема алгоритму інверсної задачі кінематики, кресленик загального виду дельта-робота.

6. Дата видачі завдання: 8 березня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд предметної області та аналіз проблематики	29.03 - 5.04	
2	Огляд готових технічних рішень	5.04 - 10.04	
3	Ознайомлення з основами схемотехніки та підбір компонентів	10.04 - 20.04	
4	Побудова електричної схеми	20.04 - 23.04	
5	Ознайомлення з основами інженерного моделювання	23.04 - 28.04	
6	Створення 3D-моделі робота	28.04 - 05.05	
7	Аналіз кінематики та побудова алгоритму керування	05.05 - 10.05	
8	Тестування та симуляція робота	10.05 - 20.05	
9	Підготовка ПЗ та графічних матеріалів	20.05 - 9.06	

Студент

Олександр ТОПЧІЙ

Керівник

Євгеній БАТРАК

АНОТАЦІЯ

Топчій О.С. Автоматизована система на базі дельта-робота для роботи в умовах обмеженого простору.

Проект містить 82 сторінки тексту, 58 рисунків, 9 таблиць, посилання на 37 джерел інформації та 10 конструкторських документів.

Ключові слова: автоматизована система, робот, обмежений простір, робоча площа, роботизація, кроковий двигун, симуляція, кінематика, 2D дельта-робот, паралельний робот, Arduino.

Об'єкт розроблення – автоматизована система для роботи в умовах обмеженого простору.

Основна мета – покращення автоматизованої системи на основі дельта-робота для виконання маніпуляційних операцій в умовах обмеженого робочого простору шляхом оптимізації кінематики, розташування робочої зони робота та удосконалення методів керування системою.

У дипломному проєкті створено та реалізовано автоматизовану систему на основі 2D дельта-робота для роботи в обмеженому просторі. В результаті тестування та симуляцій, робота було протестовано у різних практичних сценаріях та доведено працездатність й надійність розробленої системи.

Отримані результати можуть бути корисними для подальших досліджень та при розробці систем для автоматизації виробничих процесів у обмеженому просторі.

SUMMARY

Topchiy O.S. Automated system based on a delta robot for operation in a constrained space.

The project contains 82 pages of text, 58 figures, 9 tables, references to 37 sources and 10 design documents.

Keywords: automated system, robot, constrained space, workspace, robotics, stepper motor, simulation, kinematics, 2D delta robot, parallel robot, Arduino.

Object of development – an automated system designed for operation in a constrained space.

Main goal – improvement of an automated system based on a delta robot, aimed at increasing the efficiency of manipulation operations in a limited space by optimizing kinematics, the orientation of the robot's workspace, and improving system control methods.

In this diploma project, an automated system based on a 2D delta robot for operation in confined spaces was created and implemented. As a result of testing and simulations, the robot was tested in various practical scenarios, proving the performance and reliability of the developed system.

The obtained results may be useful for further research and for the development of similar systems intended to automate production processes in a constrained space.

Номер рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кільк. аркушів	Номер екзем.	Примітка
1			<u>Документація загальна</u>			
2						
3			Знову розроблена			
4						
5	A4	ІК11.280БАК.006 ПЗ	Пояснювальна записка	82		
6						
7	A4	ІК11.280БАК.006.00	Автоматизована система на	1		
8			базі дельта-робота для			
9			роботи в умовах обмеженого			
10			простору.			
11			2D дельта-робот.			
12			Специфікація			
13						
14	A4	ІК11.280БАК.006.01	Автоматизована система на	1		
15			на базі дельта-робота для			
16			роботи в умовах обмеженого			
17			простору.			
18			Рама кріплення робота.			
19			Специфікація			
20						
21	A3	ІК11.280БАК.006.00 СБ	Автоматизована система на	1		
22			на базі дельта-робота для			
23			роботи в умовах обмеженого			
24			простору.			
25			2D дельта-робот.			
26			Складальний кресленик			
27						
28						
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ІК11.280БАК.006 ТП	
Розроб.		Топчій О.С.				
Керівн.		Батрак Є.О.			Автоматизована система на базі дельта-робота для роботи в умовах обмеженого простору. Відомість проекту	
					Літ.	Аркуш
Затв.		Ролік О.І.			1	3
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Група ІК-11	

Номер рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кільк. аркушів	Номер екзем.	Примітка	
29							
30	A3	ІК11.280БАК.006.01 СБ	Автоматизована система на	1			
31			базі дельта-робота для				
32			роботи в умовах обмеженого				
33			простору.				
34			Рама кріплення. Складальний				
35			кресленик				
36							
37	A3	ІК11.280БАК.006 ВО	Автоматизована система на	1			
38			базі дельта-робота для				
39			роботи в умовах обмеженого				
40			простору.				
41			2D дельта-робот. Кресленик				
42			загального виду				
43							
44	A3	ІК11.280БАК.006 ЭЗ	Автоматизована система на	1			
45			базі дельта-робота для				
46			роботи в умовах обмеженого				
47			простору.				
48			Схема електрична				
49			принципова				
50							
51	A3	ІК11.280БАК.006 Д1	Автоматизована система на	1			
52			базі дельта-робота для				
53			роботи в умовах обмеженого				
54			простору.				
55			Структурна схема				
56							
57							
58							
59							
			ІК11.280БАК.006 ТП				Арк.
							2
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

Номер рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кільк. аркушів	Номер елем.	Примітка
60						
61	A3	ІК11.280БАК.006 Д2	Автоматизована система на	1		
62			базі дельта-робота для			
63			роботи в умовах обмеженого			
64			простору.			
65			Функціональна схема			
66						
67	A3	ІК11.280БАК.006 Д3	Автоматизована система на	1		
68			базі дельта-робота для			
69			роботи в умовах обмеженого			
70			простору.			
71			Алгоритм прямої задачі			
72			кінематики			
73						
74	A3	ІК11.280БАК.006 Д4	Автоматизована система на	1		
75			базі дельта-робота для			
76			роботи в умовах обмеженого			
77			простору.			
78			Алгоритм інверсної задачі			
79			кінематики			
80						
81						
82						
83						
84						
85						
86						
87						
88						
89						
90						
			ІК11.280БАК.006 ТП			Арк.
						3
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизована система на базі
дельта-робота для роботи
в умовах обмеженого простору»**

Київ – 2025 року

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	6
1.1 Робототехніка у обмеженому просторі.....	6
1.2 Визначення поняття обмеженого простору та вимог до системи	6
1.3 Різновиди робототехнічних систем	8
1.3.1 Декатровий робот.	9
1.3.2 SCARA-роботи.....	10
1.3.3 Шарнірні маніпулятори	11
1.3.4 Паралельні маніпулятори	13
1.4 Аналіз дельта робота для умов обмеженого простору	15
1.4.1 3D дельта-робот	15
1.4.2 2D дельта-робот	16
1.5 Орієнтація робочої площини робота у просторі.....	16
Висновки до розділу 1	22
2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	24
2.1 Codian Robotics D2 Series	24
2.2 BAT1000B-S60 Heavy Load Delta Robot	25
2.3 GB-MH-DLT2 Delta robot	26
2.4 Delta Robot D2-1000-P5	27
Висновки до розділу 2	29
3 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ	30
3.1 Структурна схема	30
3.2 Функціональна схема	31
Висновки до розділу 3	32
4 ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ І ПОБУДОВА СХЕМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ	33
4.1 Вибір мікроконтролера	33

					ІК11.280БАК.006 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис					
Розробив	Топчій О.С.				Автоматизовна система на базі дельта-робота для роботи в умовах обмеженого простору. Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив	Батрак С.О.					Т	2	82
						КПІ ім. Ігоря Сікорського Група ІК-11		
Затв.	Ролік О.І							

4.2 Вибір приводів.....	35
4.3 Вибір редуктора та розрахунок його параметрів.....	40
4.4 Вибір драйверів крокового двигуна.....	44
4.5 Обрання датчиків положення.....	45
4.6 Побудова схеми підключення.....	46
Висновки до розділу 4.....	47
5 СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ ДЕЛЬТА-РОБОТА.....	49
5.1 Обрання середовища та методу моделювання.....	49
5.2 Створення основних деталей робота.	50
5.3 Розрахунок ваги конструкції.....	55
5.4 Збірка дельта-робота.....	56
Висновки до розділу 5.....	60
6 АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ ТА РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ.....	61
6.1 Поняття прямої та інверсної задачею кінематики.....	61
6.2 Аналіз кінематичної структури 2D дельта-робота.....	61
6.3 Пряма задача кінематики.....	62
6.4 Інверсна задача кінематики.....	63
Висновки до розділу 6.....	64
7 ТЕСТУВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЯ.....	65
7.1 Методи програмування роботів.....	65
7.2 Обрання середовища для симуляції.....	66
7.3 Підготовка до симуляції.....	67
7.4 Перша симуляція. Базові рухи.....	71
7.5 Друга симуляція. Pick and Place.....	72
7.6 Третя симуляція. Лазерне гравіювання.....	73
Висновки до розділу 7.....	76
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79

ВСТУП

У сучасному світі автоматизація виробничих процесів набуває широкого застосування в різноманітних галузях промисловості, суттєво підвищуючи продуктивність та ефективність виконання завдань. В умовах глобалізації ринків, використання роботизованих систем для зменшення ціни та часу виробництва продукції набуває особливої актуальності. Роботизація дозволяє мінімізувати людський фактор, знижуючи ймовірність помилок, тим самим підвищуючи якість продукції, а також значно зменшуючи економічні витрати завдяки відмові від ручної праці.

Одним із важливих напрямів розвитку сучасної робототехніки є розроблення систем для роботи в обмеженому просторі. Такі умови характерні для багатьох галузей, зокрема фармацевтичної, мікроелектроніки, лабораторних досліджень та особливо актуальні для невеликих локальних бізнесів та виробництв. Робота в умовах обмеженого простору висуває специфічні вимоги до робототехнічних пристроїв: вони повинні бути компактними, точними, швидкими, та мати можливість монтажу різного корисного навантаження. Це створює додаткові виклики для розробників роботизованих систем, адже важливо забезпечити не лише необхідні експлуатаційні параметри, але й зручність у використанні, надійність конструкції, та доступність технології в цілому.

Особливу увагу в умовах автоматизації виробничих процесів приділено роботизованим системам паралельного типу, зокрема дельта-роботам. Провідні робототехнічні світові компанії, такі як ABB, Codian Robotics, Fanuc та Omron, активно використовують дельта-роботів у своїх автоматизованих системах для виконання завдань різної складності, що підтверджує актуальність та попит на такі системи. Водночас, існуючі технічні рішення часто не повністю відповідають специфічним вимогам окремих виробничих процесів, що створює потребу в розробці або модернізації відповідних робототехнічних систем. Зокрема, більшість промислових дельта-роботів не є адаптованими для умов обмеженого простору, оскільки використовуються зазвичай на великих виробничих лініях або

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

підприємствах. Саме цією причиною обумовлена актуальність розроблення автоматизованої системи на основі паралельного дельта-робота, оскільки особливості кінематичної конструкції таких систем дозволяють створити надійне, компактне та недороге рішення для роботи в умовах обмеженого простору.

Об'єкт дослідження – автоматизація роботи в умовах обмеженого простору.

Предмет дослідження – дельта-робот паралельної конструкції.

Основна мета – покращення автоматизованої системи на основі дельта-робота для виконання маніпуляційних операцій в умовах обмеженого робочого простору шляхом оптимізації кінематики, розташування робочої зони робота та удосконалення методів керування системою.

Завдання для досягнення поставленої мети:

- 1) необхідно провести дослідження предметної області, розкрити проблематику автоматизації задач у межах обмеженого простору;
- 2) проаналізувати види робототехнічних систем та обрати найкращий варіант для вирішення поставленої задачі;
- 3) проаналізувати готові технічні рішення, які потенційно підходять для умов обмеженого простору;
- 4) створити структурну та функціональну схему системи;
- 5) обрати наступні технічні засоби: приводи, контролери, редуктори, датчики положення та розробити схему підключення;
- 6) створити 3D-модель окремих деталей системи та провести повноцінну її збірку;
- 7) провести аналіз кінематики та розробити математичну модель системи;
- 8) провести симуляцію та тестування системи.

Дипломний проєкт складається з наступних розділів: дослідження предметної області, аналіз технічних рішень, побудова структурної та функціональної схем, вибір технічних засобів, побудова 3D-моделі робота, аналіз кінематики та побудова алгоритмів керування, тестування та симуляція системи. Загальний обсяг пояснювальної записки складає 82 сторінки.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Робототехніка у обмеженому просторі

Сучасні тенденції робототехніки спрямовані не лише на великі промислові системи, але й на автоматизацію у малих масштабах, наприклад у домашніх або лабораторних умовах. Це потребує наявності робототехнічних систем, які можуть ефективно працювати у обмеженому просторі: на невеликій площі, в компактних установках або усередині спеціальних контейнерів чи окремих систем. У таких умовах критично важливо забезпечити достатню функціональність робота при мінімальних габаритах, зберігаючи при цьому точність, швидкість та надійність системи.

Однією з ключових проблем у проектуванні таких систем є баланс між розміром і продуктивністю. Обмежена робоча зона потребує доволі специфічних вимог до конструкції робота, що може ускладнювати досягнення високої точності руху, особливо якщо приводи розташовані на рухомих ланках. Водночас, для ефективної роботи доволі часто потрібні надшвидкі та точні маніпуляції, що робить вибір приводу, системи передач і матеріали деталей особливо критичними. Також, важливими факторами є мобільність та можливість швидкого монтажу/демонтажу системи при зміні її конфігурації або корисного навантаження.

Ще одним викликом є розроблення та адаптація системи керування для роботи в умовах обмеженого простору, оскільки обмежена площа і потенційна близькість до перешкод, стін або інших об'єктів накладають додаткові вимоги до алгоритмів попередження зіткнень та точного позиціонування.

1.2 Визначення поняття обмеженого простору та вимог до системи

Поняття обмеженого простору є доволі розтяжним і не чітко визначеним. Оскільки для деяких робототехнічних систем, наприклад промислових дронів, обмеженим простором може вважатися ангар або ціла будівля. Якщо розглядати

сферу застосування мікророботів, розміри яких зазвичай не перевищують одного сантиметра, і які застосовуються, зокрема, у малоінвазивній хірургії, то для таких систем обмежений простір може вимірюватись лише кількома міліметрами.

У контексті розроблення дипломного проєкту під терміном «обмежений простір» розуміється невелика робоча зона, притаманна домашнім майстерням або компактним лабораторним умовам. Тобто, це є середовище, де робот повинен працювати на обмеженій площині, наприклад комп'ютерний стіл, робоча поверхня у майстерні або інша конструкція з обмеженою площею та об'ємом. Щоб оперувати у таких умовах, роботехнічна система має задовольняти наступні вимоги:

1) малий габарит і площа робочої поверхні: робот має займати мінімум місця, щоб вміститися, наприклад, на столі чи шафі. Висота робота також обмежена – пристрій має бути таких габаритів, щоб їм було комфортно та зручно користуватися у кімнаті або майстерні;

2) безпека та автономність: у домашніх або виробничих умовах робот зазвичай працює поруч з людьми або іншою апаратурою, тому його рухи мають бути чітко контрольованими, а конструкція безпечною для оточення;

3) простота конструкції та виробництва: передбачається можливість створення системи у домашніх умовах та при наявності лише базового обладнання. Саме тому для збірки робота мають використовуватись доступні матеріали та технології. Зокрема, має бути можливість 3D-друку основних деталей та елементів корпусу;

4) доступність комплектуючих: оскільки система позиціонується як така, яку можна створити у домашніх умовах, використання недорогих та доступних комплектуючих (шарнірів, моторів, сервоприводів і т.д.) є ключовою складовою розроблення проєкту;

5) точність позиціонування та відтворюваність циклів руху є ключовими характеристиками будь-якого робота. Система повинна забезпечувати невелику позиційну похибку у всіх осях руху, щоб мати можливість виконувати тонкі операції як, наприклад, лазерне гравіювання або вирізання. Стандартне значення

похибки промислових роботів зазвичай не перевищує 0.1 мм, але враховуючи призначення та характеристики системи, похибка у 0.5 мм буде цілком задовільним результатом.

Отже, обмеженим простором у контексті дипломного проєкту можна вважати невелику площу та об'єм (стандартна кімната або майстерня), в межах якої робот буде виконувати поставлені задачі. Проєктуючи систему для таких умов, необхідно враховувати компактність конструкції, безпечність, точність, легкість її виготовлення та налаштування, а також адаптацію до нестандартних положень (наприклад, кріплення до стіни), щоб максимально збільшити універсальність системи.

1.3 Різновиди робототехнічних систем

Перед тим як перейти до проєктування самої системи, треба розібратися які існують види робототехнічних систем. Проаналізувавши найпопулярніші типи роботів які використовуються у промисловості, потрібно обрати найкращий варіант конструкції, який підійде для виконання у межах дипломного проєкту. Спочатку потрібно чітко дати відповідь на питання: що таке робот?

Робот – це програмована автоматизована система або пристрій з декількома ступенями свободи, призначений для виконання повторюваних, точних і швидких операцій у виробничому або іншому процесі [1].

Зазвичай роботи оснащені приводами (електричними, гідравлічними, пневматичними) – спеціальними системами керування для руху вздовж заданих траєкторій, і різноманітним корисним навантаженням на кінці робочої області, наприклад захватами, зварювальними головками, свердлами, лазерними різакми і т.д. Класифікувати роботизовані системи можна багатьма різними способами, за їх кінематикою, технічними характеристиками або завданнями, для яких їх було розроблено. Для коректного розроблення роботизованої системи у межах проєкту, варто спочатку розглянути різні види роботів та обрати який з них найкраще підходить до встановлених умов. Нижче наведено аналіз найпоширеніших типів

промислових роботів, які потенційно можуть підходити для роботи в умовах обмеженого простору

1.3.1 Декатровий робот

Декартовий (Cartesian Coordinate Robots, CCR) робот – кінематична схема робота, чиї три головні осі керування є лінійними (тобто вони не обертаються, а рухаються по прямій лінії) і взаємно розташовані під прямими кутами одна до одної в декартовій системі координат. За допомогою трьох ковзаючих муфт, інструмент може переміщатися вздовж осей X, Y та Z (рисунок 1.1) [2].

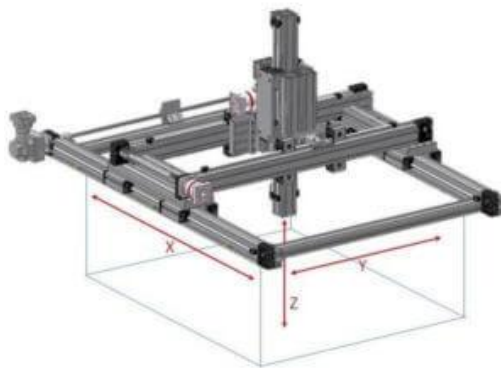


Рисунок 1.1 – Приклад декартового (CCR) робота [3]

Основні сфери застосування такого типу роботів: 3D-друк, фрезерні установки, плоттери для гравіювання, малювання, зварювання.

Довжина кожної з осей є легко конфігуруємою, з можливістю приєднання різних типів корисного навантаження. Вантажопідйомність і швидкість залежать від довжини осей та опорних конструкцій. CCR зазвичай також мають кращу точність у порівнянні зі SCARA-роботами або шарнірними маніпуляторами, і легко виконують маніпуляції у 3D-просторі в залежності від заданої траєкторії. Однак, ключовою особливістю CCR є його універсальність – здатність налаштовувати та масштабувати CCR відповідно до потреб застосування.

Не дивлячись на всі переваги такого типу роботів, вони також мають доволі суттєві недоліки: така система займає весь простір над робочою зоною (рейки по краях робота) і може виявитись доволі громіздкою, що є критичним для умов обмеженого простору. У тісних умовах CCR може виявитися незручним, якщо площа дуже мала. Також, декартовий робот потребує наявності специфічного та дорогого обладнання для створення направляючих рейок та механізмів, що також є критичним фактором який вказує на те, що така конструкція не підходить для поставлених у межах дипломного проєкту задач.

