

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

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

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

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

на тему: «Дельта-робот для збирання та пакування»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-11

Пидорина Євген Вікторович

Керівник:

Доцент каф. АСНК, к. т. н., доцент

Галаган Роман Михайлович

Рецензент:

Доцент каф. КІТВП, к. т. н., доцент

Синявський Іван Іванович

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

Студент _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ПК11.080000.000 ПЗ	Пояснювальна записка	70	
3	A2	ПК11.080000.000 СхС	Структурна схема	1	
4	A2	ПК11.080000.000 СхА	Функціональна схема автоматизації	1	
5	A2	ПК11.080000.000 ЕП	Схема електрична принципова	1	
6	A1	ПК11.080000.000 СК	Складальний кресленик	1	

				ДП ПК11.080000.000		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Пидорина Є.В.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Галаган Р.М.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-11	
Н/контр.						
Зав.каф.						

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Дельта-робот для збирання та пакування»

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Пидорині Євгену Вікторовичу

1. Тема проєкту «Дельта-робот для збирання та пакування», керівник проєкту Галаган Роман Михайлович, к. т. н., доцент, затверджені наказом по університету від « 26 » травня 2025 р. № 1765-с
2. Термін подання студентом проєкту 09.06.2025
3. Вихідні дані до проєкту : тип робота – дельта-робот з трьома ступенями свободи, робоча зона – не менше ніж 100x100x50мм, тип приводів – крокові двигуни стандарту Nema17.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ, РОЗДІЛ 1. Аналітичний огляд літературних джерел, РОЗДІЛ 2. Опис дельта-роботів, РОЗДІЛ 3. Розрахунки та моделювання, РОЗДІЛ 4. Конструкція розробленого дельта-робота, РОЗДІЛ 5. Схемотехніка та електроніка, Висновки, Список використаної літератури, Додатки.

5. Перелік графічного матеріал: структурна схема, схема електрична принципова, функціональна схема автоматизації, складальний кресленик.

6. Дата видачі завдання 15.04.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Літературний огляд за темою дипломного проєкту	1-4 тиждень	
2	Розрахунок та моделювання	5-6 тиждень	
3	Конструювання робота	7 тиждень	
4	Вибір електричних компонентів системи	8 тиждень	
5	Синтез структурної схеми, електричної принципової та функціональної схеми автоматизації.	9 тиждень	
6	Розробка складального кресленика	10 тиждень	

Студент

Євген ПИДОРІНА

Керівник

Роман ГАЛАГАН

АНОТАЦІЯ

У дипломному проєкті розроблено дельта-робот для автоматизації процесів збирання та пакування. Проведено аналіз існуючих типів роботизованих маніпуляторів, на основі якого обґрунтовано вибір конструкції з паралельною кінематикою. Здійснено кінематичні розрахунки, змодельовано робочу зону та визначено конструктивні обмеження системи.

Створено тривимірну модель дельта-робота, обрано електричні компоненти та побудовано структурну, функціональну та принципову електричну схеми.

Результати проєкту можуть бути використані для створення прототипу дельта-робота з подальшим впровадженням у промислові процеси, з метою автоматизації.

ANNOTATION

The bachelor's thesis presents the development of a delta robot for automating picking and placing process. An analysis of existing types of robotic manipulators was carried out, based on which the design with parallel kinematics was justified. Kinematic calculations were performed, the working area was modeled, and the mechanical limitations of the system were identified.

A 3D model of the delta robot was created, and appropriate electrical components were selected. Based on this, the structural, functional, and schematic electrical diagrams were developed.

The result of the project can be used to create a prototype of the delta robot with further implementation in industrial processes for automation purposes.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПЗК – пряма задача кінематики;

PLA – Polylactic Acid;

TOF – Time-of-flight;

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. Аналітичний огляд літературних джерел	13
1.1 Різновиди роботів за типом кінематики у промисловій робототехніці	13
1.2 Типи роботів для задач переміщення та пакування. Переваги та недоліки.....	13
1.3 Історія впровадження дельта-роботів на ринку	18
1.4 Огляд існуючих дельта роботів	22
1.5 Напрямки розвитку дельта-роботів	27
Висновки до Розділу 1	27
РОЗДІЛ 2. Опис дельта-роботів.....	29
2.1 Будова дельта-робота.....	29
2.2 Кінематичний розрахунок	29
2.2.1 Зворотня задача кінематики	30
2.2.2 Пряма задача кінематики.....	33
2.2.3 Обмеження робочої зони дельта робота	39
2.3 Розрахунок передаточного механізму.....	43
Висновки до Розділу 2	44

					ПК11.080000.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Літера	Аркуш	Акрушів
Розроб.		Пидорина Є.В.								
Перевір.										
Реценз.								4 курс, ПК-11		
Н. Контр.										
Затверд.		Галаган Р.М.								

РОЗДІЛ 3. Розрахунки та моделювання	46
3.1 Розрахунок робочої зони дельта-робота:	46
Висновки до Розділу 3	49
РОЗДІЛ 4. Конструкція розробленого дельта-робота	50
4.1 Вибір компонентів для дельта робота	50
4.2 Візуалізація розробленого робота.....	51
4.2.1 Верхня основа.....	51
4.2.2 Блок керування	52
4.2.3 Тримач кінцевого вимикача	53
4.2.4 Передаточний механізм	54
4.2.5 Верхнє плече	54
4.2.6 Нижнє плече.....	55
4.2.7 Нижня основа.....	55
4.2.8 Зовнішній вигляд дельта-робота.....	56
Висновки до Розділу 4	57
РОЗДІЛ 5. Схемотехніка та електроніка	58
5.1 Розробка структурної схеми.....	58
5.2 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	58
5.3 Вибір електричних компонентів	60
5.3.1 Мікроконтролер.....	61
5.3.2 Плата розширення	62
5.3.3 Драйвери моторів	62
5.3.4 Крокові двигуни	63
5.3.5 Кінцеві вимикачі.....	64

5.3.6 Датчик відстані	65
5.3.7 Камера.....	65
5.3.8 Компоненти системи захвату	66
5.3.9 Блок живлення	68
5.4 Розробка електричної принципової схеми.....	68
Висновки до Розділу 5	69
ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71
Додатки	73

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Світ стрімко змінюється, і разом з цим зростають потреби суспільства та вимоги до збільшення ефективності виробництва. Це зумовлює необхідність інтеграції автоматизованих рішень у виробничі процеси. Сучасний етап розвитку промисловості визначається як четверта промислова революція (Індустрія 4.0). Її основними рисами є впровадження передових цифрових технологій, використання компактних і доступних виробничих пристроїв, активне застосування штучного інтелекту, машинного навчання, Інтернету речей та кіберфізичних систем [1].

Індустрія 4.0 передбачає глибоку автоматизацію виробничих процесів. Особливої уваги набувають гнучкі роботизовані системи, здатні аналізувати та адаптуватись під різну продукцію і алгоритми роботи, тобто бути універсальними [2].

Одним із ключових етапів виробничого циклу є сортування, переміщення та пакування виробів. Ефективним інструментом оптимізації цього процесу стало використання роботизованих систем. Вони дозволяють значно підвищити точність та швидкість, мінімізувати ризик пошкодження продукції [3].

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Різновиди робіт за типом кінематики у промисловій робототехніці

Промислова робототехніка – дисципліна, що пов’язана з проектуванням, керуванням та промисловим застосуванням робіт, а її продукти досягли рівня зрілої технології на поточний момент [4].

Існує два основні типи робіт маніпуляторів: послідовний маніпулятор та паралельний маніпулятор. Послідовний маніпулятор є найпопулярнішим типом промислових робіт. Вони побудовані у вигляді серійних ланок, що з’єднані між собою. Їх часто називають маніпуляторами із розімкненими контурами. Для керування рухом кожної складової ланки використовується один привід, а переміщення цих ланок є кінематично незалежними один від одного. На відміну від послідовних маніпуляторів, паралельні визначаються як кінематичний ланцюговий механізм із замкнутим контуром, робоча платформа якого з’єднана з нерухомою основою за рахунок кількох незалежних кінематичних ланцюгів [5].

1.2 Типи робіт для задач переміщення та пакування. Переваги та недоліки.

Важливим аспектом при розробці автоматизованих систем для таких задач є вибір типу робота. Із розвитком робототехніки було розроблено декілька типів робіт, що можуть ефективно виконувати ці функції. Кожен із них має свої конструктивні особливості, що впливають на швидкість, точність, гнучкість та вантажопідйомність.

Першим типом є декартові роботи, як показано на рисунок 1.1.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.1. Зовнішній вигляд декартового робота [6]

Вони здійснюють переміщення по трьом ортогональним осям в конфігурації X-Y-Z, що спрощує керування ними [7]. Їх основне використання припадає на випадки, де складна траєкторія руху не є потрібною, а важливою є лінійна точність. Перевагою є велика вантажопідйомність за рахунок жорсткості конструкції, а недоліком виступають великі габаритні розміри.

Другим типом роботів є SCARA-роботи, як показано на рис.2.

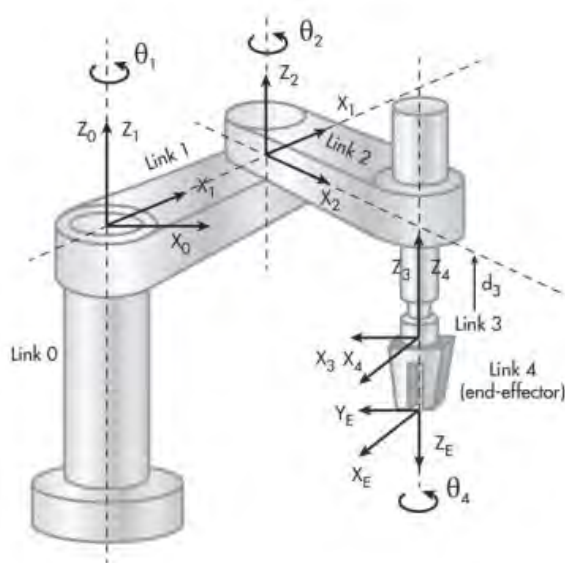


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд SCARA-робота [8]

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вони є найбільш ефективними для проведення операцій в горизонтальній площині. З переваг, можна виділити велику швидкість та точність, але за рахунок інерціальних навантажень можуть виникати похибки [9]. Є більш гнучкими ніж декартові роботи, але програють їм у вантажопідйомності. Мають більш складну систему управління за рахунок більшої кількості ступенів свободи.

Третім типом є шарнірні роботи з шістьма ступенями свободи, як показано на рисуюнок 1.3.

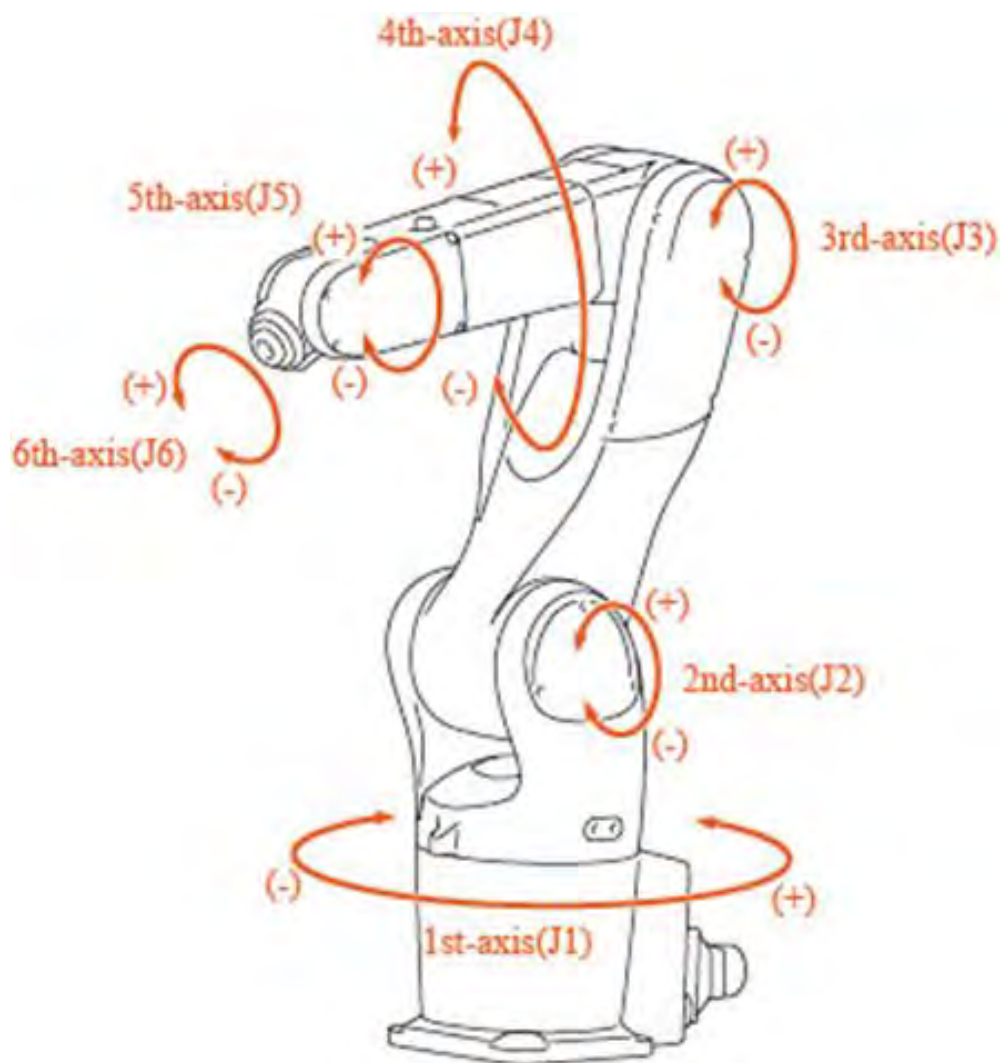


Рис. 1.3. Зовнішній вигляд шарнірного-робота [10]

Мають максимальну гнучкість, що дозволяє їм виконувати складні рухи в тривимірному просторі. Вони можуть виконувати найбільший спектр

задач не обмежуючись переміщенням та пакуванням. В якості недоліків можна визначити складність управління та високі інерційні навантаження.

Четвертим типом виступають дельта-роботи, як показано на рисунк 1.4.