1.3.2 SCARA-роботи

SCARA-роботи – спеціалізовані двоплечеві роботи для швидкого переміщення в площині. SCARA-маніпулятори широко використовуються для високошвидкісного складання дрібних компонентів, таких як електронні пристрої або годинникові механізми. В конструкції SCARA дві обертові осі відповідають за рух у горизонтальній площині, а третя вертикальна вісь забезпечує підйом/опускання. Завдяки простій конструкції, SCARA-роботи зазвичай швидші та дешевші, ніж стандартні маніпулятори, що робить їх ідеальною «золотою серединою» з точки зору вартості та швидкості. SCARA-роботи, такі як серія SG від Yaskawa (рисунок 1.2), забезпечують найвищу продуктивність у своєму класі та ідеально підходять для високоточної роботи.



Рисунок 1.2 – SCARA-робот серії SG від компанії Yaskawa [4]

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		10

Основні галузі застосування SCARA-роботів:

- 1) збірка електроніки;
- 2) пакування та сортування;
- 3) лазерне гравіювання, маркування;
- 4) нанесення хімічних субстанцій (клею, герметика і т.д.).

Проте, SCARA-системи все ж мають свої певні особливості та недоліки. По-перше, такі роботи є послідовними механізмами, що означає наявність рухомих моторів на плечах та певні обмеження у швидкості через велику інерцію ланок. По-друге, рухома база вимагає вільного простору навколо осей обертання, що унеможливорює щільне розміщення серед інших механізмів.

1.3.3 Шарнірні маніпулятори

Шарнірний робот (англ. Articulated robot) – це робот із обертовими суглобами, який має чотири або більше ступенів свободи (рисунок 1.3). Це один із найпоширеніших типів роботів у сучасній промисловості (численні приклади застосування таких систем можна побачити у збиральних цехах, автомобільних заводах, у авіаційній промисловості і т.д.). Шарнірні роботи можуть варіюватися від простих конструкцій із чотирма ступенями свободи, до систем із десятьма і більше взаємодіючими суглобами та компонентами [5].



Рисунок 1.3 – Приклад шарнірного робота компанії Oriental Motor [6]

Приведення механізму до руху може бути різними способами, зокрема за допомогою крокових електродвигунів або сервоприводів.

Найрозповсюдженішим прикладом шарнірного робота є шестиступінчастий (6-DOF) маніпулятор – це робот-рука з шістьма незалежними ступенями свободи (рисунок 1.4). Така конфігурація дозволяє маніпулятору досягати практично будь-якої орієнтації в робочому об'ємі та виконувати складні траєкторії руху, включаючи обхід перешкод або роботу в важкодоступних положеннях.

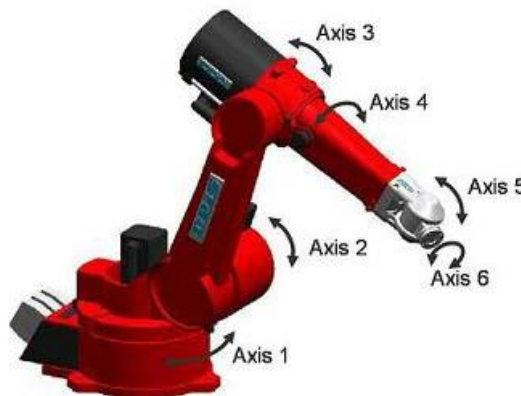


Рисунок 1.4 – Приклад шестиосьового маніпулятора [7]

Завдяки універсальності й гнучкості 6-DOF роботів, їх широко використовують для зварювання, фарбування, збірки дрібних деталей та інших завдань, де потрібна точна орієнтація інструмента.

У контексті обмеженого простору, такі маніпулятори зазвичай мають компактний дизайн суглобів і великі кути обертання, завдяки чому зменшуються «мертві зони» та мінімізовується ризик зіткнення зі стінами або обладнанням. Проте, також варто врахувати і недоліки таких систем: шестиосьові маніпулятори можуть потрапляти у сингулярні позиції, таке відбувається коли маніпулятор потрапляє у таку позицію, що втрачає одну або декілька ступенів свободи або різко змінює швидкість. Також, наявність великої кількості ступенів свободи передбачає наявність такої самої кількості приводів (електромоторів, сервоприводів або гідравліки), що значно збільшує вартість такої системи та майже унеможлиблює її збірку та обслуговування у домашніх або лабораторних

умовах. До того ж, системи такого типу потребують спеціалізованого програмного забезпечення й складних алгоритмів керування.

1.3.4 Паралельні маніпулятори

Паралельний маніпулятор (платформа Стюарта) – це механічна система, яка використовує кілька комп’ютерно керованих послідовних ланцюгів для підтримки кінцевої платформи або інструментального захвата (ефектора). Найбільш розповсюдженою є конструкція з шести лінійних актуаторів, що утримують рухомий ефектор, який, в незалежності від своєї позиції, завжди знаходиться у паралельному положенні до основи маніпулятора. Цей пристрій ще називають платформою Стюарта (рисунок 1.5) або платформою Гаута-Стюарта на честь інженерів, які першими його спроектували та застосували [8].

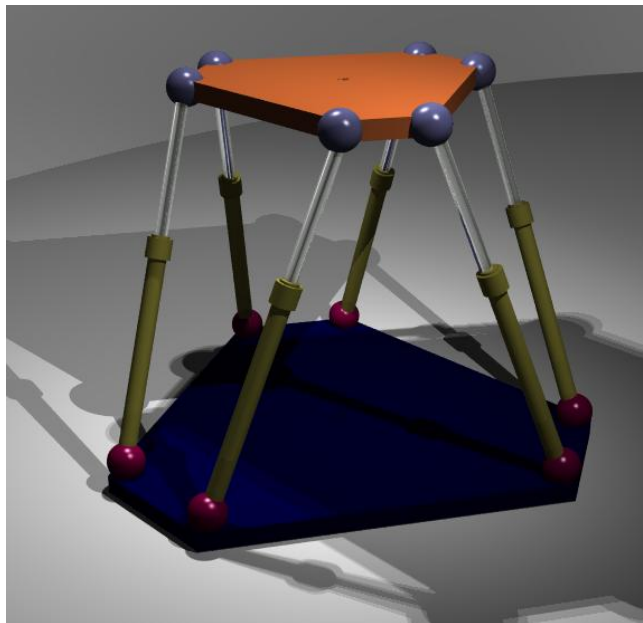


Рисунок 1.5 – Абстрактний рендер платформи Стюарта [8]

Паралельна архітектура забезпечує надійну жорсткість конструкції і доволі гарні динамічні характеристики у порівнянні з послідовними маніпуляторами. Завдяки тому, що двигуни встановлені на основі і не переносяться на рухомі ланки, маса, яку потрібно переміщувати, значно менша – це дозволяє досягати

вищих прискорень і швидших циклів роботи при меншому енергоспоживанні. У промисловості відомі приклади високошвидкісних паралельних роботів, здатних виконувати сотні операцій на хвилину (найрозповсюдженіша сфера застосування дельта-роботів це сортування деталей на конвеєрних лініях або збиральних цехах (рисунок 1.6)).

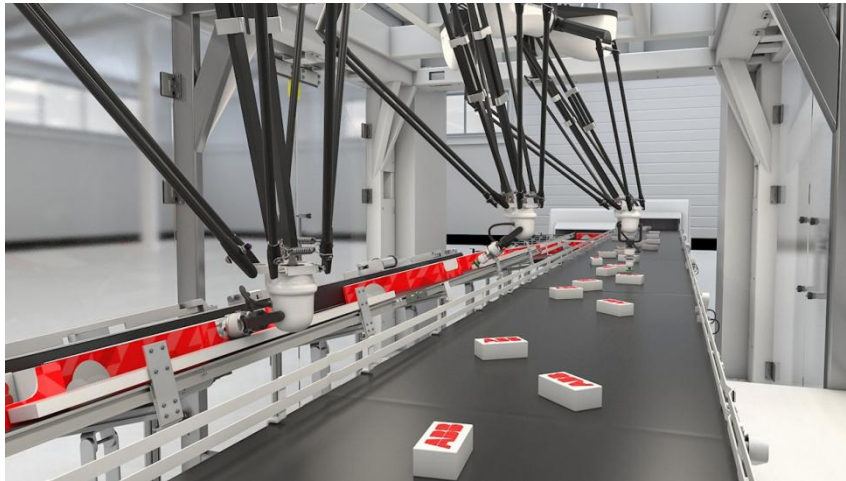


Рисунок 1.6 – Дельта-роботи IRB 365 компанії ABB на сортувальній лінії [9]

Водночас, недоліком паралельних механізмів є відносно невелика робоча зона та складніша кінематика (наприклад, наявність особливих положень – сингулярностей, що обмежують зону досяжності).

Для обмеженого простору цей недолік не є критичним, адже сама задача вимагає роботи на малій площі, натомість виграш у швидкодії та точності стає переконливим аргументом. Також, паралельні роботи відрізняються відносно простою конструкцією, оскільки не потребують великої кількості приводів та складних датчиків для відстеження положення. Окрім того, дельта-робота можна легко монтувати прямо на стелю або спеціальну раму, оскільки рухомою має залишатися лише нижня частина маніпулятора (ефектор). При необхідності змінити розмір робочої зони, достатньо модернізувати довжину плечей або площу кріплення без повної переробки системи.

Отже, визначившись з типом робота для розроблення у межах проєкту, більш детально розглянемо його конструкцію у наступному розділі.

1.4 Аналіз дельта робота для умов обмеженого простору

1.4.1 3D дельта-робот

3D дельта-робот – це різновид паралельного маніпулятора, конструкція якого зазвичай містить два плеча (важелі), з'єднані за допомогою шарнірів, електромотори, закріплені на нерухомій основі, рухому платформу (кінцевий ефектор), яка утримується всіма трьома важелями одночасно (рисунок 1.7).

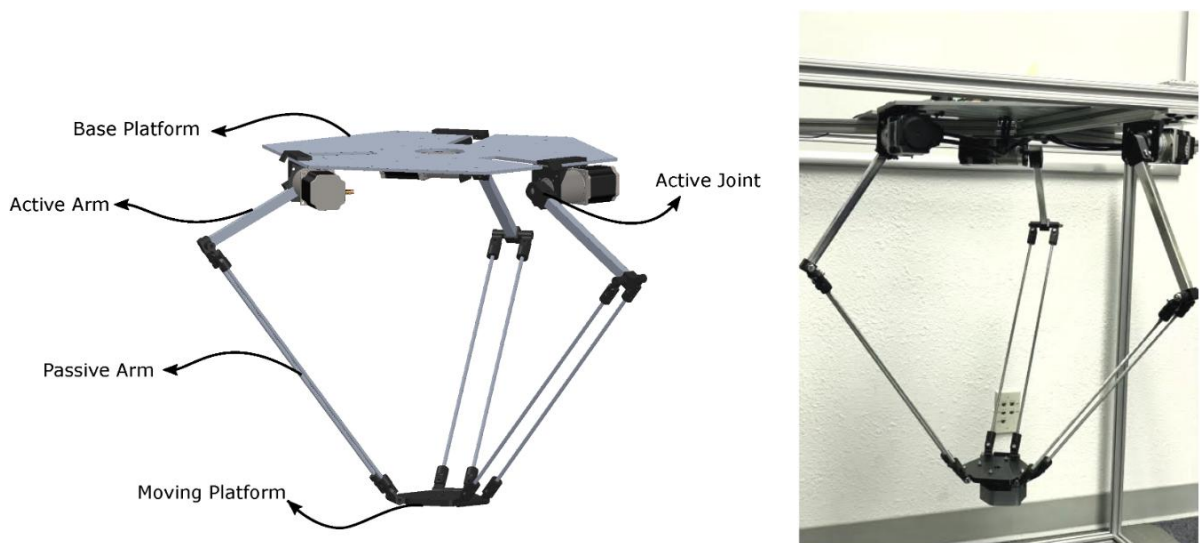


Рисунок 1.7 – Схематичний вигляд дельта-робота [10]

Класичний дельта-робот має три активних ступені свободи: переміщення по осях X , Y та вертикальне переміщення Z (також є можливість додати четверту вісь, якщо є необхідність обертання корисного навантаження відносно ефектора). Така кінематика дозволяє йому швидко маніпулювати об'єктами в тривимірному просторі. Саме завдяки специфічній та унікальній конструкції, дельта-роботів часто називають «павукоподібними» роботами. В промислових умовах вони незамінні для пакування, сортування, швидкого монтажу дрібних деталей тощо. Як один з розповсюджених прикладів можна навести модель IRB 360 FlexPicker компанії ABB (рисунок 1.8), цей робот здатний здійснювати до 120-150 циклів «взяти-перемістити-покласти» за хвилину, що робить його одним з найбільш швидкісних дельта-роботів у світі.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата



Рисунок 1.8– Дельта-робот IRB 360 FlexPicker компанії ABB
на виробництві [11]

Проте, завдяки великій кількості кінематичних ланок такий робот є доволі громіздким та потребує багато простору навколо себе для виконання маніпуляцій, окрім того, він потребує спеціальної нависної рами для монтажу пристрою, що є не дуже підходящим для умов обмеженого простору. Також, така система потребує складного й комплексного алгоритму керування для ефективної роботи. Тому, в якості альтернативи, у наступному підрозділі розглянемо спрощену версію дельта-робота.

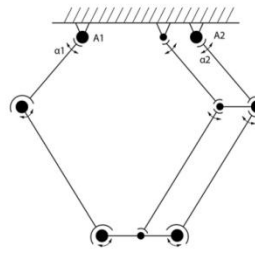
1.4.2 2D дельта-робот

Незважаючи на переваги традиційного дельта-робота, для умов обмеженого простору повноцінна трьохвимірна кінематика може виявитися не потрібною. Якщо завдання зводяться до маніпуляцій у межах однієї площини (наприклад, сортування дрібних предметів на столі, нанесення зображень або гравіювання), то третя координата (вісь Z) може бути зайвою.

2D-дельта робот – це спрощена версія традиційного дельта-механізму, розрахована на рух лише у двох координатах X та Y (рисунок 1.9).



2D дельта-робот



3D дельта-робот

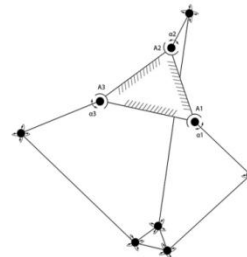


Рисунок 1.9 – Порівняння кінематик 2D і 3D дельта-роботів

Конструктивно така схема реалізується у вигляді п'ятиважільного паралельного шарнірного механізму: два двигуни, закріплені на базі, приводять у рух два важелі, з'єднані через пасивне плече з кінцевою ланкою, яка називається ефектором (рисунок 1.10). Така кінематична схема має два ступені свободи (X,Y) чого достатньо, щоб ефектор (до якого зазвичай кріпиться корисне навантаження) міг досягати будь-якої точки в робочій зоні. Іншими словами, 2D-дельта робот є маніпулятором планарного типу.

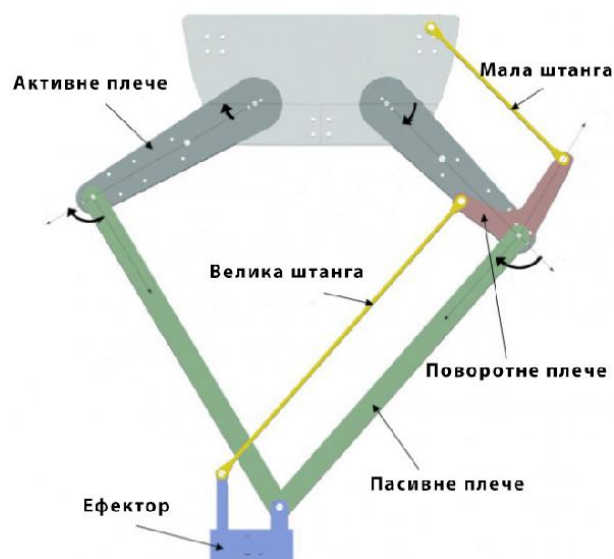


Рисунок 1.10 – Кінематична схема 2D дельта-робота

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ІК11.280БАК.006 ПЗ

Арк.

17

Перехід від тривимірного до двовимірного простору значно спрощує систему: кількість приводів зменшується з трьох до двох (рис. 1.11), відповідно спрощуються алгоритми кінематики та керування, а також скорочуються витрати на комплектуючі. Обмеження переміщення по осям (неможливість рухатися по осі Z) компенсується простотою і надійністю конструкції – менше рухомих частин, відповідно менше вимог до алгоритмів керування і синхронізації. Додатково до переваг можна віднести те, що усі приводи кріпляться до нерухомої бази робота, як результат малий момент інерції плечей дозволяє виконувати більше операцій за одиницю часу, досягаючи значних прискорень. Також, спрощена кінематика і використання доступних комплектуючих (наприклад надруковані на 3D-принтері деталі корпусу робота та використання бюджетних приводів) дозволяють знизити витрати на виробництво та обслуговування порівняно з більш складними аналогами.



Рисунок 1.11 – 2D дельта-робот компанії OMRON [12]

Отже, 2D дельта-робот зберігає більшість переваг свого тривимірного аналога – високу швидкість, жорсткість та точність, але є більш компактним і простішим у виготовленні. Як показує практика застосування подібних систем на виробництвах, навіть з двома двигунами можна реалізувати доволі ефективну робототехнічну систему. Усі ці фактори роблять таку конструкцію найкращим

варіантом для роботи в обмеженому просторі та її подальшій реалізації у межах дипломного проєкту.

1.5 Орієнтація робочої площини робота у просторі

Більшість роботизованих систем до традиційно працюють у горизонтальній площині. Для дельта-робота це означає, що його рухома платформа зазвичай переміщається над столом або конвеєром, виконуючі маніпуляції по осям X, Y, Z. Однак, у дуже тісному просторі горизонтальне розміщення робочої площини не завжди оптимальне: воно вимагає місця на поверхні столу та висоти над нею для маневрів. Перенесення робочої площини у вертикальну – тобто монтаж дельта робота на стіні або вертикальній рамі – може суттєво заощадити простір. Робот у такій конфігурації займає лише площу кріплення на стіні чи рамі, залишаючи горизонтальну поверхню вільною для інших потреб.

Для більшої наочності проведено невеликий експеримент з двома роботами для малювання: звичайним декартовим роботом та 2D вертикальним маніпулятором. Зеленим кольором відображена робоча область робота, яка однакова для обох систем. Спочатку, потрібно зрозуміти, скільки декартових робіт можна розмістити на стандартному робочому столі розміром 70 см в ширину та 110 см в довжину (рис. 1.12).

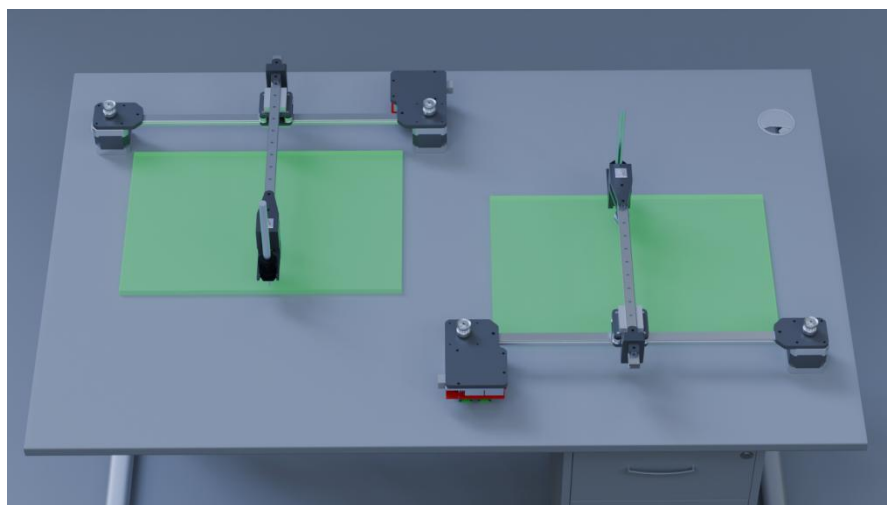


Рисунок 1.12 – Візуалізація двох CNC-плотерів на робочому столі

Як можна побачити на рисунку 1.11, на робочому столі можна спокійно розмістити 2 декартових роботи для малювання, що для більшості побутових задач має бути цілком достатньо. Але, якщо метою є організація невеликого виробництва, то в першу чергу прийдеться збільшити виробничі потужності, в цьому випадку можна перенести робочу область роботів у вертикальну площину, оскільки для таких задач як малювання або лазерне гравіювання немає суттєвої різниці в якій площині будуть виконуватись такі операції (рис 1.13).