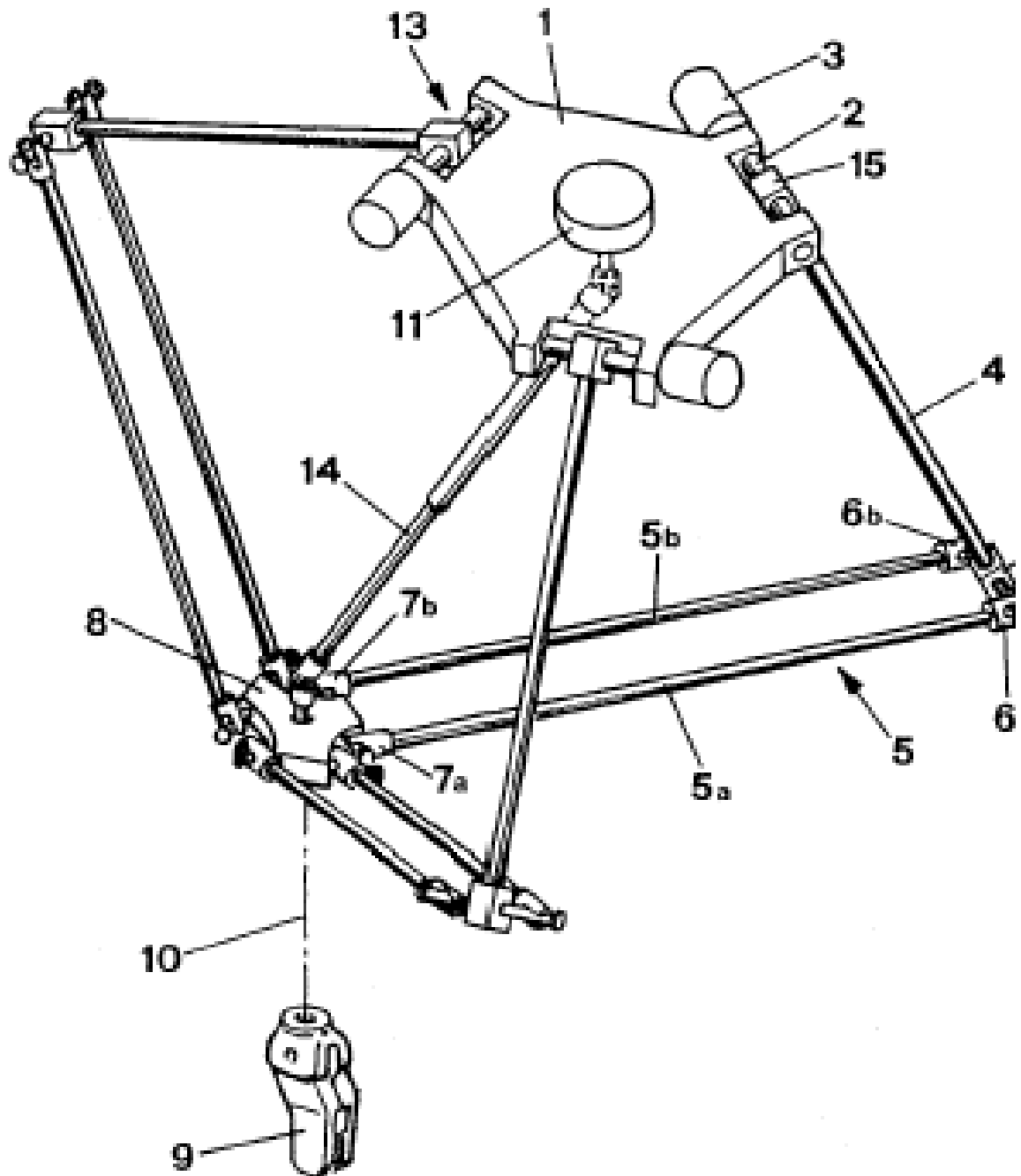


Рис. 1.4. Зовнішній вигляд дельта-робота [11]

Їх головною відмінністю від інших типів є паралельна кінематика та легкість конструкції. Ці відмінності забезпечують рекордну швидкість,

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

жорсткість конструкції, компактність та мінімальні інерційні навантаження. Із недоліків можна визначити складність конструкції, а також обмежену робочу зону [10].

Для наочності і більш швидкого аналізу наведено таблицю 1.

Таблиця 1.1. Порівняння робіт маніпуляторів різного типу

Тип робота	Декартовий	SCARA	Шарнірний	Дельта-робот
Кінематика	Послідовна	Послідовна	Послідовна	Паралельна
Швидкість	Середня	Висока	Середня	Дуже висока
Точність	Висока	Висока	Висока	Найвища
Вантажопідйомність	Висока	Середня	Висока	Низька/Середня
Робоча зона	Велика	Середня	Дуже велика	Середня
Складність керування	Низька	Середня	Висока	Висока

Проаналізувавши будову кожного типу робіт на, можна прийти до висновку, що три із чотирьох робіт мають послідовну кінематику і лише дельта-робот має паралельну. Завдяки паралельній конструкції він буде мати вищу жорсткість конструкції, точність та акуратність. Його робоча зона може бути меншою у порівнянні з іншим за рахунок механічних обмежень. Його кінематика є більш складною та комплексною на відміну від послідовних маніпуляторів, що буде вимагати більш складних алгоритмів керування. Натомість, послідовні маніпулятори пропонують

кращу гнучкість і більший робочий простір, вони менш жорсткі і точні при високих навантаженнях і прискореннях завдяки своїй ланцюговій структурі.

Оптимальним вибором для задач переміщення та пакування, де критичними параметрами є швидкість, точність та повторюваність є дельта-робот. Його конструкція дозволяє досягти високої ефективності при мінімальних похибках, що повністю відповідає вимогам сучасної автоматизації виробництва.

1.3 Історія впровадження дельта-роботів на ринку

На початку 1980-х років, професор Reymond Clavel і його дослідницька група започаткувала розробку дельта-робота, показаного на рисунку 1.4., з метою задовольнити промислову потребу у високошвидкісному управлінні легкими та малими об'єктами. Ця інновація ознаменувала відхід від використання великих роботів з двигунами високої потужності для маніпулювання виробів з маленькою вагою. За свій винахід Clavel отримав престижну премію «Золотий робот» у 1999 році, спонсором якої була компанія ABB Flexible Automaion [11, 12].

Водночас, Marc-Olivier та Pascal Demaurex заснували компанію Demaurex у 1983 році. Після придбання ліцензії на дельта-робот у 1987 році, головною метою компанії стало комерціалізація цих роботів в пакувальній промисловості. Продукт компанії мав велику кількість модифікацій. Чотири версії були комерціалізовані під назвами: Pack-Placer, Line-Placer, Top-Placer та Presto, призначених для переміщення об'єктів вагою від двадцяти грамів до кілограму, як показано на рисунку 1.5.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.5. Установка Line-Placer від Demaugex для пакування кренделів в промисловій пекарні [13]

Патент на дельта-робота був куплений компанією Demaugex у компанії EPFL в 1996 році. Однак до того, як угода відбулася, EPFL вже встигла продати дві ліцензії. Перша, що стосувалася роботів невеликого розміру (рука + паралелограм < 800 мм), була приписана виключно Demaugex в 1987 році. Друга, що стосувалася роботів більших розмірів, була продана компанії AID, а потім перепродана DeeMed. Ця компанія, яку пізніше купила шведська Elekta, спеціалізується на хірургії і виробляє робота, який використовується для перенесення важкого (20 кг) мікроскопа (SurgiScore), як показано на рисунку 1.6. Згодом технологія дельта-робота була продана компанії Medtronic наприкінці 1999 року [13].

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.6. SurgiScore в дії в лабораторії хірургічної робототехніки
Гумбольдтського університету в Берліні [13]

Перед укладенням угоди з SurgiScore, Elekta IGS розпочала переговори щодо ліцензії на виробництво дельта-роботів з глобальною технологічною групою ABB, що базується в Цюріху. В результаті ABB придбала ліцензію на виробництво дельта-роботів більшого розміру. Тим часом компанія Demarex оголосила про своє рішення виробляти роботів більшого розміру до 1200 мм, але не більше, так як взяла на себе зобов'язання не виходити на ринок роботів розміром понад 1200мм, коли придбала ексклюзивну ліцензію на виробництво роботів розміром до 800мм.

Demarex також ліцензувала японську компанію Hitachi Seiki на виробництво дельта-роботів невеликих розмірів для пакування (DELTA) і для свердління (PA35), що показані на рисунку 1.7. Фактично, Hitachi Seiki представляє Demarex в Японії.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.7. Дельта-роботи від Hitachi Seiki для комплектації та свердління [13]

ABB Flexible Automation випустила власного дельта робота у 1999 році під назвою IRB 340 FlexPicker, показаного на рисунку 1.8.



Рис. 1.8. Робот FlexPicker IRB 340 від ABB Flexible Automation [13]

Після більш ніж п'ятнадцяти років роботи в якості єдиного гравця на ринку, Демагех несподівано зіткнувся з рішенням шведського гіганта ABB вийти на цей прибутковий ринок. Намагаючись забезпечити свою

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

довгострокову стабільність, Demarex змінив свою виробничу лінію з одиничних дельта-роботів на повноцінні комплекси. Однак, щоб завоювати світовий ринок, невелика компанія Demarex почала шукати партнера. Так наприкінці 1999 року компанію Demarex придбала швейцарська група SIG. На той момент SIG Pack Systems пропонувала три різні моделі дельта-роботів, а саме, C23 і C33, що вироблялися компанією Demarex та CE33 - SIG Pack Systems. Зовнішній вигляд роботів C33 та CE33 показані на рисунку 1.9.



Рис. 1.9. Роботи C33 and CE33 від SIG Pack [13]

1.4 Огляд існуючих дельта роботів

ABB IRB - це сучасні дельта-роботи із високою точністю, швидкістю та компактними розмірами, зовнішній вигляд одного з лінійки на рисунку 1.10.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.10. ABB FlexPicker IRB 360 IRC5 [14]

Він призначений для швидкого та точного переміщення предметів у різних галузях, зокрема харчовій, фармацевтичній та логістичній. Робот оснащений інтегрованим програмним забезпеченням PickMaster для спрощення програмування та оптимізації роботи кількох роботів. Доступні моделі з нержавіючої сталі для харчової промисловості.

Технічна специфікація роботів наведена в таблиці 2.

Таблиця 2. Технічна специфікація серії дельта роботів компанії ABB

Модель робота	IRB 360	IRB 390	IRB 365
Кількість осей	4	4 - 5	5
Вантажопідйомність	До 8 кг	До 15 кг	До 1.5 кг
Робочий діапазон	До 1600 мм	До 1300 мм	До 1300 мм

Точність повторення	0,1 мм	До 0,02 мм	0,05 мм
Захист	IP56 (IP67 & 69К опц.)	IP67	IP54

OMRON Sysmac Delta є високошвидкісним дельта-роботом, інтегрованим у платформу Sysmac, який відзначається високою точністю та продуктивністю. Цей робот здатний виконувати до 200 циклів на хвилину і забезпечує синхронізацію з кількома конвеєрами для безперервних операцій Pick & Place. На рисунку 1.11 показано зовнішній вигляд робота OMRON Sysmac Delta.



Рис. 1.11. OMRON Sysmac Delta [15]

Компанія пропонує лінійку роботів: Hornet 565, Quattro 650/800, iX3, iX4, Sysmac Delta . Контролер NJ забезпечує час відгуку 2 мс при управлінні 8 роботами та 1 мс при 4 роботах, що підвищує продуктивність та точність.

Технічна специфікація наведена в таблиці 3.

Таблиця 3. Технічна специфікація серії роботів виробництва OMRON

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модель робота	Hornet 565	Quattro 650/800	iX3	iX4	Sysmac Delta
Кількість осей	3/4	3/4	3/4	4	2/3
Вантажопідйомність/ без четвертої вісі	3/8 кг	6/15 кг- 4/10 кг	3/8	3/12 - 6/15	1 кг -35 кг
Робочий діапазон (радіус)	565 мм	650 мм 800 мм	565 мм	650 мм - 800 мм	325мм- 750мм
Точність повторення	±0,1 мм	±0,1 мм	±0,1 мм	±0,1 мм	±0,4 мм - ±0,1 мм
Захист	IP65, IP67, IP69K	IP65, IP67	IP65, IP67	IP65, IP67	IP65, IP67

FANUC M, DR- це компактні дельта-роботи, розроблені для високошвидкісних операцій Pick & Place, особливо у фармацевтичній, харчовій та електронній промисловості. Зовнішній вигляд робота наведено на рисунку 1.12.



Рисунок 1.12. FANUC M-1iA [16]

Технічні характеристики наведені в таблиці 4.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4. Технічні характеристики роботів серії M виробника FANUC.

Модель робота	M-1iA	M-2iA	M-3iA	DR-3
Кількість осей	Від 3 до 6	Від 3 до 6	Від 3 до 6	4
Вантажопідйомність	до 1 кг	до 3 до 6 кг	до 12 кг	до 8 кг
Робочий радіус	420 мм	1130 мм	1350 мм	1600 мм
Повторюваність	Від $\pm 0,02$ до $\pm 0,03$ мм	$\pm 0,1$ мм	$\pm 0,1$ мм	$\pm 0,03$ мм
Захист	IP20	IP69K	IP67	IP69K

KUKA Quantec Delta - це високопродуктивний дельта-робот, що використовується для швидких операцій сортування та пакування у харчовій, фармацевтичній та автомобільній промисловості. Зовнішній вигляд робота показано на рисунку 1.13.



Рис. 1.13. KUKA Quantec Delta [17]

Робот забезпечує високу точність та надійність, має модульний дизайн і підтримує інтеграцію з системами автоматизації KUKA.

Технічні характеристики наведені в таблиці 5.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модель робота	KR 3
Кількість осей	4
Вантажопідйомність	3 - 6 кг
Робочий радіус	600 мм
Повторюваність	$\pm 0,05$ мм
Захист	IP67

1.5 Напрямки розвитку дельта-роботів

Із розвитком високошвидкісних дельта-роботів важливою задачею постає зменшення ваги елементів в рухомих ланцюгах. Результатом цього є використання легких матеріалів, таких як вуглецеве волокно, в конструкціях дельта-роботів. М'якість таких матеріалів призводить до появи вібрацій в конструкції роботів.

Одним із сучасних підходів до вирішення цієї проблеми є оптимізація траєкторії переміщення рухомої платформи за допомогою різних методів аналізу пружно динамічних характеристик роботів та впливу зміни траєкторій на амплітуду вібрацій. [18, 19].

Отже методи знаходження оптимальної траєкторії руху дельта робота є ключовими для досягнення максимальних показників точності при збереженні високих динамічних показників.