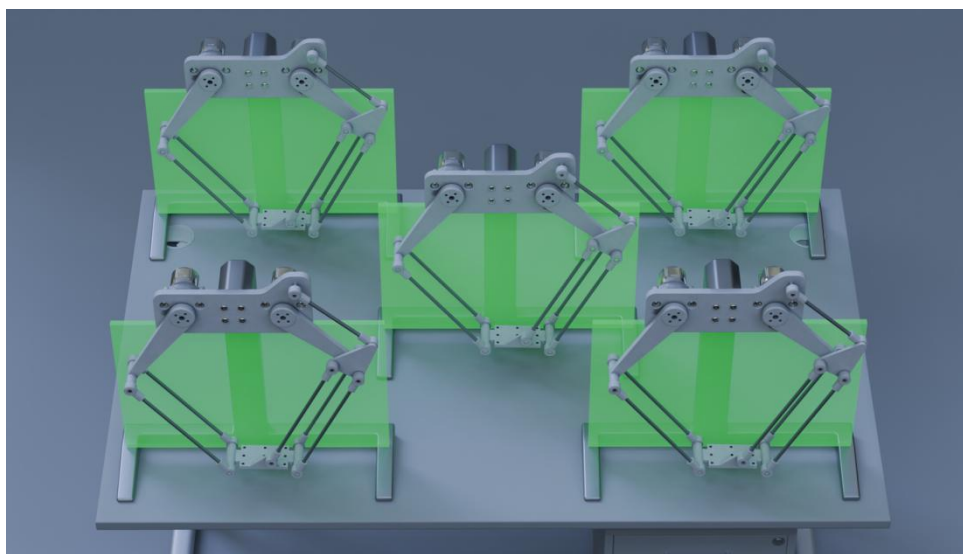


Рисунок 1.13 – Візуалізація п'яти 2D дельта-роботів на робочому столі

Як можна побачити на рисунку 1.13, можна спокійно розмістити п'ять 2D дельта-роботів на такій самій по площі робочій зоні, що і на попередній візуалізації. При цьому варто зазначити, дельта-роботи мають таку саму робочу зону як і декартові роботи (рисунок 1.12), але вона по іншому орієнтована у просторі, що як результат значно посилює потужності виробництва завдяки більшій кількості роботів та кращій оптимізації використання доступного простору.

Отже, за результатами експерименту можна зазначити, що вертикальне розташування особливо зручне в умовах, коли простір має обмеження по горизонталі, але є доступ по висоті. Наприклад, настінний робот міг би виконувати задачі малювання (рисунок 1.14) на вертикальному полотні або

сортувати легкі предмети, встановлені у спеціальних гніздах на стіні. Ще одним варіантом застосування такої системи може бути компактний автоматизований склад, де комірки з деталями розташовані одна над одною вертикально – паралельний робот, закріплений на стіні зверху, зможе переміщувати об'єкти між цими комірками. Роблячи висновок, перенесення робочої зони робота у вертикальну площину підвищує ефективність використання об'єму наявного простору та може бути корисною у багатьох практичних сценаріях.

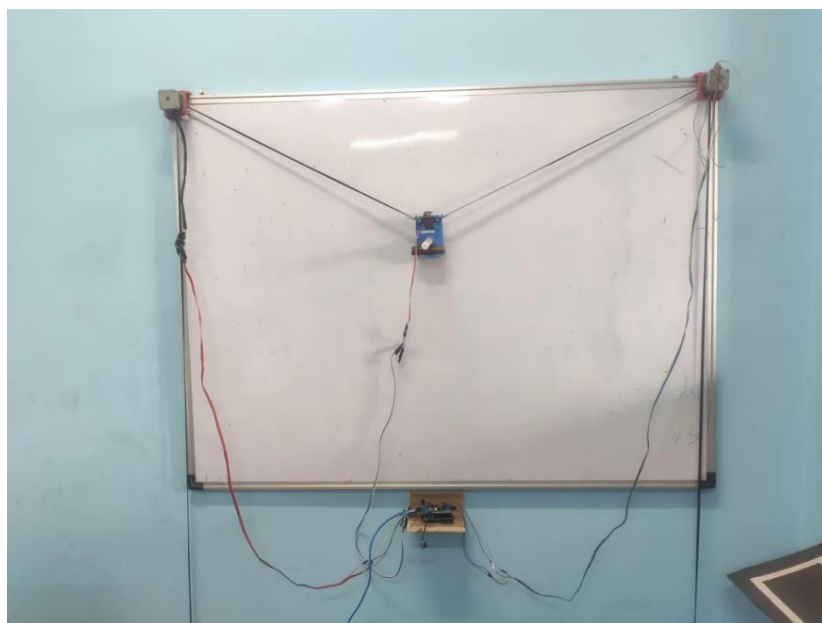


Рисунок 1.14 – Приклад вертикального плоттера для малювання [13]

Втім, зміна орієнтації робота висуває нові вимоги до його конструкції. По-перше, вектор сили гравітації тепер спрямований вздовж площини руху маніпулятора, тоді як у горизонтальній конфігурації він був би перпендикулярним робочій площині. Це означає, що основний напрямок переміщення для вертикального робота буде «вгору-вниз», і приводи повинні долати вагу ланок при підйомі. Необхідно забезпечити достатній запас потужності моторів та жорсткість ланок, щоб під дією ваги не виникало прогинів. Втім, сучасні інженерні рішення пропонують шляхи вирішення такого роду проблем: наприклад, додавання спеціальних пасивних ланок для підтримки платформи дозволяє зробити систему одночасно легкою і жорсткою. Як результат,

експериментальні зразки вертикальних 2D-паралельних роботів вже демонструють вражаючі результати – зокрема, досягнуто прискорень понад 40g без втрати точності позиціонування [14]. Це підтверджує, що при правильному проєктуванні вертикально орієнтований паралельний робот може працювати так само ефективно, як і горизонтальний, та навіть, в деяких випадках, такий варіант є більш зручним та ефективним (рисунок 1.15).

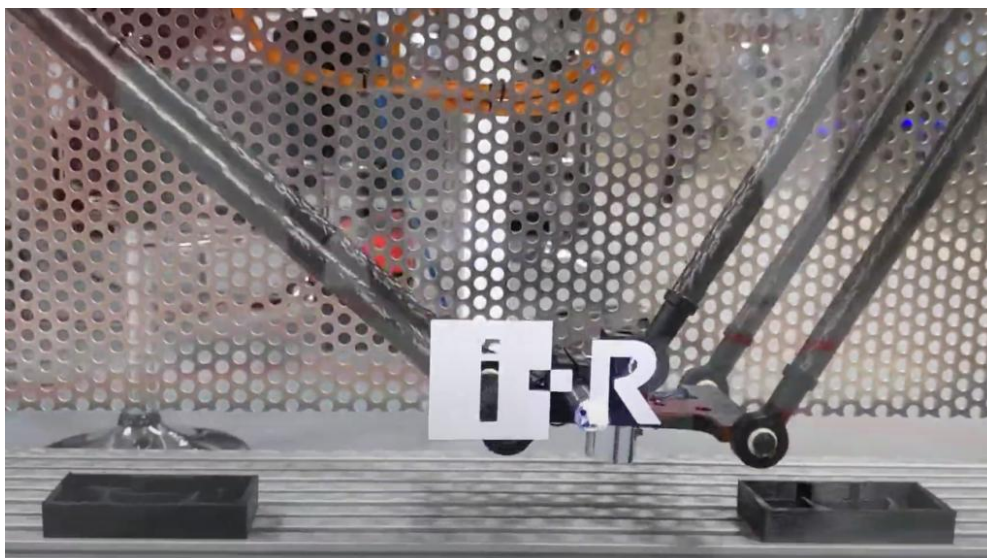


Рисунок 1.15 – Приклад 2D дельта-робота малюючого логотип на склі [15]

Отже, перенесення робочої області у вертикальну площину є виправданим кроком для обмежених просторів. Це рішення мінімізує займану площу та дозволяє ефективно використати об'єм приміщення. Хоча такий підхід і накладає деякі інженерні обмеження, за правильного виконання він забезпечує всі переваги паралельного робота в умовах, де обмежений простір є критичною складовою для організації виробництва.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз предметної області показав, що для автоматизації роботи в умовах обмеженого простору найбільш доцільним рішенням є використання паралельного 2D дельта-робота. Така система має просту та жорстку конструкцію,

забезпечує високу швидкість і точність переміщень у площині, а його компактні розміри дозволяють працювати навіть у настільному форматі.

За результатами дослідження та проведеного експерименту було визначено, що обмежений простір висуває особливі вимоги до підходу проектування робототехнічної системи. Правильно спроектований 2D дельта-робот, може якнайкраще відповідати цим критеріям, особливо при перенесенні робочої зони робота з горизонтальної площини у вертикальну, що дає змогу з більшою ефективністю використати систему в умовах обмеженого простору.

Отже, результати досліджень, проведених у цьому розділі, надають підґрунтя для подальшого розроблення й впровадження автоматизованої системи на базі 2D дельта-робота для роботи в умовах обмеженого простору.

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

2.1 Codian Robotics D2 Series

Codian Robotics – нідерландська компанія, що спеціалізується на розробці та виробництві роботів для промислового використання. Вона стала одним із провідних світових постачальників паралельних роботів без вбудованого контролера, які легко інтегруються в будь-яку автоматизовану систему. Серія D2 (рисунок 2.1) – це паралельні маніпулятори, призначені для переміщення у двох осьовому просторі з високою швидкістю та точністю. Вони ідеально підходять для задач сортування, пакування та операцій «взяти-поставити».



Рисунок 2.1 – Codian Robotics D2-800-S020 [16]

Технічні характеристики зазначені в таблиці 2.1 (дані можуть відрізнятись в залежності від конфігурації, оскільки дана модель виробляється у різних модифікаціях в залежності поставлених від задач).

Таблиця 2.1 – Codian Robotics D2-800-S020 [16]

Робоча область, мм	Маса, кг	Вантажопідйомність, кг	Точність, мм	Тип приводу
800 по X 477 по Y	45	5	$\pm 0,1$	Зовнішні сервоприводи

Дельта-роботи компанії Codian Robotics виготовляються зі сплаву алюмінію та вуглецевих композитів, що забезпечує жорсткість та надійність конструкції. За бажанням клієнта компанія пропонує окремий зовнішній актуатор для вертикального руху (по осі Z) або окрему серію D4.

2.2 BAT1000B-S60 Heavy Load Delta Robot

BAT-B1000B-S60 розроблений китайською компанією Robotphoenix Intelligent Technology – це паралельний 2D дельта-робот з можливістю піднімати до 60кг корисного навантаження (рисунок 2.2). Виробник позиціонує свій продукт як високошвидкісного промислового робота, який широко використовується для таких задач як сортування, обробка, транспортування, складання, фарбування та інших процесів.



Рисунок 2.2 – Дельта-робот BAT-B1000B-S60 компанії Robotphoenix [17]

Оптимізована конструкція з паралельною кінематикою робить структуру двохосьового дельта-робота швидшою та тихішою ніж у аналогів. Завдяки системі машинного зору, робот легко інтегрується з різними інтелектуальними системами. Також, за бажанням замовника на робот можна встановити додаткове корисне навантаження або різні типи захватів. Технічні характеристики зазначені в таблиці 2.2.

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – ВАТ-В1000В-S60 [17]

Робоча область, мм	Маса, кг	Вантажопідйомність, кг	Точність, мм	Тип приводу
1000 по X 1000 по Y	185	60	±0,0	Електродвигуни

Серед усіх наведених моделей у цьому розділі, ВАТ-В1000В-S60 є найбільш вантажопідйомним та важким роботом, що може бути важливим для певних специфічних задач, але ніяк не підходить для умов обмеженого просору.

2.3 GB-MH-DLT2 Delta robot

GB-MH-DLT2 – це високошвидкісний робот для захоплення та сортування об'єктів з конвеєрних стрічок (рисунок 2.3), створений індійською компанією Gridbots Technologies Private Limited, яка розробляє та виробляє промислові роботи, системи машинного зору, програмне забезпечення для керування роботами.



Рисунок 2.3 – Дельта-робот GB-MH-DLT2 компанії Gridbots Technologies [18]

Система постачається з інтегрованою системою машинного зору та кількома варіантами захоплювачів, що дозволяє користувачеві захоплювати об'єкти розміром від 2 до 250 мм (рисунок 2.4).

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

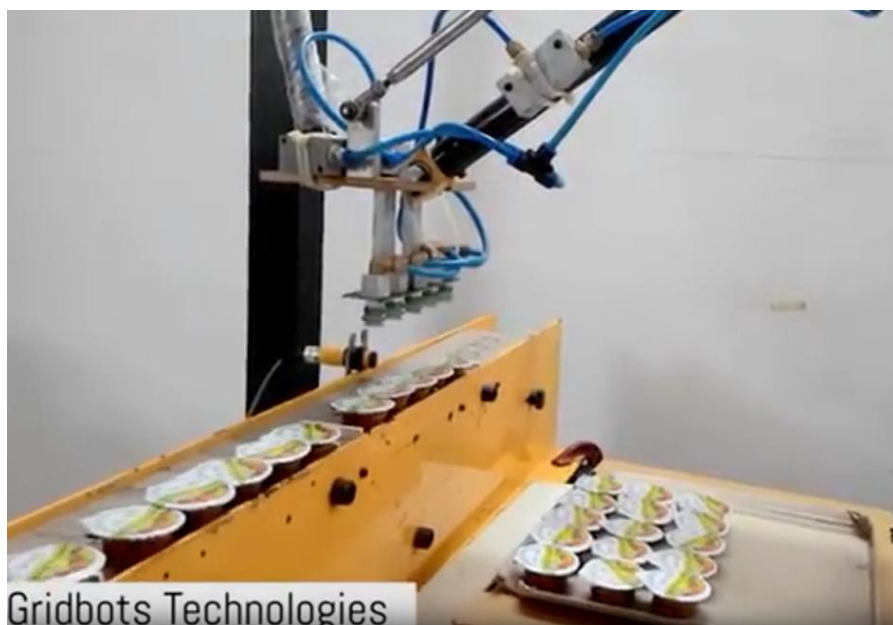


Рисунок 2.4 – GB-MH-DLT2 на лінії сортування [18]

Робот має міцну конструкцію з вуглепластиковими (карбоновими) важелями, що знижує момент інерції рухомих частин. Управління здійснюється за допомогою контролерів серії gridMOVE, які забезпечують низьке енергоспоживання та високу точність керування. Також, можливе керування системою за допомогою спеціального програмного забезпечення від виробника.

Технічні характеристики зазначені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – GB-MH-DLT2 [18]

Робоча область, мм	Маса, кг	Вантажопідйомність, кг	Точність, мм	Приводи
600 по X 300 по Y	20	5	$\pm 0,03$	Тип приводу

2.4 Delta Robot D2-1000-P5

Delta Robot D2-1000-P5 – це високошвидкісний 2-осьовий дельта-робот, розроблений компанією AtomRobot (Chenxing Automation Equipment). Призначений для виконання операцій таких як захоплення, сортування та обробка легких матеріалів у харчовій, фармацевтичній та інших галузях (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – D2-1000-P5 компанії AtomRobot [19]

Основні особливості даної моделі зазначені виробником на офіційному сайті продукту:

- 1) стандартний час циклу становить менше ніж 0,4 секунди, що відповідає вимогам максимальної швидкості та низької вартості;
- 2) спеціальна конструкція плоского паралельного механізму забезпечує високошвидкісний рух у площині за низької собівартості;
- 3) ідеально підходить для високошвидкісного виробництва у харчовій, фармацевтичній та інших галузях, переважно використовується для складання, переміщення, сортування тощо дрібних матеріалів.

Характеристики дельта-робота D2-1000-P5 наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – D2-1000-P5 [19]

Робоча область, мм	Маса, кг	Вантажопідйомність, кг	Точність, мм	Тип приводу
1000 по X 1000 по Y	55	5	±0,1	Серводвигуни

Наведена модель робота є аналогом серії Codian Robotics D2 та позиціонується як більш доступна за собівартістю альтернатива. Завдяки подібній до оригіналу паралельній конструкції, D2-1000-P5 забезпечує високу швидкість та точність маніпуляцій при нижчій собівартості, що робить її привабливим

рішенням для задач типу «взяти-поставити», сортування та пакування в умовах обмеженого бюджету.

Висновки до розділу 2

На основі розглянутих прикладів промислових реалізацій можна зробити висновок, що технологія 2D-дельта роботів не є настільки широко розвиненою та розповсюдженою як, наприклад, стандартний трьохосьовий дельта-робот. Проте, у промисловості вона все таки знаходить своє застосування у швидкісних сортувальних та складальних операціях. З розвитком компонентної бази (легкі матеріали, потужні приводи, дешеві контролери) доступність таких роботів зростає, відкриваючи шлях до широкого їх впровадження у різні сфери діяльності людини. Паралельні 2D дельта-роботи мають свої певні переваги та потенційно здатні працювати з високою ефективністю у таких умовах, де раніше роботизація була ускладнена через габаритні обмеження, і в подальшому відіграватимуть важливу роль у розвитку компактних робототехнічних рішень.

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ

3.1 Структурна схема

Структурна схема – схема, яка визначає основні функціональні частини виробу, їх взаємозв'язки та призначення [20]. Під функціональною частиною розуміють складову частину схеми: елемент, пристрій, функціональну групу, функціональну ланку.

У кресленику ІК11.280БАК.006 Д1 зображено структурну схему автоматизованої системи на базі дельта-робота, яка складається з дев'яти блоків відповідальні за різні частини її роботи.

У центрі розташований блок контролера, що виконує роль головного «мозку» – отримує від блоку програмування команди цільових координат каретки та зворотний зв'язок від датчиків положення, після чого формує імпульси керування для приводів.

Блок програмування, у нашому випадку це персональний комп'ютер, відповідає за підготовку траєкторії руху: на вхід він отримує X-Y-координати ефектора, а на виході обчислює кути обертання двох приводів та керує корисним навантаженням. Обмін інформацією між цим блоком і контролером здійснюється через блок комунікації (зазвичай це один з інтерфейсів комунікації які підтримує контролер), що забезпечує надійну та детерміновану передачу даних.

Блок живлення підтримує стабільну напругу необхідну для трьох підсистем: він живить контролер, блок руху, а також саме корисне навантаження встановлене на ефекторі (лазерний гравер, електромагніт або інший інструментальний модуль).

Блок драйверів є необхідним зв'язуючим елементом між блоком контроллера і блоком приводів.

Блок приводів приводить у рух кінематичну ланку дельта-робота, яка складається з активних плечі, що через шарніри з'єднані з пасивними плечами, які в свою чергу рухають ефектор.

Для контролю положення кожного приводу та попередженню колізій застосований блок датчиків положення. Отримані дані з датчиків повертаються в

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

блок контролера, де алгоритми коригують рухи для досягнення більшої точності.

Блок корисного навантаження реалізує прикладну функцію – захват, гравіювання або інший процес за командами від контролера.

3.2 Функціональна схема

Функціональна схема – схема, що роз'яснює певні процеси, що відбуваються у певних функціональних частинах виробу чи у виробі в цілому [21].

У кресленнику ІК11.280БАК.006 Д2 зображено функціональну схему автоматизованої системи на базі дельта-робота, на якій більш детально можна розглянути апаратну частину.

Модуль програмування – це персональний комп'ютер, на якому за допомогою спеціального програмного забезпечення генерується програма керування дельта-роботом.

Комунікація між персональним комп'ютером та мікроконтролером відбувається через інтерфейс комунікації, зазвичай це Ethernet, CAN-шина або інтерфейс UART з спеціальним протоколом.

Мікроконтролер є центром всієї системи, він отримує команди від модуля програмування, реалізує алгоритми інверсної кінематики та передає дані до драйверів. Також, він керує кінематичними ланками робота та окремо дає команди до блоку корисного навантаження, зчитує та аналізує дані з датчиків положення.

Джерело живлення відповідає за постачання електроенергії у систему. Воно стабілізує напругу і розподіляє її на мікроконтролер, драйвери двигунів та модуль корисного навантаження. Ці елементи підключаються до джерела живлення через окремі лінії, оскільки кожен модуль може мати різні вимоги до живлення, як, наприклад, різний вольтаж для стабільної роботи або запобіганню виникнення шумів від інших елементів системи.