Висновки до Розділу 1

У сучасних умовах розвитку, коли виробництво стає дедалі більш автоматизованим, особливого значення набувають гнучкі, ефективні та точні роботизовані системи.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одним із ключових етапів виробничого циклу є процеси збирання, сортування та пакування. Порівняльний аналіз типів промислових маніпуляторів показав, що саме дельта-роботи найкраще відповідають вимогам сучасної автоматизації для цих задач, де критичними показниками є швидкість та точність. За рахунок паралельної кінематики, вони забезпечені такими перевагами:

- Рекордна швидкість;
- Висока точність;
- Компактність;
- Жорсткість конструкції;

Світові лідери ринку пропонують широкий спектр робіт цього типу, що демонструє їх актуальність.

Впровадження цих робіт у виробничі процеси забезпечить:

- Значне підвищення продуктивності і якості операцій збирання та пакування;
- Мінімізацію людського фактора і ризиків пошкодження продукції;
- Зниження витрат та підвищення конкурентоспроможності підприємств;

Отже, дельта – роботи є оптимальним вибором для автоматизації задач збирання та пакування. Їх застосування дозволить досягти високої ефективності та якості цих процесів, що є вагомим фактором успіху виробництва в умовах стрімкого розвитку та зростанню

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ОПИС ДЕЛЬТА-РОБОТІВ

2.1 Будова дельта-робота.

Основні його частини приведені на рисунку 1.4. Робот складається з двох платформ: Нерухомої закріпленої верхньої платформи (1) та рухомої платформи (8). Три важелі управління (4) жорстко закріплені своїм першим кінцем (15) на трьох валах (2), що можуть обертатися. Три вузли, кожен з яких утворений валом (2) і важелем (4), є рухомими частинами трьох приводів (13), з яких нерухомі частини (3), двигуни, закріплені на верхній основі. Другий кінець (16) кожного важеля управління з'єднаний з рухомим елементом за допомогою двох з'єднувальних планок (5а, 5b), закріплених на шарнірах (6а, 6b) з одного боку на кінці важеля управління (16), а з іншого на кінці рухомої основи (8) шарнірами (7а, 7b). Дві з'єднувальні планки утворюють паралелограм, бокова сторона (16) якого завжди залишається перпендикулярною важелям (5) та паралельною верхній основі (1). Завдяки цьому нахил та орієнтація в просторі рухомої платформи (8) залишаються незмінними, якими б не були рухи трьох важелів управління, тобто вона завжди залишається паралельною верхній основі (1). Цим обумовлена паралельна кінематика, притаманна для цього типу робота.

В центрі рухомої платформи (8) закріплюється робочий елемент (9), обертання якого контролюється нерухомим двигуном (11), розташованим на нерухомій основі. Зв'язок між двигуном (11) та робочим елементом (9) забезпечується за рахунок телескопічного кронштейну (14) [11].

2.2 Кінематичний розрахунок

Головною задачею перед побудовою дельта-робота є вирішення задач кінематики, що дозволить нам знайти необхідні розміри робота.

Першою задачею є зворотна задача кінематики. В ній нам відомі координати бажаної позиції центру нижньої основи дельта-робота, а

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

невідомою є величина кутів, на які необхідно повернути верхні важелі (4) відносно верхньої основи (1), як показано на рисунку 1.4.

Другою задачею є знаходження невідомих координат центру основи (8), при відомих кутах повороту важелів (4) відносно основи (1).

Розв'язок цих задач є основою принципу роботи дельта робота.

2.2.1 Зворотня задача кінематики

Для розрахунків будемо брати до уваги наступні величини:

F – довжина сторони трикутника основи

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – кути повороту важелів відносно площини верхньої основи

R_l – довжина верхнього важеля

R_r – довжина нижнього важеля

f – довжина сторони трикутника нижньої основи

$V(x_V, y_V, z_V)$ – Координати центру рухомої платформи

Всі розрахунки будемо проводити в межах площини, для цього вводимо систему координат з початком в центрі описаного кола основи (1), як показано на рисунку 2.1.

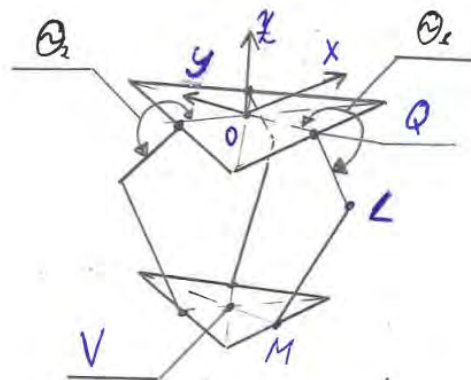


Рис. 2.1. Схематичний вигляд дельта-робота

Конструкція має на увазі, що верхній важіль QL може обертатись лише у площині YOZ, описуючи коло радіусом QL з центром в точці Q. На відміну від Q, у вузлах L та M встановлені універсальні шарніри, за допомогою яких плече LM описує сферу радіусу LM з центром в точці M. Перетин площини YOZ з цією сферою є коло з центром в точці N (що є проекцією точки M на площину YOZ). Відповідно розрахунки кута θ_1 мають наступний вигляд:

$$VM = \frac{f}{2} \tan 30^\circ = \frac{f}{2\sqrt{3}}$$

$$M = \left(x_V, y_V - \frac{f}{2\sqrt{3}}, z_V \right)$$

$$N = \left(0, y_V - \frac{f}{2\sqrt{3}}, z_V \right)$$

$$\overline{MN} = (-x_V, 0, 0)$$

$$NL = \sqrt{LM^2 - MN^2} = \sqrt{R_r^2 - x_V^2}$$

$$Q = \left(0, -\frac{F}{2\sqrt{3}}, 0 \right)$$

$$NQ = \sqrt{(y_N - y_Q)^2 + (z_Q - z_N)^2} = \sqrt{(y_N - y_Q)^2 + (-z_N)^2}$$

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно з теоремою синусів визначаємо:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{NQ^2 + QL^2 - NL^2}{2 * NQ * QL} \quad (2.1)$$

Кут β :

$$\beta = \cos^{-1} \frac{y_M - y_Q}{NQ} \quad (2.2)$$

Тоді кут θ_1 :

$$\theta_1 = 360^\circ - \alpha - \beta \quad (2.3)$$

Для розрахунку наступних двох кутів θ_2 , θ_3 додаємо допоміжну систему координат, повернуту на 120° відносно осі Z. Для переведення координат точки V будемо використовувати наступні формули:

$$x_{V_{120}} = x_V * \cos 120^\circ - y_V * \sin 120^\circ \quad (2.4)$$

$$y_{V_{120}} = x_V * \sin 120^\circ + y_V * \cos 120^\circ \quad (2.5)$$

Для 240° :

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$x_{V_{240}} = x_V * \cos 240^\circ - y_V * \sin 240^\circ \quad (2.6)$$

$$y_{V_{240}} = x_V * \sin 240^\circ + y_V * \cos 240^\circ \quad (2.7)$$

2.2.2 Пряма задача кінематики

Для вирішення ПЗК вихідними даними є кути важелів відносно основи
(1) $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, як наведено на рисунку 2.2.

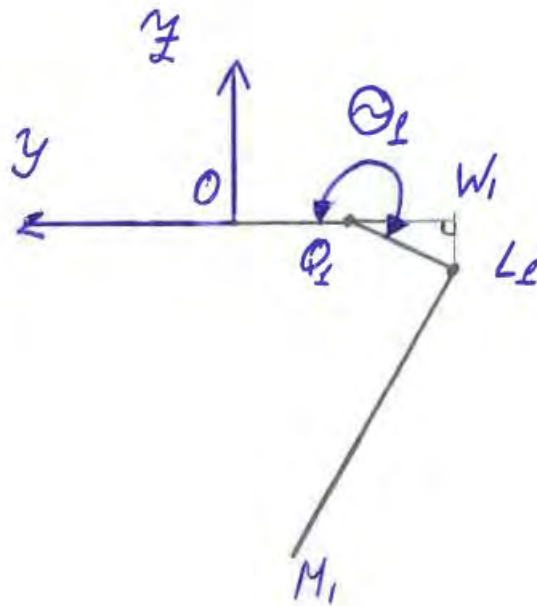


Рис. 2.2. Спрощений вигляд дельта-робота для розрахунків ПЗК

Значення координат точки Q:

$$Y_Q = -\frac{F\sqrt{3}}{6}$$

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відповідно координати точки L_1 :

$$Y_{L_1} = -\frac{F\sqrt{3}}{6} - R_l * \cos(\theta_1 - 180^\circ)$$

$$Z_{L_1} = -R_l * \sin(\theta_1 - 180^\circ)$$

Відповідно координати по осі Z інших точок:

$$Z_{L_2} = -R_l * \sin(\theta_2 - 180^\circ)$$

$$Z_{L_3} = -R_l * \sin(\theta_3 - 180^\circ)$$

Для розрахунку значення координат цих точок по осі Y знову будемо користуватись поверненням площини YOZ відносно осі Z , але проти годинникової стрілки.

$$y'_{L_2} = -\frac{F\sqrt{3}}{6} - R_l * \cos(\theta_2 - 180^\circ)$$

$$y'_{L_3} = -\frac{F\sqrt{3}}{6} - R_l * \cos(\theta_3 - 180^\circ)$$

$$x_{L_2} = y'_{L_2} \sin 120^\circ$$

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$y_{L_2} = y'_{L_2} \cos 120^\circ$$

$$x_{L_3} = y'_{L_3} \sin 240^\circ$$

$$y_{L_3} = y'_{L_3} \cos 240^\circ$$

З урахуванням того, що вали в точках L_1, L_2, L_3 закріплені на шарнірах, то описують 3 сфери з центрами в цих точках та радіусами $L_1M_1, L_2M_2, L_3M_3 = R_r$. Для знаходження координат центру нижньої основи змістимо центри цих сфер в площині XY в напрямку осі Z, використовуючи вектори зміщення M_1V, M_2V, M_3V , відповідно. Після цих перетворень всі сфери перетинаються в центрі V основи (8), як показано на рисунку 2.3.

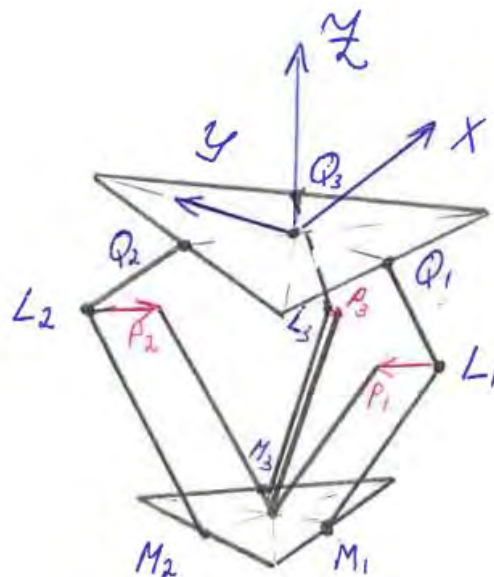


Рис. 2.3. Перетворення необхідні для розрахунку ПЗК

Відповідно, для знаходження координат точки V, нам необхідно вирішити систему рівнянь, що описують тривимірні сфери, де P_1, P_2, P_3 – центри цих сфер:

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$(x - x_{P_i})^2 + (y - y_{P_i})^2 + (z - z_{P_i})^2 = R_r^2$$

Де $(x_{P_i}, y_{P_i}, z_{P_i})$ – координати центрів сфер P_1, P_2, P_3

$$M_3 V = M_2 V = M_1 V = \frac{f\sqrt{3}}{6}$$

Тоді координати точок P_1, P_2, P_3 :

$$P_1 \left\{ 0; Y_{L_1} + \frac{f\sqrt{3}}{6}; -R_l * \sin(\theta_1 - 180^\circ) \right\}$$

$$P_2 \left\{ x_{L_2} + \frac{f\sqrt{3}}{6} \cos 30^\circ; y_{L_2} - \frac{f\sqrt{3}}{6} \sin 30^\circ; -R_l * \sin(\theta_2 - 180^\circ) \right\} \quad (2.8)$$

$$P_3 \left\{ x_{L_3} - \frac{f\sqrt{3}}{6} \cos 30^\circ; y_{L_3} - \frac{f\sqrt{3}}{6} \sin 30^\circ; -R_l * \sin(\theta_3 - 180^\circ) \right\}$$

Після цього шукаємо координати точки V, як найменші, по осі Z, розв'язок системи:

$$\begin{cases} (x_{P_1} - x_V)^2 + (y_{P_1} - y_V)^2 + (z_{P_1} - z_V)^2 = R_r^2 \\ (x_{P_2} - x_V)^2 + (y_{P_2} - y_V)^2 + (z_{P_2} - z_V)^2 = R_r^2 \\ (x_{P_3} - x_V)^2 + (y_{P_3} - y_V)^2 + (z_{P_3} - z_V)^2 = R_r^2 \end{cases} \quad (2.9)$$

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вводимо позначення:

$$\omega_{P_i} = x_{P_i}^2 - y_{P_i}^2 - z_{P_i}^2$$

Тоді:

$$\begin{cases} x_V^2 + y_V^2 + z_V^2 - 2x_{P_1}x_V - 2y_{P_1}y_V - 2z_{P_1}z_V = R_r^2 - \omega_{P_1} \\ x_V^2 + y_V^2 + z_V^2 - 2x_{P_2}x_V - 2y_{P_2}y_V - 2z_{P_2}z_V = R_r^2 - \omega_{P_2} \\ x_V^2 + y_V^2 + z_V^2 - 2x_{P_3}x_V - 2y_{P_3}y_V - 2z_{P_3}z_V = R_r^2 - \omega_{P_3} \end{cases}$$

Віднімемо з першого рівняння друге та третє, а також з другого третє:

$$\begin{cases} (x_{P_2} - x_{P_3})x_V + (y_{P_2} - y_{P_3})y_V + (z_{P_2} - z_{P_3})z_V = \frac{\omega_{P_2} - \omega_{P_3}}{2} \\ (x_{P_2} - x_{P_1})x_V + (y_{P_2} - y_{P_1})y_V + (z_{P_2} - z_{P_1})z_V = \frac{\omega_{P_2} - \omega_{P_1}}{2} \end{cases}$$

Нехай, $x_{P_{i+1}} - x_{P_i} = a_i$, $y_{P_{i+1}} - y_{P_i} = b_i$, $z_{P_{i+1}} - z_{P_i} = c_i$, $\frac{\omega_{P_{i+1}} - \omega_{P_i}}{2} = d_i$

$$\begin{cases} a_2x_V + b_2y_V + c_2z_V = d_2 \\ a_1x_V + b_1y_V + c_1z_V = d_1 \end{cases}$$