Драйвери двигунів є необхідним зв'язуючим елементом між мікроконтролером та самими двигунами, вони приймають електричні імпульси

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

від мікроконтролера та перетворюють їх на кроки двигуна, тим самим обертаючи його. Також, живлення двигунів найчастіше відбувається через драйвери.

Крокові двигуни є приводами всієї системи, вони перетворюють електричні імпульси на обертальний рух. У випадку дельта-робота вони керують активними плечима, що через шарніри передають переміщення на пасивні тяги й ефектор.

Датчики положення зчитують кути обертання електродвигунів. Вони формують сигнал зворотного зв'язку, який надходить до мікроконтролера для корекції помилки позиціонування та запобігання колізій.

Останній елемент, це модуль корисного навантаження – це кінцевий інструмент який кріпиться напряму до ефектора (гравер, дозатор, захоплювач або інший пристрій). Він отримує напряму від мікроконтролера команди керування, увімкнення/вимкнення та живиться окремою лінією від блоку живлення.

Висновки до розділу 3

У результаті побудови структурної і функціональної схем, детально розглянуто основні модулі проєктованої системи та визначено їхні взаємозв'язки між собою. Структурна схема демонструє загальну архітектуру проєкту – основні блоки контролера, комунікації, програмування, живлення, приводів, датчиків положення, корисного навантаження та їхні з'єднання і взаємодію між собою, що дозволяє візуалізувати конфігурацію всієї системи й спланувати подальше розроблення. Функціональна схема розкриває апаратну частину роботи, відображає принцип взаємодії та передачі інформаційних потоків між окремими функціональними підсистемами, даючи можливість глибше зрозуміти структуру та взаємодію окремих модулів.

4 ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ І ПОБУДОВА СХЕМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ

4.1 Вибір мікроконтролера

Перед тим як перейти до проектування корпуса робота та створення 3D-моделі, потрібно обрати компоненти робота, такі як мікроконтролер, двигуни, датчики положення і т.д., щоб приблизно розуміти його характеристики та відштовхуватись від цих даних у подальшій розробці.

Основним та центральним компонентом будь-якої робототехнічної системи є мікроконтролер – своєрідний мозок робота, за допомогою якого він отримує всю необхідну інформацію і далі передає сигнали до інших пристроїв. З точки зору схемотехніки, мікроконтролер по суті є однокристальним комп'ютером, який містить в собі наступні елементи: центральний процесор, оперативну пам'ять, постійну пам'ять для зберігання програми, а також периферійні пристрої введення/виведення, наприклад порти для підключення датчиків, кнопок, двигунів. Ці пристрої знайшли широке застосування в обчислювальній техніці та використовуються майже в усіх галузях від комп'ютерної електроніки до авіакосмічної промисловості. Основними характеристиками на які звертають увагу при виборі мікроконтролера є:

- 1) архітектура та розрядність процесора;
- 2) тактова частота;
- 3) об'єм пам'яті;
- 4) кількість портів вводу/виводу;
- 5) вбудовані периферійні модулі.

Одною з найрозповсюдженіших архітектур є лінійка AVR – сімейство 8-бітових (іноді 32-бітових) мікроконтролерів, розроблених компанією Atmel. Основними їх перевагами є невелика, порівняно з аналогами, ціна, надійність, широка розповсюдженість та наявність великої кількості документації.

Для реалізації керування 2D дельта-роботом було обрано мікроконтролер ATmega328P на базі плати Arduino Nano (рис. 4.1).

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

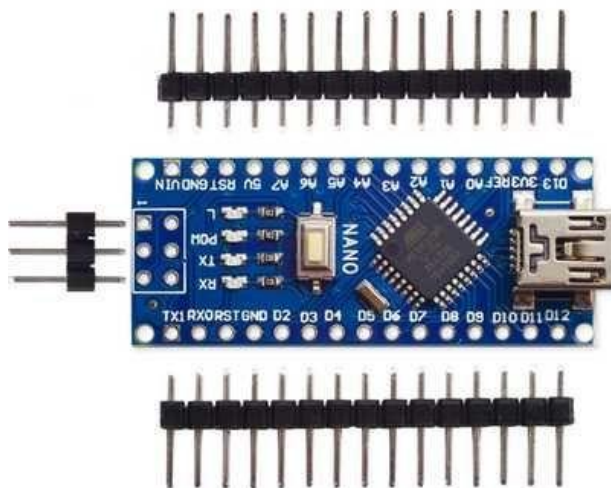


Рисунок 4.1 – Плата Arduino Nano з ATmega328P

Завдяки своєму компактному розміру, наявності 14 цифрових і 8 аналогових входів/виходів та великої кількості користувацьких бібліотек, ця плата є одним з найкращих варіантів для використання у проєкті. Чіпсет ATmega328P має достатню обчислювальну потужність для розрахунку алгоритмів кінематики, управління моторами й обробки сигналів у реальному часі. Основі характеристики плати наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристики Arduino Nano [22]

Мікроконтролер	Частота, МГц	Оперативна пам'ять, Кб	Постійна пам'ять, Кб	Кількість портів	Інтерфейс
ATmega328P (8-біт)	16	2	32	14 цифрових, 8 аналогових	UART

Також, не менш важливим фактором є те, що плати Arduino підтримуються у багатьох сучасних середовищах симуляції, що дозволяє перевіряти та налагоджувати роботів без необхідності мати доступ до фізичного обладнання. Завдяки цьому ми зможемо керувати роботом прямо з середовища для симуляції без необхідності написання додаткового програмного коду. Такий метод керування є найбільш розповсюдженим у промисловій робототехніці.

4.2 Вибір приводів

Після того як було обрано мікроконтролер, потрібно зрозуміти яким чином приводити в рух плечі дельта-робота? Для цього потрібно обрати відповідний тип приводу, який забезпечить необхідне обертання та переміщення елементів системи.

Найрозповсюдженіший тип приводів у робототехніці це електродвигуни. Електродвигун – це електротехнічний пристрій, який перетворює електричну енергію в механічну, він є важливим елементом у багатьох механізмах і використовується там, де потрібно рухати механічні частини, вузли та компоненти або генерувати механічну енергію (рисунок 4.2) [23].

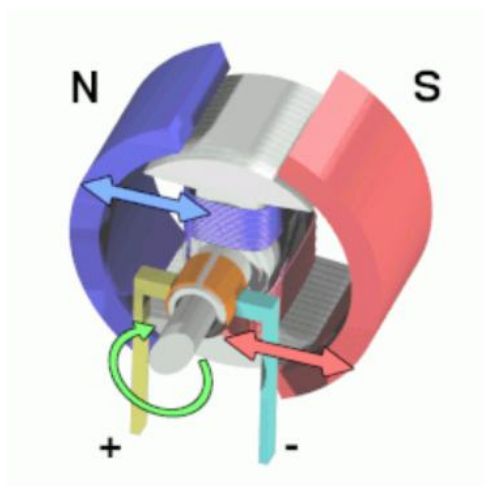


Рисунок 4.2 – Схема електродвигуна

Принцип роботи електродвигуна базується на явищі електромагнітної взаємодії. Основними частинами електродвигуна є статор (нерухомий елемент) і ротор (рухома частина, що обертається). У статорі розташовані обмотки, через які проходить електричний струм, створюючи магнітне поле. Ротор оснащений магнітами, які взаємодіють із цим полем, завдяки чому ротор починає обертатися, перетворюючи електричну енергію на механічну. Існує багато різновидів електродвигунів, серед яких двигуни постійного струму, змінного струму, крокові двигуни тощо.

Однією з основних характеристик електродвигунів, є крутний момент. Крутний момент (або момент сил) – векторна фізична величина, що дорівнює векторному добутку радіус-вектора r , проведеного від заданої точки (відносно якої він розраховується) до точки прикладення сили, на вектор цієї сили F , більш наочний приклад зображено на рисунку 4.3 [24].

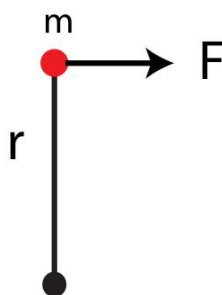


Рисунок 4.3 – Візуалізація крутного моменту [24]

Саме ця характеристика дозволяє оцінити, яку масу може підняти та утримувати кожний привід робота. Крутний момент позначається літерою τ та розраховується за формулою (4.1):

$$\tau = r * F. \quad (4.1)$$

Повертаючись до властивості електродвигунів, одним з найбільших їхніх недоліків є відсутність зворотного зв'язку, тобто, подаючи керуючі імпульси, відсутня можливість «зчитати» кут або швидкість обертання ротора. Саме тому базові електродвигуни (без додаткових контролерів та датчиків положення) майже не використовуються у високоточних роботах, адже їх недостатньо для точного позиціонування та контролю. Проте, таких недоліків частково позбавлені серводвигуни.

Серводвигун – це електромеханічний пристрій, що поєднує у собі електродвигун, датчик положення (потенціометр або енкодер) та електронний модуль керування. На відміну від звичайних двигунів, серводвигун може точно

обертатися на заданий кут і утримувати вал у цьому положенні. Система зворотного зв'язку дозволяє постійно контролювати поточний стан валу й коригувати його відповідно до команд, що надходять з мікроконтролера.

Головними перевагами серводвигунів є висока (порівняно з звичайними електродвигунами) точність позиціонування, стабільність утримання валу під навантаженням і простота інтеграції у робототехнічні системи. Серводвигуни здатні забезпечувати великий крутний момент і працювати як у режимі кутового позиціонування, так і в режимі безперервного обертання. Однією з найпопулярніших у робототехніці моделей є MG996R (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Серводвигун TowerPro MG996R [25]

MG996R – це компактний високоякісний аналоговий серводвигун з металевими шестернями редуктора, який забезпечує високий крутний момент і точне позиціонування. Ця модель доволі часто використовується у аматорських та професійних проєктах, завдяки доступності, високій якості та легкості інтеграції з популярними мікроконтролерами, такими як Arduino. Основні характеристики серводвигуна наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Характеристики Tower MG996R [25]

Тип	Матеріал шестерень	Крутний момент, кг*см	Швидкість обертання, с/60°	Споживання струму, А	Діапазон обертання, градуси
Аналоговий	Металеві	11	0,14	0,5-1,5	120

Як можна побачити в таблиці 4.2, MG996R має доволі великий крутний момент та швидкість обертання, проте варто зазначити, що крутний момент в характеристиках вказується на відстані одного сантиметра від осі обертання, а довжина одного плеча дельта-робота (враховуючи вимогу до компактності системи), буде приблизно 7-10 см, тому варто розрахувати яку вагу може підняти сервопривод на такій відстані. Для цього з формули (4.1) виводиться маса m та розраховується за формулою (4.2):

$$m = \frac{\tau}{r * g} = \frac{1.08 \text{ Н*м}}{0.1 \text{ м} * 9.81 \text{ м/с}^2} = 1.1 \text{ кг.} \quad (4.2)$$

Враховуючи, що дельта робот має два активних плеча, то в результаті виходить понад два кілограми на кінцях ланок для підйому корисного навантаження (та ваги конструкції самих ланок), що для більшості задач є цілком достатнім показником. Проте, варто також враховувати й деякі недоліки серводвигунів, по-перше, вони забезпечують неідеальну плавність руху та малу (порівняно з кроковими двигунами) роздільну здатність. Тому вони не підходять для таких високоточних задач як лазерне гравіювання або малювання. Також, при тривалому навантаженні або різких ривках, вони можуть нагріватися та споживати великий струм, що потребує якісного зовнішнього живлення. Роблячи підсумок, серводвигуни варто використовувати лише у задачах, в яких немає вимоги великої точності позиціонування або плавності руху, в інших випадках, рекомендується використовувати крокові двигуни.

Кроковий двигун – це тип електродвигуна, що здійснює обертальний рух за рахунок послідовної подачі електричних імпульсів на обмотки. На відміну від звичайних двигунів, ротор крокового двигуна переміщується дискретно – невеликими кроками на фіксований кут. Кількість кроків за повний оберт визначає роздільну здатність двигуна. Саме завдяки цій властивості, крокові двигуни використовуються частіше за всі інші види приводів у промисловій робототехніці, адже плавність руху та точність позиціонування зазвичай більш

важлива характеристика ніж вантажопідйомність.

Проте, одним з недоліків такого типу двигунів є відсутність зворотнього зв'язку, тобто не передбачена можливість визначення початкового положення валу двигуна, але є можливість програмно обчислювати кут обертання, в залежності від кількості кроків, на які повернувся ротор. Одним з прикладів таких приводів є кроковий двигун 28BYJ-48, який буде використовуватись для керування ланками дельта-робота.



Рисунок 4.5 – Кроковий двигун 28BYJ-48 [26]

Основні характеристики наведені у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Характеристики крокового двигуна 28BYJ-48 [26]

Тип	Напруга живлення, В	К-сть кроків/оберт	Передаточне число редуктора	Струм при навантаженні(макс), А	Крутний момент, Н*м
Уніполярний	12	2048	64:1	0.3	0.049

Як можна побачити в таблиці 4.3, кроковий двигун має роздільну здатність 2048 кроків на один оберт, це означає, щоб повернути вал мотора на 1 градус, потрібно зробити $2048/360 = 5.6$ кроків. Це і є ключова відмінність крокових двигунів від серводвигунів (які повертаються на один градус за один крок) та інших типів приводів. Така роздільна здатність дозволяє робити дуже точні та плавні рухи.

Проте, крокові двигуни мають і свої серйозні недоліки, по-перше, для керування необхідно мати спеціальні драйвери, які дозволяють точно

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

конвертувати сигнали від мікроконтролера у правильну кількість і напрямок кроків. По-друге, щоб визначити положення валу, треба використовувати сторонні датчики, такі як інкрементні енкодери або спеціальні limit switch. І останній, найбільший мінус крокових двигунів – це їхній крутний момент. Як можна побачити у таблиці 4.3, крутний момент двигуна 28BYJ-48 складає лише 0.049 Н*м, враховуючи попередню довжину ланок робота, підставляємо ці значення у формулу (4.2):

$$m = \frac{0.049 \text{ Н*м}}{0.1 \text{ м} * 9.81 \text{ м/с}^2} = 0.05 \text{ кг.} \quad (4.3)$$

Як результат, максимальна вантажопідйомність складає 50 грам на відстані 10 см, чого явно не достатньо навіть для підйому ваги ланок самого робота. У механіці для вирішення цієї проблеми використовується спеціальний пристрій – механічний редуктор.

4.3 Вибір типу редуктора та розрахунок його параметрів

Редуктор – це механічний пристрій, призначений для зменшення швидкості обертання і одночасного збільшення крутного моменту від двигуна до виконавчого механізму [27]. Редуктор складається з набору шестерень різного розміру, які передають обертальний рух від вхідного вала до вихідного, змінюючи співвідношення швидкості та сили. Завдяки цьому, робочий орган може отримувати більший крутний момент, втрачаючи при цьому у швидкості обертання.

Принцип роботи механічної передачі редуктора полягає у зміні передавального відношення між вхідним і вихідним валом. Коли двигун обертає малу шестерню (ведучу), вона, в свою чергу, приводить у рух велику шестерню (ведену) (рисунок 4.6). Завдяки цьому, вихідний вал обертається повільніше, але з більшим крутним моментом. Чим більше різниця у кількості зубців між шестернями, тим більший крутний момент та тим менше швидкість обертання на

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

виході. При правильному підборі передавального відношення, можна досягти оптимального співвідношення швидкості і крутного моменту для конкретного навантаження, що дозволяє двигуну працювати в найбільш економічному діапазоні обертів та мінімізувати споживання електроенергії. Проте, спочатку треба розібратись, які існують типи механічних передач у редукторах.

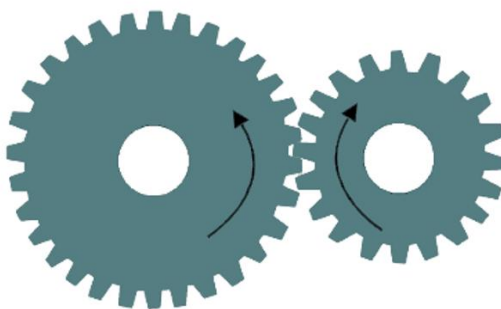


Рисунок 4.6 – Приклад базової механічної передачі

Існує кілька видів механічних передач. Основними з них є: зубчасті, планетарні, конічні, рейкові та черв'ячні передачі [28].

Зубчасті передачі складаються з шестерень, що повертають один одного за допомогою послідовної дії зубців, які перебувають у контакті, такі передачі бувають прямозубі, косозубі, конічні і т.д.

Рейкова передача являє собою механізм, що складається з плоскої рейки із зубцями та прямозубої шестерні. Її головна функція – перетворювати обертальний рух шестерні на поступальний (лінійний) рух рейки або навпаки.

Конічна передача – це тип зубчастої передачі, у якій обертальний рух і крутний момент передаються між валами, що перетинаються під певним кутом, найчастіше це 90° . Основними елементами такої передачі є конічні шестерні (зубчасті колеса), поверхня яких має форму конуса, а зубці розташовані під кутом до осі обертання.

Черв'ячна передача складається з двох елементів: черв'яка (гвинтоподібна шестерня) та черв'ячного колеса (зубчасте колесо). Особливістю такої передачі є те, що вісь черв'яка зазвичай перпендикулярна до осі колеса, а обертальний рух передається під кутом 90° . Черв'як своїми витками входить у зчеплення з зубцями

колеса, змушуючи його обертатися.

У випадку з дельта-роботом, для збільшення крутного моменту крокового двигуна буде використано редуктор з планетарною передачею. Планетарна передача – це один з різновидів зубчастої передачі, яка складається з трьох основних елементів: центральній (сонячній) шестерні, декількох сателітів (планетарних шестерень), що обертаються навколо сонячної шестерні, та зовнішнього кільцевого колеса з внутрішніми зубцями (епіциклу). Всі сателіти закріплені на рухомій ланці (водителі), яка обертається навколо центральній шестерні і є вихідною передачею (рис 4.7).

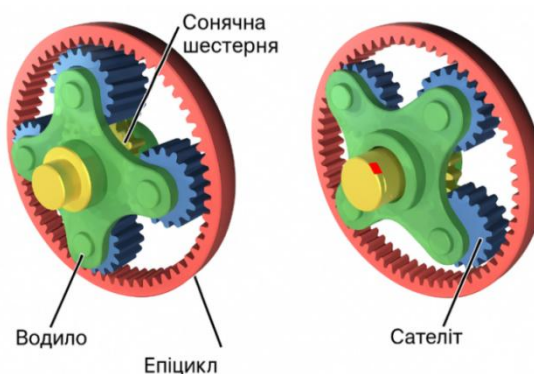


Рисунок 4.7 – Приклад планетарної передачі

Головна перевага такого механізму – це можливість передавати великий крутний момент при компактних розмірах і незначних механічних втратах, забезпечуючи плавний і рівномірний рух. Також, можна отримати різні передавальні відношення в залежності від того, який із елементів фіксується або приводиться в рух. Саме тому ця передача набула широкого використання у різних робототехнічних системах.

Перед тим як визначити характеристики самого планетарного редуктора, спочатку треба розрахувати, яке передаточне відношення треба для крокового двигуна 28BYJ-48, щоб мати можливість піднімати корисне навантаження та вагу конструкції ланок робота. Для прикладу, візьмемо вантажопідйомність у розмірі 0.8 кг на одне плече робота (враховуючи, що довжина плеча 10 см, цього буде цілком достатньо для більшості задач). З формули (4.2) виходить, що

вантажопідйомність двигуна на ланці 10 см розраховується за формулою (4.4):

$$m = \frac{M_p \cdot i}{r \cdot g}, \quad (4.4)$$

де i – передаточне відношення редуктора, M – крутний момент крокового двигуна (враховуючи встроєний редуктор 64:1), r – довжина радіус-вектора (активного плеча робота). З формули (4.4) виводиться передаточне відношення i та розраховується за формулою (4.5):

$$i = \frac{m \cdot r \cdot g}{M_p} = \frac{0.8 \text{ кг} \cdot 0.1 \text{ м} \cdot 9.81 \text{ м/с}^2}{0.049 \text{ Н} \cdot \text{м}} = 16.01. \quad (4.5)$$

Отже, необхідне передаточне відношення планетарного редуктора для крокового двигуна, щоб підняти навантаження 0.8 кг на ланці 10 см дорівнює 16:1.