За допомогою метода Крамера визначимо x_V , та y_V :

$$x_V = \frac{b_2c_1 - b_1c_2}{a_2b_1 - a_1b_2}z_V + \frac{b_1d_2 - b_2d_1}{a_2b_1 - a_1b_2}$$

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$y_V = \frac{a_1c_2 - a_2c_1}{a_2b_1 - a_1b_2} z_V + \frac{a_2d_1 - a_1d_2}{a_2b_1 - a_1b_2}$$

Нехай,

$$e_1 = \frac{b_2c_1 - b_1c_2}{a_2b_1 - a_1b_2}$$

$$f_1 = \frac{b_1d_2 - b_2d_1}{a_2b_1 - a_1b_2}$$

$$e_2 = \frac{a_1c_2 - a_2c_1}{a_2b_1 - a_1b_2}$$

$$f_2 = \frac{a_2d_1 - a_1d_2}{a_2b_1 - a_1b_2}$$

$$x_V = e_1z_V + f_1$$

$$y_V = e_2z_V + f_2$$

Підставляємо отримані значення в перше рівняння системи (2.9), та отримуємо наступне квадратне рівняння:

$$mz_V^2 + nz_V + p = 0$$

					ПК11.080000.000 ПЗ Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Тоді,

$$z_V = \frac{-n - \sqrt{D}}{2m} \quad (2.10)$$

Відповідно для знаходження координат рухомої основи будемо використовувати ці формули.

2.2.3 Обмеження робочої зони дельта робота

На рух механізму накладається перелік обмежень з точки зору руху. Головне з них, це те, що поворот важелів на заданий кут не має приводити до перетину конструктивних елементів робота, як показано на рисунку 2.4.

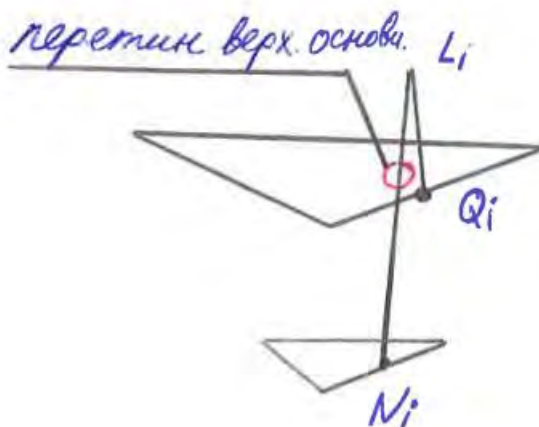


Рис. 2.4. Перетин конструктивних елементів робота

Обмеження руху за рахунок конструктивних особливостей будемо оцінювати враховуючи відстань між верхнім важелем та нижнім плечем, та мінімальним кутом між верхньою основою та верхнім плечем, як показано на рисунку 2.5.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

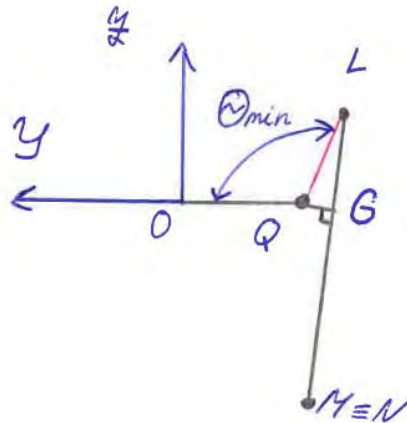


Рисунок 2.5. Схема дельта-робота для розрахунку обмежень

Відстань QG є сумою радіуса штанги і радіуса кола, в яке можна вписати всі приводні елементи (мотор, редуктор, кріплення). Визначати кут θ_{min} будемо шляхом перебору.

Для оцінки близькості одного плеча до іншого будемо використовувати кут γ , який немає бути меншим за значення γ_{min} , як показано на рисунку 2.6, що залежить від відстані QG. З іншого боку не може бути більшим за 180° .

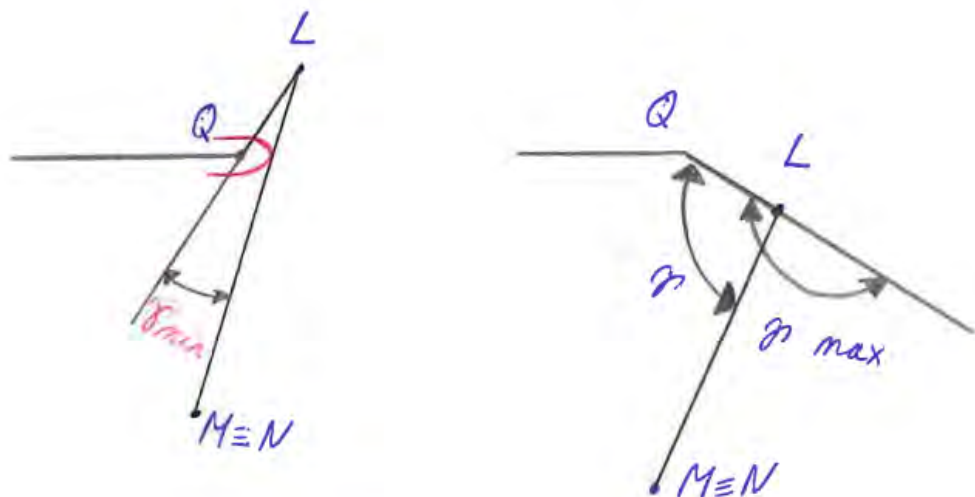


Рис. 2.6. Схема дельта-робота для розрахунку робочої зони

Кут γ знайдемо за формулою:

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\gamma = 180^\circ - \cos^{-1} \frac{-Z_l}{QL} - \sin^{-1} \frac{Y_N - Y_L}{LN} \quad (2.11)$$

Кут γ_{min} знайдемо з трикутника QL`G, враховуючи, що L`G є дотичною до кола з центром в точці Q та радіусом GQ:

$$\gamma_{min} = \sin^{-1} \frac{GQ}{QL} \quad (2.12)$$

Наступне обмеження накладається за рахунок обмежень в шарнірах (6а, 6б). Для перевірки виконання цього обмеження будемо аналізувати кут φ між плечем та площиною оберту цього плеча, що не має перевищувати кут робочого діапазону шарніра φ_{max} .

Відповідно цей кут знайдемо за формулою:

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{|x_V|}{R_r} \quad (2.13)$$

Відповідного для кожного плеча будемо проводити розрахунку в площинах повернутих відповідно на 120° та 240°

Останнім обмеженням будемо враховувати допустиме значення кута тиску, перевищення якого може привести до заклинювання і самозупинки. Цей кут буде між дотичною до кола, що описує керуючий важіль, та нижнім плечем, як показано на рисунку 2.7.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