Ще однією характерною особливістю планетарних редукторів є можливість їхнього під'єднання один до одного з метою збільшення передаточного відношення (рис. 4.8).

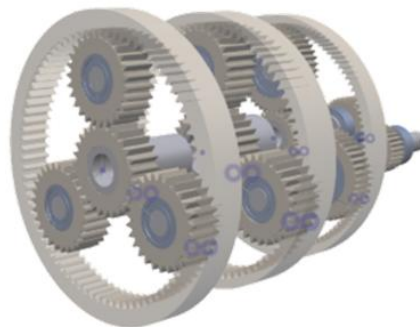


Рисунок 4.8 – Приклад з'єднання трьох планетарних редукторів [29]

Під'єднання один до одного редукторів створює багатоступінчастий планетарний редуктор, у якому декілька планетарних передач з'єднані послідовно для отримання більшого передаточного відношення при компактних габаритах. Це означає, що замість того щоб створювати один великий редуктор 16:1, можна

створити два маленьких з передаточним відношенням 4:1 та під'єднати їх послідовно один до одного, при цьому не втративши у компактності конструкції механізму. Скориставшись спеціалізованим онлайн-сервісом [30], можна без зайвих формул та обчислень розрахувати параметри планетарного редуктора. Розрахунок параметрів планетарного редуктора наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Параметри планетарного редуктора

Передаточне відношення	К-сть планет. шестерень	К-сть зубців планет. шестерні	К-сть зубців соняч. шестерні	К-сть зубців епіциклу	Кут розташування планет. шестерень
4:1	3	12	12	36	120

Використовуючи наведені розрахунки, у п'ятому розділі буде побудовано планетарний редуктор.

4.4 Вибір драйверів крокового двигуна

Для керування кроковими двигунами 28BYJ-48 обрано драйвер ULN2003 (рисунок 4.9). Це простий драйверний модуль на основі транзисторної збірки Дарлінгтона, який розроблений спеціально для керування кроковими двигунами уніполярного типу.



Рисунок 4.9 – Драйвер крокового двигуна ULN2003 [31]

ULN2003 легко поєднується з кроковим двигуном 28BYJ-48, оскільки має спеціальний роз'єм для підключення п'ятипровідного коннектора цього двигуна, що знижує ризик помилки при підключенні. Драйвер приймає цифрові сигнали з Arduino, STM32 або іншого мікроконтролера, а далі комутує фази мотора відповідно до алгоритму крокування. Така схема дозволяє керувати напрямком та швидкістю обертання крокового двигуна без додаткових налаштувань та маніпуляцій при підключенні. Також, драйвер має вбудований захист від перевантажень і сумісний з напругою живлення двигуна до 12В. Для більш точного крокування можна використати потужніші драйвери, наприклад: A4988, ULN2803, L293D, але для цього потрібні додаткові маніпуляції при підключенні та модифікація крокового двигуна.

4.5 Обрання датчиків положення

При використанні крокових двигунів у робототехніці, необхідно якимось чином розуміти положення валу та його кут обертання. Існує кілька варіантів вирішення цієї проблеми.

Перший спосіб, якщо немає можливості встановити датчики позиціонування, можна програмно задати нульове положення двигунів, але при цьому треба слідкувати, щоб при вмиканні та вимиканні робота він завжди знаходився у одній і тій самій точці (яку визначено як нульову). Цей спосіб є дуже ненадійними і майже ніколи не використовується, оскільки будь-який різкий рух або випадкова зміна положення валу збивають позиціонування робота.

Другий спосіб полягає у визначенні положення крокових двигунів за допомогою інкрементальних або абсолютних енкодерів, проте це призводить до ускладнення конструкції робота, адже енкодер потрібно монтувати на вал самого двигуна. Також, якісні енкодери є доволі дорогими та габаритними, саме тому вони не використовуються у межах дипломного проекту.

Останній спосіб є більш надійним та широко застосовується у 3D-принтерах. Для його реалізації використовується спеціальний Limit switch (кінцевий

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

вимикач). Це електромеханічний пристрій, який реагує на досягнення механізмом певної крайньої позиції та розмикає або замикає електричний ланцюг. Найчастіше, це компактний мікровимикач з важелем, кнопкою або роликом, який спрацьовує при фізичному натисканні (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Limit switch, який використовується у 3D-принтерах [32]

У системах із кроковими двигунами limit switch найчастіше використовуються як сенсори «нуля». Наприклад, при запуску 3D-принтера механізм виконує процедуру “homing” – рухається у напрямку кінцевика до його спрацьовування, який повідомляє контролеру, що досягнуто фізичного кінця або нульової точки координат [33]. Це дозволяє уникнути втрати синхронізації та забезпечити точне позиціонування, оскільки кроковий двигун сам по собі не має зворотного зв’язку.

Використання такого пристрою є найкращим варіантом для дельта-робота, оскільки він є компактным, дешевим та легко інтегрується в систему.

4.6 Побудова схеми підключення

Електрична схема підключення 2D дельта-робота зображена у кресленнику ІК11.280БАК.006 ЭЗ до дипломного проекту.

Як можна побачити на схемі, основним елементом системи є плата Arduino Nano, вона керує кроковими двигунами, зчитує дані з датчиків та отримує

команди від ПК через спеціальний інтерфейс.

Два драйвери ULN2003 підключені до Arduino через цифрові виходи, для керування одним двигуном використовується по чотири піни на платі. Лінії керування від Arduino Nano ведуть до відповідних входів кожного драйвера, а виходи ULN2003, через п'ятипровідні шлейфи підключені до крокових двигунів. Таке підключення забезпечує індивідуальне керування кожним двигуном в незалежності один від одного.

Два кінцевих вимикачі підключені до цифрових пінів D11, D12, вони дають можливість виконання дельта-роботом процедури “homing” та захищають від перевищення допустимого діапазону обертання мотора.

Живлення подається від зовнішнього адаптера до живильної шини системи. Через окремі лінії підведено живлення до драйверів ULN2003 і самих крокових двигунів. Arduino Nano підключене до цієї ж живильної шини, що дозволяє використовувати єдиний блок живлення для всієї системи. В якості блока живлення було обрано стандартний блок на 12В та 5А, його цілком вистачить для живлення всієї системи.

Висновки до розділу 4

У даному розділі проведено детальний аналіз і обґрунтовано вибір основних компонентів для побудови 2D дельта-робота.

Центральним елементом обрано плату Arduino Nano з чіпом ATmega328P, адже завдяки її доступності, компактності та кількості портів вона легко інтегрується у систему дельта-робота.

У результаті порівняльного аналізу різних видів приводів, було вирішено, що оскільки система розробляється для задач, де ключовими є точність позиціонування і плавність ходу, то у проєкті будуть використовуватися крокові двигуни 28BYJ-48.

Для компенсації недостатнього крутного моменту крокових двигунів, у конструкції передбачено застосування планетарного редуктора з окремо

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахованими параметрами та передаточним відношенням, який буде побудовано у наступному розділі.

Окрему увагу приділено вибору драйверів для керування кроковими двигунами, в результаті обрано драйвер ULN2003 через його простоту та доступність, але також представлені й можливі альтернативи.

В якості датчика положень до схеми було додано кінцеві вимикачі (limit switches), завдяки яким є можливість визначення початку відліку координат крокових двигунів.

Також, у розділі наведено та детально розібрано електричну схему підключення всіх модулів системи.

5 ПОБУДОВА 3D-МОДЕЛІ РОБОТА

5.1 Обрання середовища та методу моделювання

На основі проведених у попередніх розділах досліджень та розрахунків, наступним етапом є створення 3D-моделі робота, яка потрібна для подальшого тестування та симуляції. Для цього використовується спеціалізоване середовище, яке називається САПР (система автоматизованого проєктування), це комп'ютерна система, яка дозволяє інженерам та конструкторам створювати, редагувати та аналізувати моделі виробів чи об'єктів у цифровому вигляді. Основне призначення САПР – автоматизація процесу проєктування, за допомогою таких систем можна створювати як прості двовимірні креслення, так і складні 3D-моделі, виконувати розрахунки та готувати технічну документацію.

Перед тим як визначитися безпосередньо з програмою, потрібно обрати метод моделювання, користуючись яким буде створена трьохвимірна модель робота. Для інженерних цілей найчастіше використовується метод параметричного моделювання, який базується на створенні об'єкта з використанням геометричних параметрів і залежностей. Користувач задає розміри, радіуси, кути тощо, а система автоматично оновлює модель при зміні параметрів. Інший популярний метод – полігональне моделювання, його суть полягає у створенні об'єктів шляхом маніпуляції з сіткою, полігонами та вершинами, такий підхід найчастіше застосовується у промисловому дизайні та архітектурі. Проте, цей метод не буде використовуватись для моделювання системи, оскільки для створення робота потрібно задавати чіткі розміри та залежності, що набагато краще реалізовано у параметричному методі, ніж у полігональному.

Визначившись з методом моделювання, потрібно обрати програмне середовище в якому безпосередньо буде створена 3D-модель. Одним з найкращих варіантів для цієї задачі є програма Fusion360. Це сучасна хмарна САПР-система, розроблена компанією Autodesk для 3D-моделювання, інженерного аналізу та створення креслень. Програма підтримує параметричне, твердотільне та полігональне моделювання, що дозволяє створювати деталі будь-якої складності.

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільшою перевагою цього ПЗ є сервіс, який дозволяє завантажувати 3D-моделі прямо в «хмару», без необхідності їх зберігання у пам'яті комп'ютера. Також, компанія Autodesk надає безкоштовну студентську ліцензію для використання даного середовища.

5.2 Створення основних деталей робота

Першою створеною деталлю дельта-робота є планетарний редуктор, параметри якого були розраховані у попередньому розділі. Модель редуктора складається з наступних частин:

- 1) центральної (сонячної) шестерні;
- 2) трьох сателітів (планетарних шестерень);
- 3) епіциклу, (зовнішнього кільцевого колеса з внутрішніми зубцями, яке також буде корпусом самого редуктора);
- 4) проміжного водила (на якому закріплені планетарні шестерні), яке також буде слугувати з'єднанням між редукторами;
- 5) кінцевого водила, на яке безпосередньо буде кріпитись плече робота;
- 6) заглушки, яка буде закривати корпус з шестернями.

Для більш точного моделювання, доцільно спочатку завантажити референсну модель крокового двигуна, на вал якого кріпиться сонячна шестерня. Після чого переходимо до створення основних компонентів (рис. 5.1).

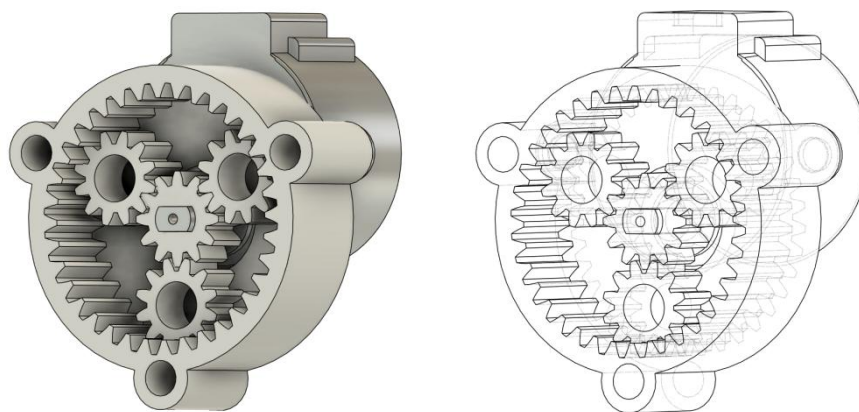


Рисунок 5.1 – Планетарний редуктор 4:1 у розрізі

Згідно розрахункам проведеними у четвертому розділі, для оптимальної вантажопідйомності робота, потрібно мати планетарний редуктор з передаточним відношенням принаймні 16:1. Щоб досягти бажаного результату, потрібно створити ще один 4:1 редуктор та послідовно під'єднати їх один до одного. Для цього спочатку створюються частини яких не вистачає, та проводиться попередня збірка деталей (рис 5.2).

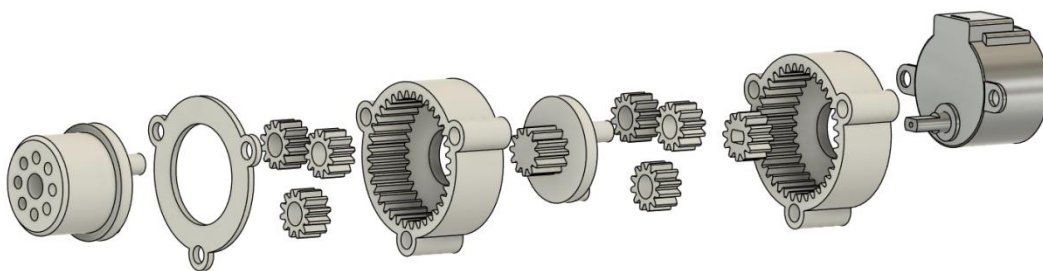


Рисунок 5.2 – Компоненти двоступінчастого планетарного редуктора

Тепер, упевнившись що всі компоненти стикаються правильно та без зазорів, проводиться повна збірка редуктора. Спочатку кріпиться перший редуктор на кроковому двигуні, та через проміжне водило під'єднується другий редуктор (рис. 5.3).

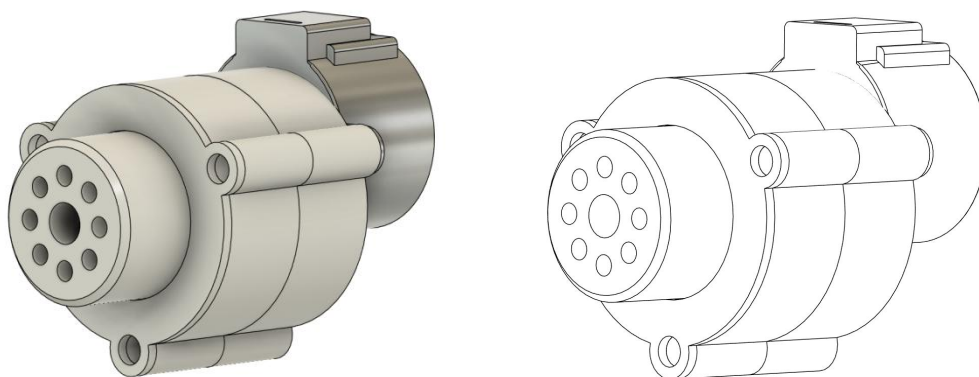


Рисунок 5.3 – Зібраний планетарний редуктор 16:1

Наступним етапом є створення верхньої основи, до якої кріпитимуться приводи дельта-робота (рис 5.4).

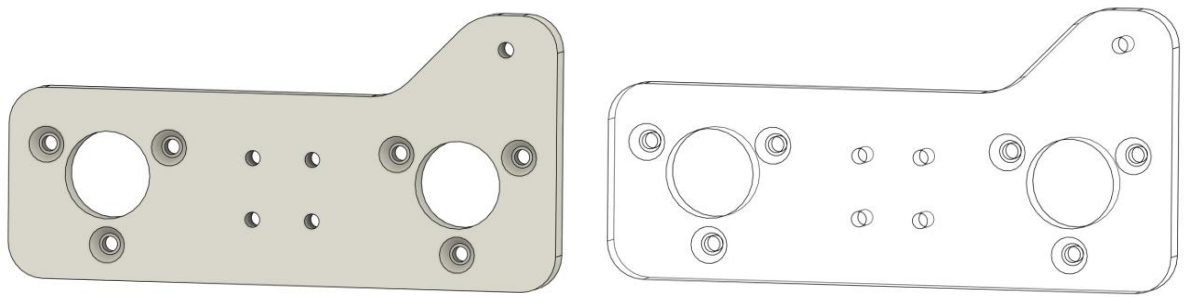


Рисунок 5.4 – Основа платформа робота

На рисунку 5.4 зображена платформа основи дельта-робота у конфігурації з кріпленням під крокові двигуни. Загальна товщина платформи 7 мм, чого цілком достатньо для забезпечення жорсткості конструкції, у центрі передбачено чотири отвори для кріплення до спеціального тримача рами, отвори для крокових двигунів мають додаткові фаски, щоб головки болтів не заважали рухам активного плеча. У правому верхньому куті передбачено отвір для кріплення допоміжної ланки дельта-робота. Відстань між осями приводів складає 10 см.

Наступним етапом є створення активного плеча дельта-робота (рис 5.5).

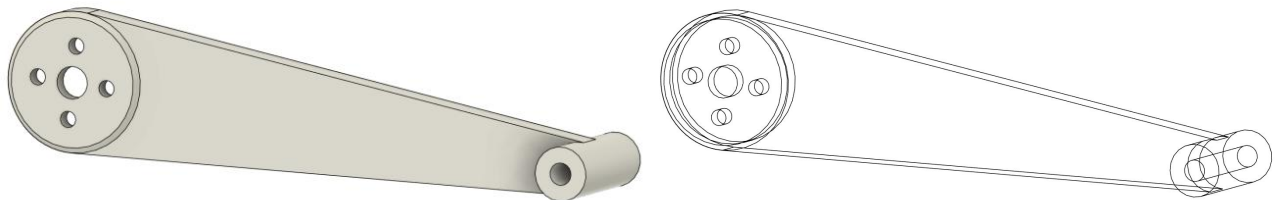


Рисунок 5.5 – Активне плече дельта-робота

Оскільки активне плече бере на себе усе навантаження нижньої частини конструкції та робочого органу, його спроектовано так, щоб унеможливити будь-які вертикальні деформації. Відстань між осями першого кріплення (до приводу) та другого (до якого приєднується коннектор та пасивні ланки) дорівнює 10 см, саме відносно цього параметру розраховувалось навантаження на плече робота. Також, каретку першого кріплення спроектовано так, щоб була можливість приєднання до редуктора крокового двигуна за допомогою болтів М4.

Не менш важливим елементом робота є спеціальний коннектор, який кріпиться до активного (правого) плеча дельта-робота (рис. 5.6).

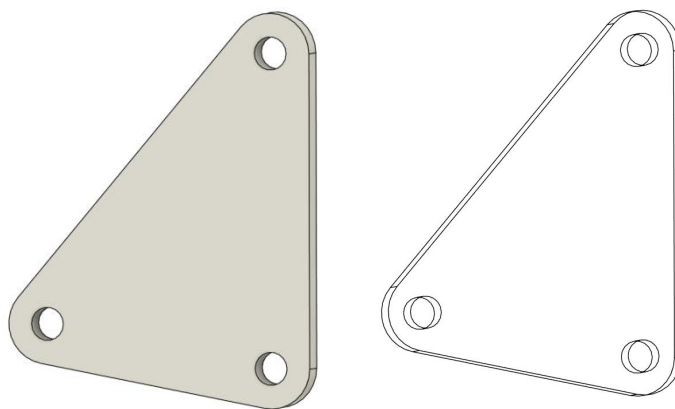


Рисунок 5.6 – Коннектор

Основна задача цієї деталі полягає у з'єднанні двох допоміжних ланок, які забезпечують паралельність ефектора відносно основи робота.

У більшості паралельних роботів для з'єднання ланок використовують сферичні шарніри. Їхня конструкція складається з кулькової головки, що розміщується у сферичному гнізді (обоймі), завдяки такій конструкції, кулькова головка може необмежено обертатися всередині гнізда. Проте, такі шарніри є доволі рідкісними і дорогими. Також, вони не підходять для 2D дельта-роботів, оскільки у цьому випадку потрібна лише одна вісь обертання для правильної роботи кінематики. Тому, наступним елементом спроектовано шарнірний механізм (рис 5.7).

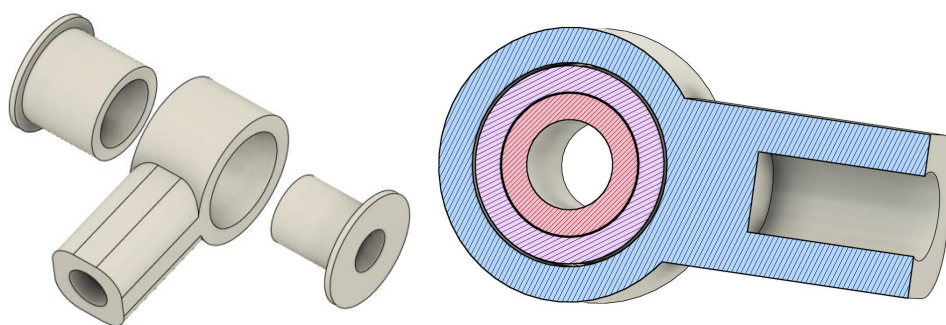


Рисунок 5.7 – Шарнір обертання

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ІК11.280БАК.006 ПЗ

Арк.

53

Конструкція шарнірного механізму складається з трьох основних елементів: гнізда (найбільша частина, яка кріпиться до циліндричної шпильки, що виступає у ролі пасивної ланки), циліндру ковзання (елемент який виступає у ролі «кулькової головки» і обертається всередині гнізда), заглушки (вставляється у циліндр ковзання, тим самим закриваючи весь механізм). Такий шарнірний механізм дозволяє обертатись усім ланкам робота не менш ефективно, ніж з справжнім шарніром, також, при правильних налаштуваннях 3D-друку ця конструкція є надійною і не має люфту між рухомими частинами.

Наступним етапом створюється кінцевий орган дельта-робота, який називається ефектором (рис. 5.8).

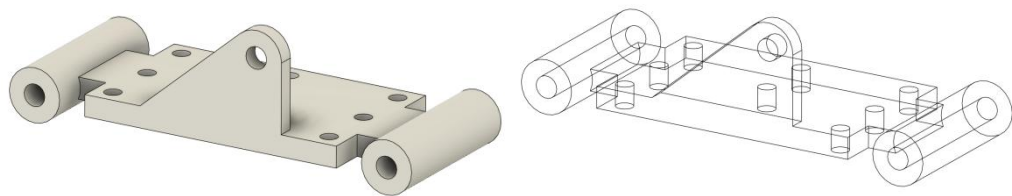


Рисунок 5.8 – Ефектор

Ефектор є кінцевим елементом конструкції робота і проєктується так, щоб витримувати вагу корисного навантаження. З двох сторін деталь має отвори для кріплення пасивних ланок. Також, присутнє додаткове кріплення для допоміжних ланок, які забезпечують паралельність ефектора відносно основи робота.

У якості пасивних плечей використовується металева шпилька М4, з приєднаними по краях шарнірними механізмами (рис 5.9).

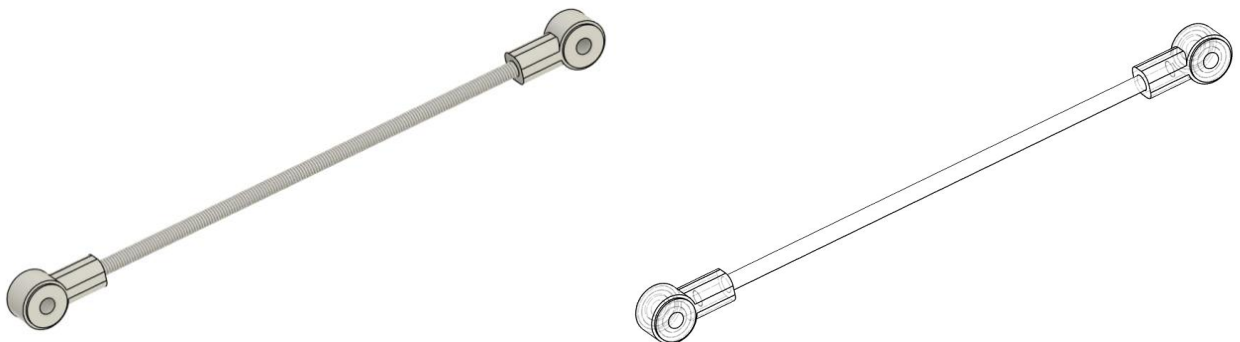


Рисунок 5.9 – Пасивне плече дельта-робота

Застосування металевої шпильки обумовлене тим, що при використанні пластикового елемента такої довжини, він неминуче буде деформуватися під вагою конструкції, в результаті чого буде ламатися. Металевий елемент, в свою чергу, має достатню жорсткість та невелику вагу, що ідеально підходить для такої задачі. Всього у конструкції використовується п'ять плечей: чотири великих (відстань між осями обертання 15 см) та одне маленьке (10 см між осями обертання).

У якості елементів з'єднання у всій конструкції використовуються стандартні болти та гайки формату М4 з довжиною різьби від 20мм до 50мм. Також, варто зазначити, що всі компоненти розроблені так, щоб їх було легко друкувати на 3D-принтері, не використовуючи саппорти (допоміжні конструкції, які додаються до моделі для підтримки нависаючих або складних елементів), що суттєво спрощує та покращує якість друку.

5.3 Розрахунок ваги конструкції

Після побудови усіх деталей робота, розраховується вага його конструкції, щоб впевнитись, що крутного моменту приводів достатньо для виконання маніпуляцій. Щоб дізнатись вагу кожного компоненту, у властивості Properties назначається матеріал на кожну деталь. Для пластикових елементів виставляється ABS (різновид пластику для 3D-друку), для металевих – алюміній. У таблиці 5.1 наведено вагу кожної деталі.

Таблиця 5.1 – Вага деталей робота

Назва деталі	Кількість	Вага, гр
Активне плече	2	26.2
Коннектор	1	6.1
Пасивне плече(з шарнірами)	4+1	64.3+12.2
Ефектор	1	11.8
Інше (болти та гайки)	7	25.4

Отже, загальна вага усіх (рухомих) ланок робота складає 0.146 кг. Враховуючи, що розраховане навантаження у конфігурації з кроковими двигунами складає 1.6 кг, то допустиме корисне навантаження (зазвичай береться 70–80% від розрахованого значення) складає понад 1 кг, що для невеликого робота є дуже гарним значенням.

5.4 Збірка дельта-робота

Після побудови усіх компонентів, необхідно провести повну збірку системи. У Fusion 360 для цього передбачено спеціальний розділ Assembly (Збірка), деталі розміщуються у просторі та фіксуються одна відносно одної за допомогою обмежень та зв'язків. Для правильної взаємодії компонентів використовують інструмент Joint – він дозволяє задавати типи з'єднань (фіксовані, обертальні, ковзаючі тощо) та зв'язувати деталі відповідно до конструкції виробу. Також, можна використовувати команду As-Built Joint, якщо деталі вже розташовані у потрібних позиціях.

Першочергово збирається верхня частина дельта-робота. Для цього редуктори кріпляться на основі у спеціально відведені для цього місця та задається фіксований тип з'єднань (рис 5.10).

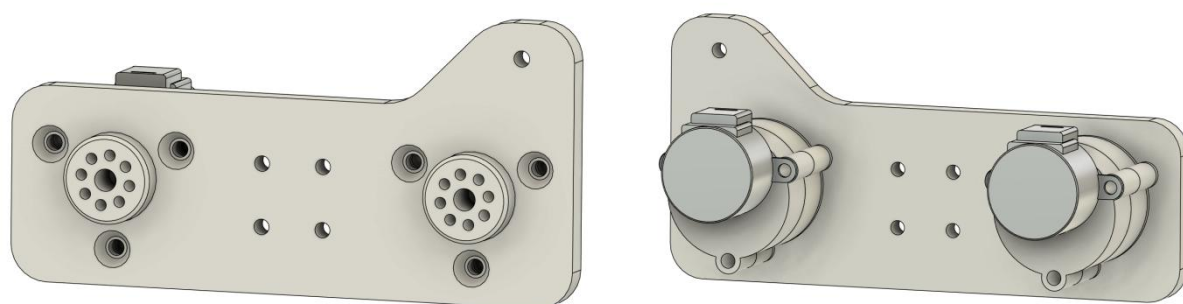


Рисунок 5.10 – Основна платформа робота у збірці з редукторами

Наступним кроком потрібно під'єднати активні плечі до спеціальної каретки на редукторі, також, щоб плечі оберталися разом кареткою, потрібно

задати обертальний тип з'єднань та встановити ліміти на кути обертання (рис. 5.11).

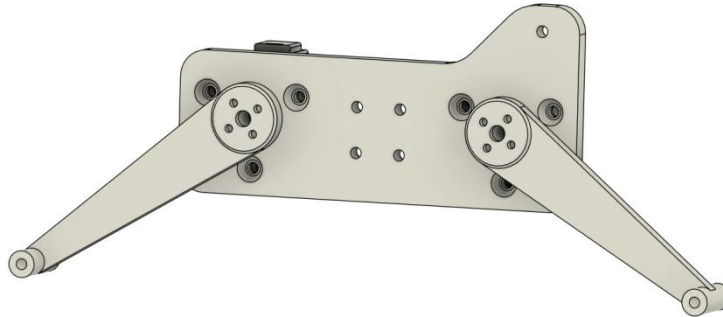


Рисунок 5.11 – Під'єднання активних плечей до редукторів

Далі під'єднуються пасивні плечі до активних, необхідно встановити обертальний тип з'єднань, задавати ліміти у цьому випадку не обов'язково. Також, до нижніх частин плечей одразу варто під'єднати ефектор (рис. 5.12).

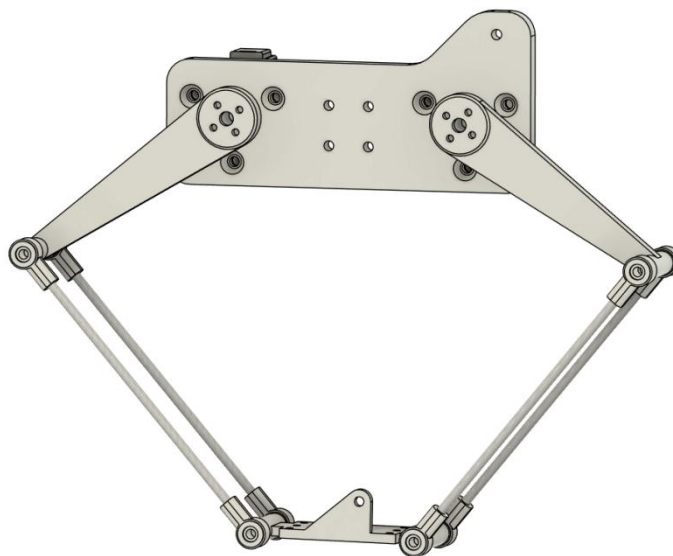


Рисунок 5.12 – Під'єднання пасивних плечей та ефектора

Наступним етапом будується допоміжна ланка дельта-робота. Вона складається з маленького плеча (яке кріпиться до основи робота), великого плеча (кріпиться до ефектора) та коннектора (з'єднує маленьке та велике плече й під'єднується до правої активної ланки). Типи усіх з'єднань – обертальні.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ІК11.280БАК.006 ПЗ

Арк.

57

Основна задача такої конструкції – забезпечити паралельність ефектора відносно основи робота (рис 5.13).



Рисунок 5.13 – Допоміжна ланка дельта-робота

Останнім етапом допоміжна ланка під'єднується до всієї конструкції, в результаті отримуємо готову збірку дельта-робота (рис 5.14).

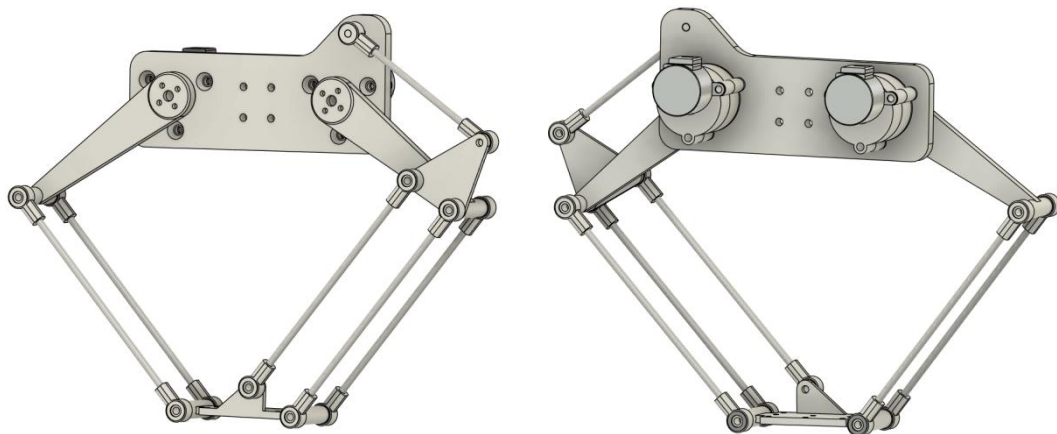


Рисунок 5.14 – Повністю зібрана конструкція 2D дельта-робота

Складальна схема та усі розміри конструкції наведенні у кресленнику ІК11.280БАК.006.00 СБ.

В додачу до дельта-робота окремо розроблено раму, до якої він кріпиться. Основою рами є сталеві трубки діаметром 10мм, такої товщини достатньо для жорсткості та надійності усієї конструкції. Для з'єднань використовуються

спеціально спроектовані кутники, які стягують трубки під кутом 90 градусів. Також, додатково спроектовано спеціальну деталь, яка кріпиться у верхній частині і є з'єднувальним елементом між роботом та самою рамою. Для стабілізації конструкції створено два окремих елементи, які кріпляться у нижній частині рами і не дають їй впасти (рис. 5.15).

Складальна схема та усі розміри рами наведені у кресленику ІК11.280БАК.006.01 СБ.

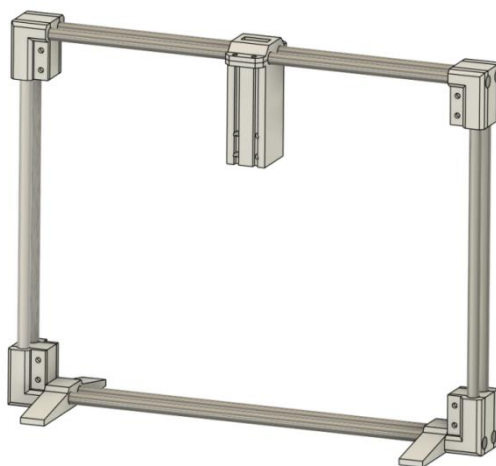


Рисунок 5.15 – Рама для монтажу дельта-робота

Монтаж дельта-робота на конструкції рами зображено на рисунку 5.16. Загальний вид усієї збірки наведено у кресленику ІК11.280БАК.006 ВО.

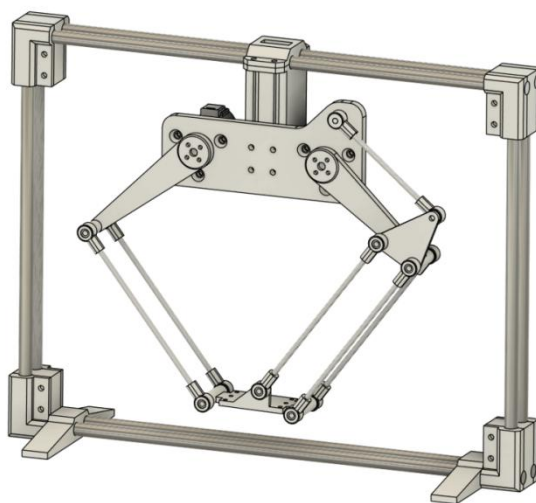


Рисунок 5.16 – Дельта-робот у збірці з рамою

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ІК11.280БАК.006 ПЗ

Арк.

59

Висновки до розділу 5

У даному розділі було проаналізовано та обґрунтовано вибір середовища моделювання та методу створення 3D-моделі дельта-робота. Параметричний підхід, реалізований у програмі Fusion 360, дав змогу розробити всі основні компоненти конструкції з точним урахуванням розмірів та функціональних з'єднань. У результаті створено повноцінну збірку дельта-робота, яка складається з наступних компонентів: планетарні редуктори, основна платформа, активні й пасивні плечі, ефектор, коннектор та шарніри.

Розрахунок маси рухомих ланок конструкції підвертив проведений у попередньому розділі аналіз навантаження та правильність підбору редуктора.

Фінальна збірка моделі робота з рамою дає можливість підготувати систему до подальшого тестування, симуляцій і закладає основу для виготовлення реального прототипу.

6 АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ ТА РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ

6.1 Поняття прямої та інверсної задачі кінематики

Для забезпечення точного управління дельта-роботом потрібно встановити залежність між кутами обертання його з'єднань та положенням ефектора. Для цього в робототехніці існують дві основні задачі кінематики: пряма та інверсна. Пряма задача кінематики полягає у обчисленні координат ефектора за відомими кутами оберту моторів. Інверсна задача є більш поширеною використовується для керування майже будь-яким роботом, вона є оберненим процесом до прямої задачі – обчислення кутів обертання двигунів за відомими координатами ефектора. Іншими словами, пряма кінематика відповідає на питання «куди дістанеться робочий орган при заданих поворотах двигунів», тоді як інверсна – «як повинні повернутися двигуни, щоб робочий орган опинився в потрібній точці».

6.2 Аналіз кінематичної структури 2D дельта-робота

Стандартний 2D дельта-робот має конструкцію п'ятиланкового механізму (рис. 6.1).

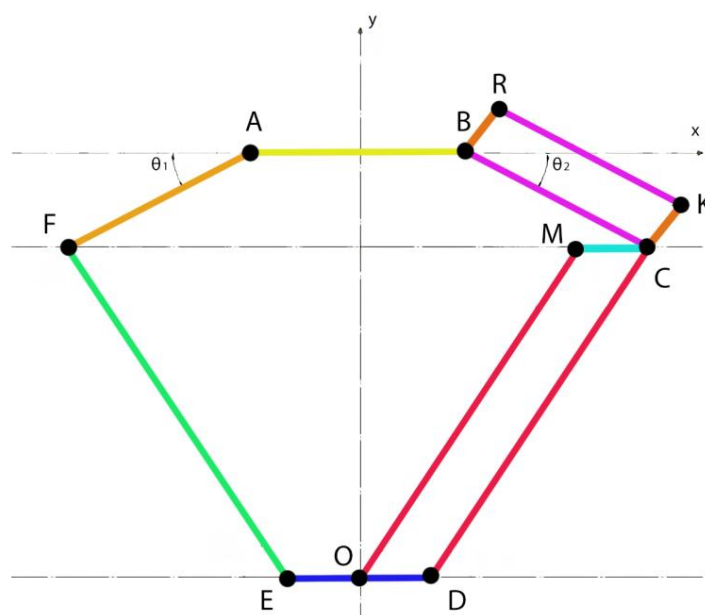


Рисунок 6.1 – Схема кінематичних ланок 2D дельта-робота

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Як показано на кінематичній схемі (рис. 6.1), всі ланки розташовані в площині (XY). Точки А і В є нерухомою базою робота, до яких кріпляться електроприводи, і ці точки, відповідно, є осями їхнього обертання. Важелі AF та BC є активними (ведучими) плечима робота, ланки CD і FE, з'єднані шарнірними механізмами з AF та BC, є пасивними (веденими) плечима. Ланка ED виконує роль кінцевого ефектора, до якого кріпиться корисне навантаження. У такій конфігурації робот має два ступені свободи і може переміщувати свій кінцевий ефектор у площині X-Y [34].

Щоб кінцевий ефектор ED не обертася навколо своєї осі під час руху і завжди залишався паралельним до базової ланки АВ, у конструкції передбачено паралелограмний важільний механізм: ведучий важіль BC та додатковий важіль RK виконані паралельними один до одного, утворюючи паралелограм BRKC, так само, як додатковий важіль MO паралельний DC, утворюючи паралелограм OMCD. Важіль MO під'єднаний до ефектора в точці О та до важеля RK через спеціальний коннектор КСМ, який обертається навколо осі С. Така конструкція забезпечує постійно горизонтальне положення ефектора ED при різних кутах обертання приводів.

6.3 Пряма задача кінематики

Задача прямої кінематики полягає у визначенні координат ефектора $O(x;y)$ за відомими кутами обертів приводів. Алгоритм вирішення цієї задачі виглядає наступним чином:

- 1) за властивістю проекцій обчислюються координати точок F,C;
- 2) знаходиться довжина відрізка FC, та проводиться перевірка на досяжність;
- 3) записується рівняння перетину двох кіл (перше коло з центром F, та радіусом FE; друге коло з центром C та радіусом CD). Також, обов'язково враховується зміщення ефектора по осі X;

4) у процесі розв'язку отримуємо лінійну залежність у від x. Після цього у підставляється у одне з рівнянь системи;

5) в результаті розв'язку квадратного рівняння отримаємо систему розв'язків $O[(x_1; y_1), (x_2; y_2)]$;

6) останнім етапом обирається фізично коректний розв'язок, провівши перевірку завчасно встановленої умови.

Більш детальний алгоритм розв'язку задачі наведено у кресленику ІК11.280БАК.006 ДЗ до дипломного проєкту. Роблячи висновок, задача прямої кінематики є доволі громіздкою та важко розраховується, саме тому у більшості робототехнічних систем для керування використовуються алгоритми інверсної кінематики, де обрахунок ведеться від координат робочого органу, а не початкових кутів.

6.4 Інверсна задача кінематики

Інверсна кінематика полягає у визначенні кутів обертання приводів для досягнення заданого положення кінцевого ефектора. Зазвичай, саме алгоритми інверсної кінематики використовуються для безпосереднього керування роботами, оскільки найчастіше відоме бажане положення робочого органу у просторі і треба вирахувати кути щоб дістатися цього положення.

У випадку з дельта-роботом це означає: за заданими координатами ефектора $O(x; y)$ треба знайти кути повороту лівого і правого плеча (θ_1, θ_2 відповідно), за якими буде встановлено платформу у бажане положення.

Алгоритм вирішення цієї задачі виглядає наступним чином:

- 1) знаходяться координати точок E, D кінця ефектора;
- 2) проводиться уявний відрізок AE, знаходиться його довжина, робиться перевірка на досяжність;
- 3) за теоремою косинусів знаходиться кут EAF;
- 4) проводиться уявний відрізок BE, знаходиться його довжина;
- 5) за теоремою косинусів знаходиться кут EAB;
- 6) за властивістю кутів знаходиться шуканий кут θ_1 ;
- 7) кроки 2-7 повторюються симетрично для знаходження кута θ_2 .

В результаті розв'язку інверсної задачі розраховано кути θ_1 , θ_2 повороту двигунів дельта-робота. Більш детальний алгоритм розв'язку задачі наведено у кресленику ІК11.280БАК.006 Д4 до дипломного проєкту.

Висновки до розділу 6

У цьому розділі було проведено аналіз кінематичної структури 2D дельта-робота, розв'язано пряму та інверсну задачі кінематики, в результаті чого побудовано схему алгоритму керування роботом. В ході дослідження встановлено, що інверсна кінематика для такого робота обчислюється відносно просто методом застосуванням тригонометричних формул. Натомість пряма задача є складнішою: вона потребує розв'язання системи рівнянь і може давати декілька розв'язків. Це дослідження демонструє, як за допомогою відносно простих геометричних методів можна проаналізувати кінематику складного механізму і отримати практично корисні результати для його управління. Отримані знання допоможуть у побудові алгоритму керування та в подальшій симуляції робота.

7 ТЕСТУВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЯ

7.1 Методи програмування роботів

Програмування роботів полягає у введенні до системи керування чітких інструкцій для виконання певних дій. Ці інструкції задаються у контролер робота, який керує двигунами та іншими системами робота. Програма визначає послідовність дій робота й дозволяє роботизованому обладнанню виконувати операції у виробничих, технологічних, логістичних чи пакувальних процесах. Для написання коду найчастіше використовують такі мови, як C/C++, Python, Java та C#. Деякі виробники робототехнічних систем розробляють власні мови програмування та специфічні підходи до написання коду. Тому спеціаліст, який вміє програмувати робот однієї марки, не завжди може працювати з роботом іншого виробника без додаткового навчання.

Існують два основних підходи до створення керуючої програми роботів: онлайн та офлайн програмування [35]. Онлайн програмування передбачає безпосереднє введення команд у контролер робота, зазвичай за допомогою навчального пульта. Оператор фізично переміщує маніпулятор робота через послідовність позицій, які записуються та зберігаються в системі управління робота. Робот переводиться у режим навчання, і оператор за допомогою клавіш та кнопок на пульті поетапно керує рухом робота, задаючи необхідні позиції та траєкторії для формування програми. Перевагами такого методу є те, що оператор не потребує додаткового програмного забезпечення або написання коду, оскільки працює напряму з фізичним обладнанням. Також, цей метод є доволі простим і не потребує складного навчання або глибоких знань мов програмування. Основним недоліком цього методу є час простою, оскільки оператор працює напряму з роботом, то пристрій не може функціонувати поки відбувається програмування. Також, такий метод не підходить для задання точних та складних траєкторій руху, оскільки це б зайняло багато часу та майже точно призвело б до помилок.

Для керування дельта-роботом у межах дипломного проєкту використовується метод офлайн програмування. Основна ідея цього методу

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

полягає у повному переміщенні процесу програмування у віртуальне середовище, без необхідності використання фізичного обладнання. Офлайн програмування дозволяє операторам створювати програми та траєкторії руху робота безпосередньо на основі 3D-моделей самих роботів та оброблюваних деталей. Такий підхід особливо ефективний для складних завдань, коли деталі мають комплексну геометрію та потребують багато часу на навчання робота. Основною перевагою цього методу є безперервність виробничого процесу – розробка нових програм відбувається паралельно з роботою обладнання. Найбільшою перевагою є те, що такий метод дозволяє протестувати робота, використовуючи розроблену 3D-модель, без необхідності фізичної збірки системи. Також, програми симуляції зазвичай можуть самостійно генерувати програму керування роботом за заданою траєкторією, без ручного написання коду, тим самим роблячи процес симуляції більш простим та швидким, що дозволить створити більше сценаріїв для тестування дельта-робота.

7.2 Обрання середовища для симуляції

У якості середовища для симуляції обрано Blender, безкоштовну програму з відкритим вихідним кодом, призначену для створення 3D-графіки. Вона дозволяє користувачам моделювати 3D-об'єкти, створювати анімації, візуалізувати сцени, а також виконувати рендеринг зображень та відео. Програма підтримує процедурну генерацію об'єктів, роботу з фізикою (динаміка тіл, рідин та частинок), а також має кілька вбудованих рушіїв для рендерингу.

Не дивлячись на те, що Blender не є спеціалізованим середовищем для симуляції робототехнічних системи, ця програма, завдяки відкритому коду, підтримує розширення функціоналу через додатки (які ще називають аддонами) та скрипти, написані на Python, що дозволяє адаптувати програму під специфічні завдання користувача. За допомогою розширень для робототехніки маємо можливість імпортувати CAD-моделі роботів, налаштовувати їх кінематику, створювати складні сцени з фізично коректною поведінкою. Як приклад, одним з

таких розширень є аддон MarIOnette.

MarIOnette – безкоштовний аддон для Blender, який спеціально розроблений для моделювання та симуляції робототехнічних систем [36]. MarIOnette дозволяє створювати та анімувати кінематичні ланцюги, імітувати роботу приводів та взаємодію з об'єктами сцени (рис. 7.1). Плагін надає необхідні інструменти налаштування та запуску симуляцій, а також може генерувати та завантажувати керуючі програми для сімейства мікроконтролерів AVR (на основі якого розроблена плата Arduino Nano, яка використовується для керування дельта-роботом).

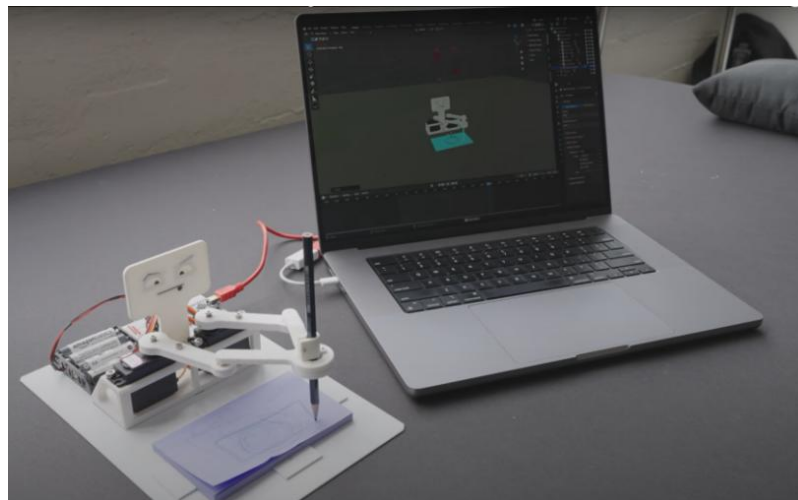


Рисунок 7.1 – Використання аддону MarIOnette для керування роботом [37]

У нашому випадку, можемо використати інструменти анімації для створення програми керування та аналізу кінематики дельта-робота. Інструментарій програми Blender також дозволяє налаштовувати фізично коректні (PBR) матеріали кожного об'єкту у сцені, що дає можливість більш реалістично візуалізувати створену робототехнічну систему. Наступним етапом іде процес налаштування сцени та симуляції створеного дельта-робота.

7.3 Підготовка до симуляції

Перед тим як розпочати створення самої симуляції, потрібно імпортувати, створену у САПР, 3D-модель робота та провести налаштування

сцени. Оскільки технічні збірки зазвичай зберігаються у форматі STL, можна відкрити її у Blender без сторонніх плагінів. У налаштуваннях імпорту треба вказати масштаб 0.001, щоб модель коректно відобразилась у в'юпорті та відповідала реальним розмірам робота (рис 7.2).

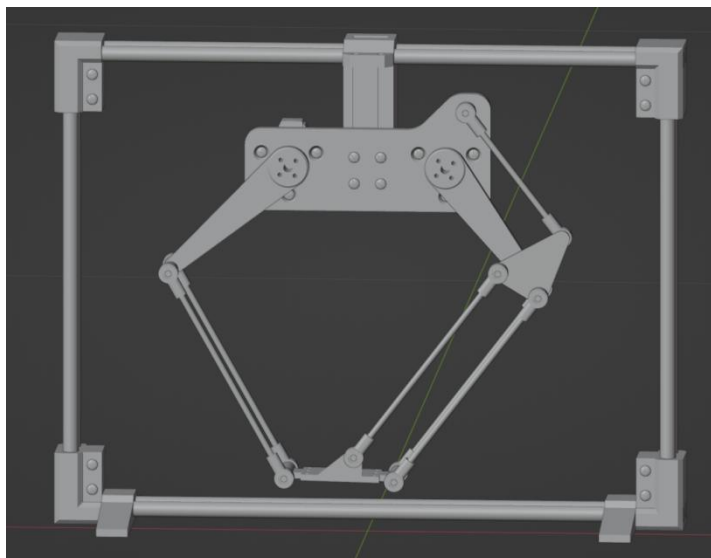


Рисунок 7.2 – Дельта-робот у в'юпорті програми Blender

Наступним кроком слід додати допоміжні елементи у сцену, такі як стіл, фон та освітлення. Варто зазначити, що ці елементи не є обов'язковими та ніяк не впливають на симуляцію самого робота. Проте, без них рендер буде виглядати пустим та створиться враження ніби робот висить у повітрі, що ніяк не покращить реалістичність симуляції.

Також, для більшої реалістичності, можна додати матеріали на будь-які об'єкти у сцені. Blender має можливість створення PBR (Physically Based Rendering) матеріалів, які описують як світло взаємодіє з різними поверхнями, враховуючи такі характеристики, як металевість (metalness), шорсткість (roughness), відбивну здатність, рельєф (normal/bump), прозорість та інші. Завдяки такому методу маємо можливість створювати фотореалістичні рендери, які інколи важко відрізнити від справжніх фотографій. Спочатку додається матеріал пластику на ті частини, які побудовані для 3D-друку, також назначаються матеріали на металеві частини, стіл, фон та інші елементи (рис. 7.3).

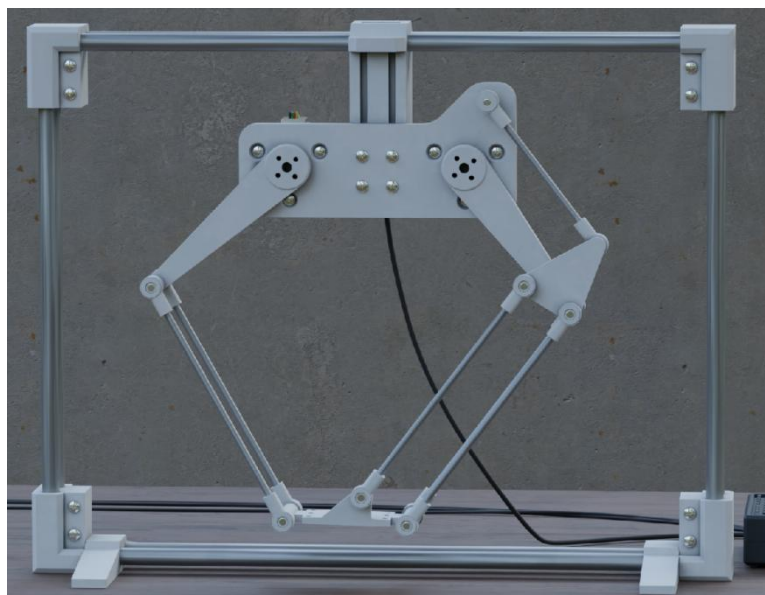


Рисунок 7.3 – Рендер сцени з налаштованими матеріалами

Наступним кроком є налаштування кінематики робота. Для початку потрібно виконати процедуру, яка називається *riggering*. Це процес створення «скелета» для 3D-моделі (рис 7.4), який дозволяє керувати її рухомих ланками. Скелет складається з кісток (*bones*), які зв'язуються з геометрією об'єкта, завдяки цьому можна приводити в рух як прості так і складні механізми для подальшої їх симуляції.

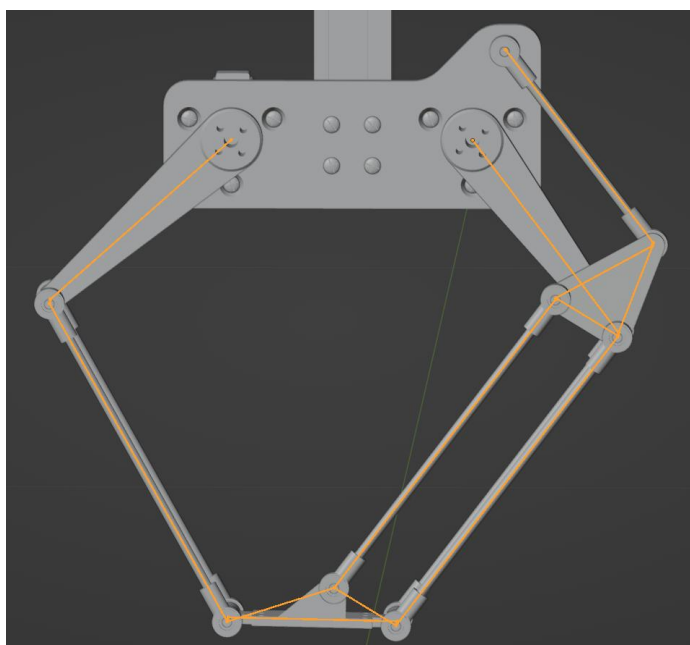


Рисунок 7.4 – Помаранчевим кольором виділено «скелет» робота

Після створення скелету потрібно провести деякі налаштування. У розділі Inverse Kinematics потрібно налаштувати кінематику робота – задати характеристики для кожного з’єднання, наприклад, можна заблокувати будь-яку вісь, або встановити певний ліміт, на який кут буде обертатися з’єднання. Ці налаштування потрібно виконати для кожної кістки (bone), щоб в подальшому уникнути колізій та помилок при симуляції дельта-робота. Також, для зручності керування до кінцевої кістки (ефектора) потрібно прив’язати empty-об’єкт, переміщаючи цей об’єкт у просторі, можна керувати всіма ланками дельта-робота без необхідності задавати кут для кожного з’єднання індивідуально (рисунок 7.5)

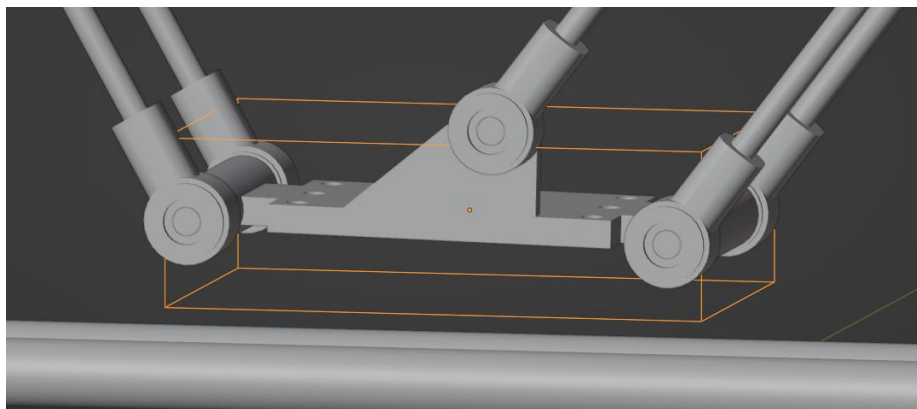


Рисунок 7.5 – Empty-об’єкт для керування дельта-роботом

Наступним кроком у сцену додається камера, налаштовується її ракурс та фокусна відстань. Саме з цієї камери у подальшому буде відбуватись процес рендерингу симуляції, тому треба налаштувати її так, щоб в кадрі повністю було видно робота та об’єкти у сцені. Далі необхідно зробити первинні налаштування рендеру, у вкладці Render Properties потрібно вибрати рушій Cycles та обрати пристрій для рендеру – відеокарту комп’ютера (симуляцію можна відрендерити і на процесорі, але це займе набагато більше часу). Також, у вкладці Render, необхідно встановити кількість семплів, цей параметр визначає максимальну кількість променів, що буде оброблено для кожного пікселя під час рендерингу симуляції. Чим більше це значення, тим якісніше зображення, проте, відповідно збільшується час рендеру кожного кадру.

Останнє, що треба зробити, це зрозуміти як відбувається сам процес симуляції робота. Після проведення вище описаних налаштувань, потрібно перейти у вікно Layout у робочому просторі програми, у нижній частині вікна можна побачити часову шкалу (timeline) (рис. 7.6).

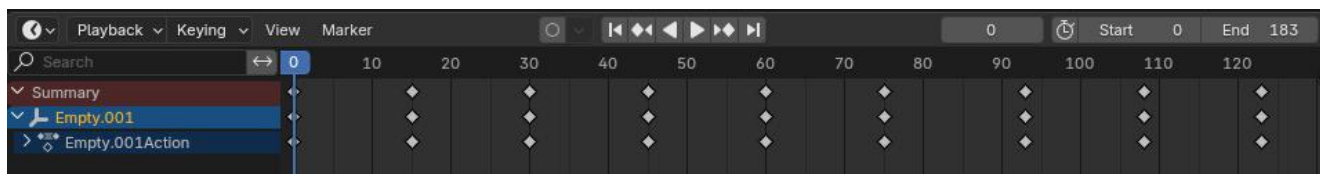


Рисунок 7.6 – Часова шкала симуляції у програмі Blender

Таймлайн – це спеціальна шкала, яка відображає хід часу у сцені та використовується для керування симуляцією. Сірі квадратики на таймлайні – це ключі кадру (Keyframes), вони відповідають за положення об'єкта в просторі у певний момент часу. Щоб додати ключовий кадр, потрібно виділити об'єкт, перейти на потрібний кадр таймлайну, натиснути клавішу I (Insert Keyframe) і вибрати, яку властивість зберегти (Location, Rotation, Scale). Ключі з'являться у вигляді сірих квадратиків на таймлайні, що дозволяє легко орієнтуватися у симуляції. Також, виділивши ключі та обравши вкладку Graph Editor, можна налаштувати криві руху та режими інтерполяції між кадрами. Тепер, розібравшись з усіма необхідними налаштуваннями у програмі Blender, можна перейти безпосередньо до створення симуляцій.

7.4 Перша симуляція. Базові рухи

Перед тим як перейти до більш складних симуляцій, потрібно протестувати кінематику дельта-робота. Потрібно впевнитись, що всі з'єднання налаштовані правильно, не виникає ніяких колізій, ефектор завжди перебуває у паралельному положенні до землі, та не виникає ніяких помилок при переміщеннях у просторі. Для цього ключі кадру виставляються у потрібних місцях на таймлайні та запускається симуляція (рис. 7.7).

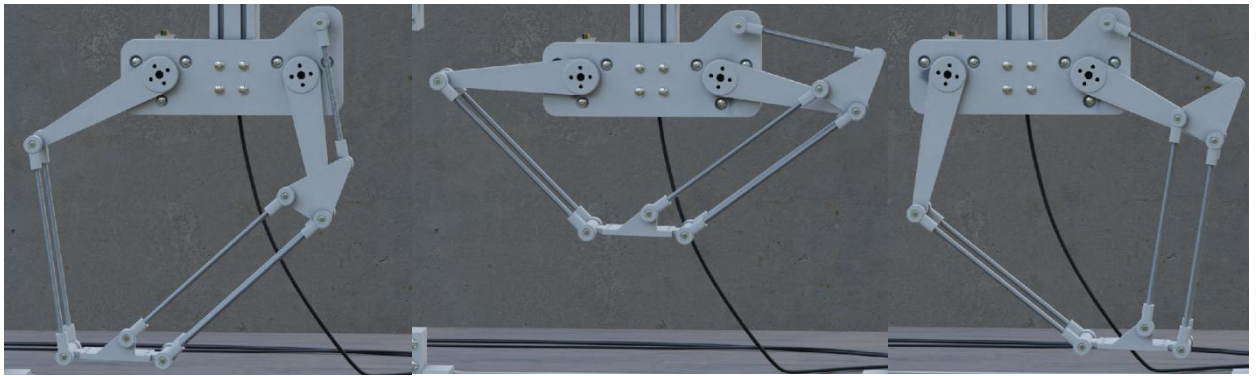


Рисунок 7.7 – Кадри з симуляції руху робота

Як можна побачити на кадрах з симуляції, дельта-робот коректно і без помилок виконує базові рухи у просторі. Починаючи з лівого нижнього кута, за напрямком руху часової стрілки, робот виконує переміщення, візуально вимальовуючи квадрат у вертикальній площині, при досягненні кожної вершини робот переміщується у центр робочої зони та повертається назад, після чого переходить до наступної вершини і повторює ці дії. Завершивши вимальовувати квадрат, робот повертається у центр робочої зони та починає рухатись по спіралі у протилежному напрямку. Проаналізувавши симуляцію, можна зробити висновок, що дельта-робот коректно виконує як лінійні так і нелінійні переміщення, а отже можна переходити до більш складних сценаріїв.

7.5 Друга симуляція. “Pick and Place”

Для того, щоб виконати “Pick and Place” симуляцію, головною задачею якої є захват об’єкта та переміщення його у іншу точку в просторі, потрібно внести деякі зміни у сцену та самого робота. Спочатку додається 3D-модель модуля електромагніта, який буде виконувати захват об’єкта, та прив’язується до ефектора дельта-робота. Також, потрібно додати спеціальну поличку, на якій будуть відбуватись маніпуляції, сам об’єкт, який буде переміщуватися роботом та корзинки для нього. Потім, за допомогою модифікатора “Child of”, налаштовується захват та відпускання об’єкта, розставляючи відповідні ключі кадру на таймлайні. Далі можна запускати симуляцію (рис. 7.8).

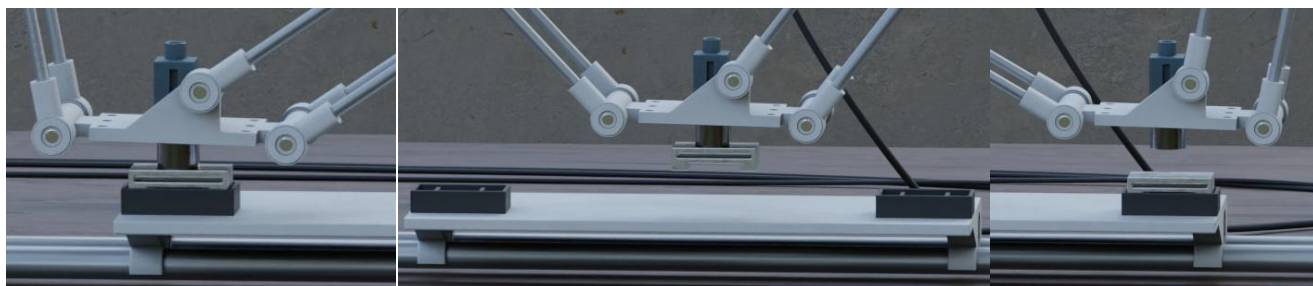


Рисунок 7.8 – Кадри з симуляції “Pick and Place”

На кадрах з симуляції можна побачити як дельта-робот виконує цикл команд «взяти-перемістити-поставити». Спочатку ефектор наближається до точки ретракту А (спеціально визначена позиція, у яку переміщується рухома платформа робота перед виконанням операції захвату). Після чого, у точці А, виконується захват об’єкта за допомогою електромагнітного модуля, та переміщення у точку ретракту В. Далі робот опускається у точку В, відпускає об’єкт і повертається до точки ретракту В. Після чого всі команди повторюються у зворотньому порядку і робот переносить об’єкт на початкову позицію у точці А. Отже, можна зробити висновок, що розроблений 2D дельта-робот здатен виконувати точні маніпуляції з об’єктами та може бути застосованим у більш практичних сценаріях, таких як сортування або складання на виробництві.

7.6 Третя симуляція. Лазерне гравіювання

Найбільш складною симуляцією у межах проєкту є імітація лазерного гравіювання металевої поверхні. Під час виконання цієї симуляції на практиці продемонстровано використання вертикальної робочої області замість горизонтальної, переваги такого методу більш детально описані у першому розділі. Також, дельта-робот рухається по спеціально заданій кривій, замість руху по точкам як у попередніх симуляціях.

У якості гравіювального пристрою використовується компактна лазерна насадка PLH3D-6W-XF, розроблена компанією Opt Lasers спеціально для використання у 3D-принтерах та ЧПК верстатах.

Спочатку, у сцену імпортується модель лазерної насадки та закріплюється на ефекторі дельта-робота, також, до рами робота прикріплюється спеціальний горизонтальний стіл з розташованою на ньому металевою пластиною, на якій буде відбуватись гравіювання. Далі потрібно налаштувати матеріал пластини так, щоб на ньому відображалися сліди від лазера. Наступним кроком створюється крива (Bezier curve), яка є траєкторією руху ефектора з лазерною насадкою. За допомогою модифікатора “Follow Path” задається траєкторія руху робота та розставляються ключі кадрів, після чого запускається симуляція (рис. 7.9).

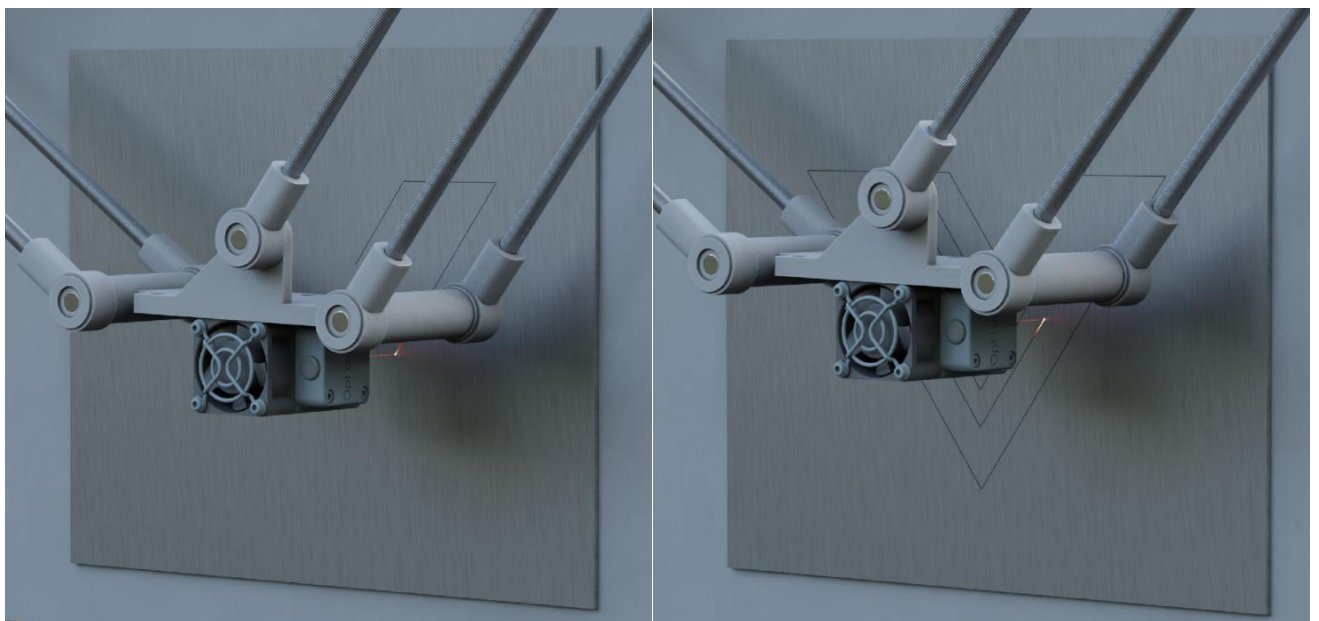


Рисунок 7.10 – Кадри з симуляції нанесення лазерного гравіювання

На кадрах з симуляції можна побачити як відбувається процес гравіювання 2D дельта-роботом. Спочатку робот знаходиться у початковому положенні трохи вище металевої пластини. Потім переміщується на початок траєкторії руху, вмикається лазер, і починається процес гравіювання. Лазерна насадка, закріплена на ефекторі, слідує траєкторії руху (у наведеному прикладі це форма абстрактного логотипу) до самого її завершення, після чого вимикається лазер й ефектор повертається у початкове положення.

В результаті виконання симуляції отримуємо вигравійований паттерн на металевій пластині (рисунок 7.11).



Рисунок 7.11 – Результат нанесення гравіювання

Проаналізувавши виконану симуляцію, можна зробити висновок, що використання вертикальної робочої області є виправданим рішенням для обмеженого простору та може використовуватись на практиці для таких задач як гравіювання або малювання. Також, було доведено, що розроблений дельта-робот може використовуватися для високоточних маніпуляцій та добре підходить для вищеперерахованих задач.

Висновки до розділу 7

У даному розділі проведено детальний аналіз онлайн та офлайн методів програмування роботів та обрано найоптимальніший для реалізації у межах проекту варіант. Обраний (офлайн) метод програмування має очевидні переваги, по-перше, для керування роботом не потрібен доступ до фізичного обладнання, а процес симуляції може відбуватись прямо у віртуальному середовищі. По-друге, переважна більшість таких середовищ можуть самостійно генерувати програму керування роботом за заданою траєкторією, без ручного написання коду, тим

самим пришвидшуючи та спрощуючи процес симуляції.

Також, було обґрунтовано вибір програми Blender як середовища для симуляції дельта-робота. Основними перевагами цієї програми є відкритий вихідний код, який дозволяє використовувати спеціалізовані плагіни для налаштування роботизованих систем. Крім цього, інструментарій програми Blender дозволяє створювати фотореалістичні симуляції та рендери, що є ще однією перевагою та аргументом для використання у проєкті.

Після обрання середовища було детально описано процес підготовки до створення симуляцій. В деталях розібрано кожне налаштування, яке може бути необхідне для цієї задачі. Також, була налаштована кінематика дельта-робота та підготовлена сцена для подальшого створення симуляцій.

Найбільшу увагу у цьому розділі приділено процесу створення трьох симуляцій. Перша з яких демонструє виконання дельта-роботом простих маніпуляцій у просторі, завдяки чому перевірено коректність налаштування з'єднань та кінематики робота. Друга показує виконання послідовності операцій “pick and place” для маніпуляцій зі стороннім об'єктом, демонструючи розроблену систему як непоганий варіант для сортування або пакування на виробництві. Третя симуляція є найбільш складною і наочно демонструє процес перенесення робочої області робота з горизонтальної у вертикальну площину. Як результат, доведено доцільність використання такого методу для задач малювання або лазерного гравіювання.

ВИСНОВКИ

В процесі виконання дипломного проєкту було розроблено автоматизовану систему на базі дельта-робота для роботи в умовах обмеженого простору. В результаті тестування та симуляції готового продукту, була доведена ефективність та працездатність розробленої системи. Процес розроблення був розділений на певні етапи, за результатами яких було створено пояснювальну записку.

У першому розділі проаналізовано проблематику поставленої задачі та сформовані вимоги до системи. Також, на основі розглянутих різних видів промислових робототехнічних систем, було обрано схему паралельного 2D дельта-робота як найкращий варіант для реалізації у межах дипломного проєкту. Для більшої ефективності роботи системи у межах обмеженого простору, було вирішено перенести робочу зону робота з горизонтальної площини у вертикальну. Для того щоб підтвердити ефективність даного рішення, було проведено невеликий експеримент та обґрунтовано його результати. Також, детально описано фактичні обмеження та можливі недоліки такого використання робочої площини.

У другому розділі було проведено аналіз промислових 2D дельта-роботів, в результаті чого стало зрозуміло, що така конструкція зустрічається доволі рідко, проте, у нашому випадку вона має хороші перспективи для реалізації спеціально для вирішення задач у обмеженому просторі.

У третьому розділі було побудовано структурну та функціональну схеми, за якими можна детально розглянути модулі системи та їх взаємодію між собою.

Четвертий розділ присвячено вибору технічних елементів системи, зокрема було аргументовано вибір крокового двигуна як основного приводу системи, розраховано характеристики двоступінчастого планетарного редуктора з метою збільшення крутного моменту, аргументовано вибір мікроконтролера, драйверів, датчиків положення і побудовано схему їх підключення.

У п'ятому розділі створено 3D-модель деталей робота та рами, проведено

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

збірку всієї конструкції.

У шостому розділі було проаналізовано кінематичну структуру 2D дельта-робота, описано й розв'язано пряму та інверсну задачу кінематики.

Останнім етапом було обрано програмне середовище та створено три симуляції з метою доведення працездатності розробленої системи. Мета першої симуляції полягала у тестуванні кінематики та переміщень робота. Друга симуляція довела, що дельта-робот здатен ефективно виконувати маніпуляції з об'єктами, зокрема операції типу «взяти-перенести-поставити». В результаті третьої симуляції було доведено здатність системи до виконання високоточних задач, таких як лазерне гравіювання.

Отже, в результаті проєктування, побудови, тестування та симуляції дельта-робота можна зробити висновок, що розроблена система задовольняє поставленій меті та може ефективно виконувати задачі в умовах обмеженого простору. В найбільшій мірі це є результатом правильної побудови кінематики та підбору технічних засобів. Також, перенесення робочої зони у вертикальну площину є ефективним рішенням та може використовуватись у таких задач як гравіювання або малювання. Розроблена автоматизована система готова до побудови реального прототипу та роботи над справжніми задачами.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Визначення поняття робота, основні їх типи та призначення. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82> (дата звернення: 29.03.2025).
- 2) Визначення поняття декартового координатного робота. URL: <https://w.wiki/ENx3> (дата звернення: 30.03.2025).
- 3) Cartesian Gantry Robots – Advantages and Applications. URL: <https://www.isotechinc.com/cartesian-gantry-robots> (дата звернення: 30.03.2025).
- 4) Dean Elkins. What's So Appealing About SCARA Robots? URL: <https://www.packagingstrategies.com/articles/102909-whats-so-appealing-about-scara-robots> (дата звернення: 30.03.2025).
- 5) Articulated robot. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Articulated_robot (дата звернення: 02.04.2025).
- 6) Industrial robots. <https://www.orientalmotor.com/industrial-robots/index.html> (дата звернення: 02.04.2025).
- 7) Articulating Robots from Olympus Technologies Ltd. URL: <https://www.azorobotics.com/equipment-details.aspx?EquipID=116> (дата звернення: 03.04.2025).
- 8) Parallel manipulator. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_manipulator (дата звернення: 03.04.2025).
- 9) ABB launches five axes Delta robot IRB 365 FlexPicker. URL: <https://new.abb.com/news/detail/93173/prsrl-ABB-launches-five-axis-Delta-robot-fastest-for-lightweight-product-picking-packing-and-re-orientation> (дата звернення: 04.04.2025).
- 10) Inverse Kinematic Control of a Delta Robot Using Neural Networks. URL: <https://www.mdpi.com/2218-6581/10/4/115> (дата звернення: 04.04.2025).
- 11) ABB robotic picking and packing portfolio. URL: <https://new.abb.com/news/detail/62221/robotic-picking-and-packing-portfolio> (дата звернення: 04.04.2025).

12) Omron 2-axes delta robot series specifications. URL: <https://industrial.omron.eu/en/products/x-delta> (дата звернення: 04.04.2025).

13)Arduino Vertical X-Y plotter. URL: <https://www.instructables.com/VERTICAL-X-Y-PLOTTER-DRAWING-ROBOT-ARDUINO-PLOTTER/> (дата звернення: 05.04.2025).

14) Above 40g acceleration for pick-and-place with 2-dof PKM. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5152193> (дата звернення: 05.04.2025).

15) Відео. 2D CNC delta robot. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=-Z9HeTFvCfU> (дата звернення: 05.04.2025).

16) Офіційний сайт виробника Codian D2-800-S020 URL: <https://codian-robotics.com/blog/producten/d2-800-s020/> (дата звернення: 07.04.2025).

17) Офіційний сайт виробника BAT1000B-S60. URL: <https://www.rprobotic.com/products/bat1000b-s60-heavy-load-delta-industrial-robot/> (дата звернення: 07.04.2025)

18) Офіційний сайт виробника Gridbots GB-MH-DLT2. URL: <https://www.directindustry.com/prod/gridbots-technologies-private-limited/product-169302-1930639.html> (дата звернення: 10.04.2025).

19) Офіційний сайт виробника АТОМ D2-1000-P5. URL: https://atomrobotsolutions.com/robot/Delta_Robot_D2-1000-P5 (дата звернення: 10.04.2025).

20) Опис та призначення структурної схеми. URL: <https://w.wiki/ENx2> (дата звернення: 20.04.2025).

21) Опис та призначення функціональної схеми. URL: <https://w.wiki/ENxr> (дата звернення: 20.04.2025).

22) Документація Arduino Nano. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/> (дата звернення: 21.04.2025).

23) Принцип роботи та види електродвигунів. URL: <https://kvazar.com.ua/uk/production-ua/elektrovyhuny> (дата звернення: 22.04.2025).

24) Визначення та розрахунок моменту сили. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1>

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		80

[%82_%D1%81%D0%B8%D0%BB%D0%B8](#) (дата звернення: 22.04.2025).

25) Документація та технічні характеристики сервоприводу MG996R. URL: <https://components101.com/motors/mg996r-servo-motor-datasheet> (дата звернення: 22.04.2025).

26) Документація уніполярного крокового двигуна 28BYJ-48 12V. URL: <https://descargas.cetronic.es/28BYJ-48.pdf> (дата звернення: 22.04.2025).

27) Механічний редуктор. URL: <https://w.wiki/ENyi> (дата звернення: 23.04.2025).

28) Gear Reducer: Types, Uses and Functions. URL: <https://www.iqsdirectory.com/articles/gearbox/gear-reducers.html> (дата звернення: 23.04.2025).

29) Стаття Mech. Design Transmissions and Guides. URL: https://fab.cba.mit.edu/classes/865.21/topics/mechanical_design/transmissions/ (дата звернення: 23.04.2025).

30) Онлайн генератор параметрів планетарних редукторів. URL: <https://planetarygeargenerator.com/> (дата звернення: 25.04.2025).

31) Документація мікросхеми драйверу крокового двигуна ULN2003. URL: <https://www.ti.com/product/ULN2003A> (дата звернення: 25.04.2025).

32) Характеристики кінцевого вимикача (Limit Switch). URL: <https://www.servocity.com/spdt-miniature-limit-switch-with-lever-2-pack/> (дата звернення: 25.04.2025).

33) Опис процедури «homing» у 3D-друці. URL: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/18453/what-is-homing-what-is-the-purpose-of-homing> (дата звернення: 26.04.2025).

34) Стаття D2 Delta Robot Structural Design and Kinematics Analysis. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/274/1/012009/pdf> (дата звернення: 05.05.2025).

35) Методи програмування роботів: URL: <https://www.automate-uk.com/our-associations/bara/expert-advice/robots-explained/robot-programming-methods/> (дата звернення: 10.05.2025).

36) Плагін MarIOnette для симуляції роботів у Blender. URL: <https://github.com/knee-koh/MarIOnette> (дата звернення: 20.05.2025).

37) Відео застосування плагіну MarIOnette у Blender. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=nJkThBeOZog&t=27s> (дата звернення: 20.05.2025).

					ІК11.280БАК.006 ПЗ	Арк.
						82
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		