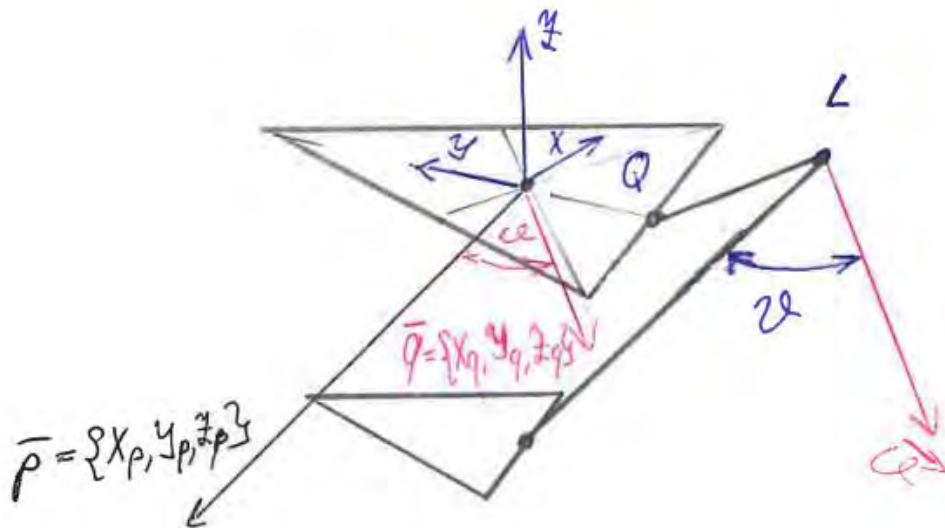


Рис. 2.7. Візуалізація кута тиску

Для цього визначимо координати векторів $\bar{r}$ та $\bar{q}$:

$$X_P = X_M - X_L$$

$$Y_P = Y_M - Y_L$$

$$Z_P = Z_M - Z_L$$

$$X_q = 0$$

$$Y_q = Z_L - Z_Q$$

$$Z_q = Y_Q - Y_L$$

Значення кута тиску буде дорівнювати:

$$\vartheta = \cos^{-1} \frac{|X_p X_q + Y_p Y_q + Z_p Z_q|}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_p^2} * \sqrt{X_q^2 + Y_q^2 + Z_q^2}} \quad (2.14)$$

2.3 Розрахунок передаточного механізму.

Для збільшення крутного моменту на валу, що буде обертати верхнє плече застосуємо ремінну передачу, як показано на рисунку 2.8.

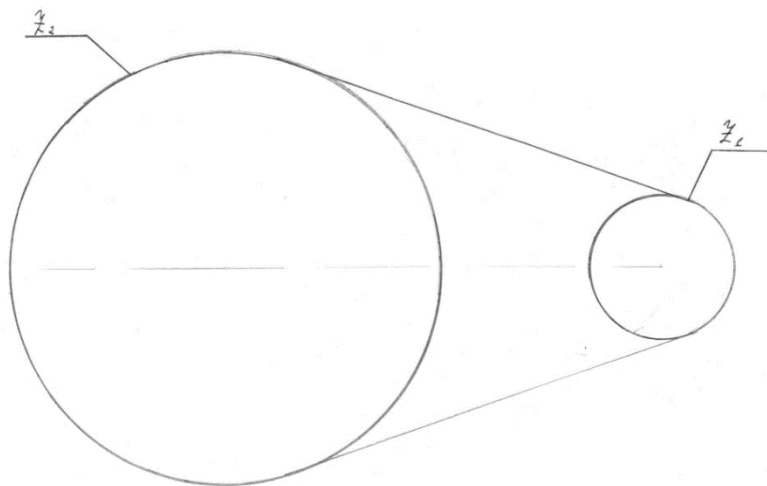


Рис. 2.8. Передаточний механізм від двигуна до валу верхнього плеча

Відповідно передаточне число будемо розраховувати за формулою:

$$i = \frac{Z_2}{Z_1}$$

ККД цього приводу будемо розраховувати за формулою:

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\eta_{\text{пр.}} = \eta_{\text{рем.перед.}} * \eta_{\text{підш.коч.}}$$

де,

$\eta_{\text{рем.перед.}} = 0.95$ – ККД ремінної передачі;

$\eta_{\text{підш.коч.}} = 0.98$ – ККД пари підшипників кочення;

Момент на вихідному валу буде дорівнювати:

$$M_2 = M_1 * i * \eta_{\text{пр.}}$$

Також відношення кутових швидкостей і кутів оберту буде наступним:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{i}$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1}{i}$$

Висновки до Розділу 2

У цьому розділі було детально розглянуто будову та принцип дії дельта-робота. Встановлено, що характерною особливістю цього типу роботів є збереження паралельності рухомої платформи відносно нерухомої незалежно від положення виконавчих важелів, що забезпечує високу точність позиціонування.

Розв’язано основні задачі кінематики – зворотню та пряму. Наведено покрокові математичні розрахунки, що описують рух механізму.

Проаналізовано механічні обмеження, що призводять до зменшення робочої зони робота, на відміну від ідеальних умов, а також визначено допустимі діапазони руху важелів.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розглянуто принцип роботи передаточного механізму, що забезпечує підвищення крутного моменту за допомогою ремінної передачі, а також розглянуто основні формули її розрахунку.

Виконані дослідження та розрахунки є основою для наступних етапів проектування дельта-робота.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Розрахунок робочої зони дельта-робота:

Для знаходження робочої зони дельта робота будемо використовувати раніше виведені формули. Для цього ми спочатку вирішимо пряму задачу кінематики для знаходження всіх точок центра рухомої основи за допомогою обрахунків формул 2.8 – 2.10, а потім обернену, використовуючи формули 2.1-2.7 для перевірки знаходження цих точок в межах допустимої робочої зони. Також будемо робити перевірку обмежень розраховуючи відповідні кути за формулами 2.11-2.14 і порівнюючи з граничними.

В якості вхідних параметрів будемо використовувати бажані розміри проектного робота

$$F = 260 \text{ мм};$$

$$f = 120 \text{ мм};$$

$$140^\circ \leq \theta_1, \theta_2, \theta_3 \leq 270^\circ$$

$$R_l = 128.5 \text{ мм};$$

$$R_r = 320 \text{ мм};$$

$$GQ = 24 \text{ мм}$$

$$\varphi_{\max} = 45^\circ;$$

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\vartheta_{max} = 45^{\circ};$$

Отримаємо наступну робочу зону, як показано на рисунках 3.1. – 3.2.

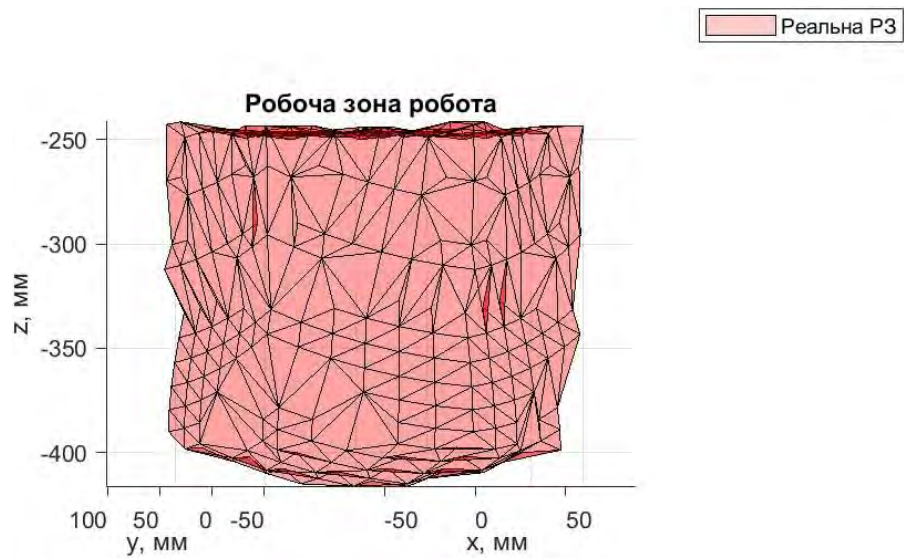


Рис. 3.1. Робоча зона дельта-робота

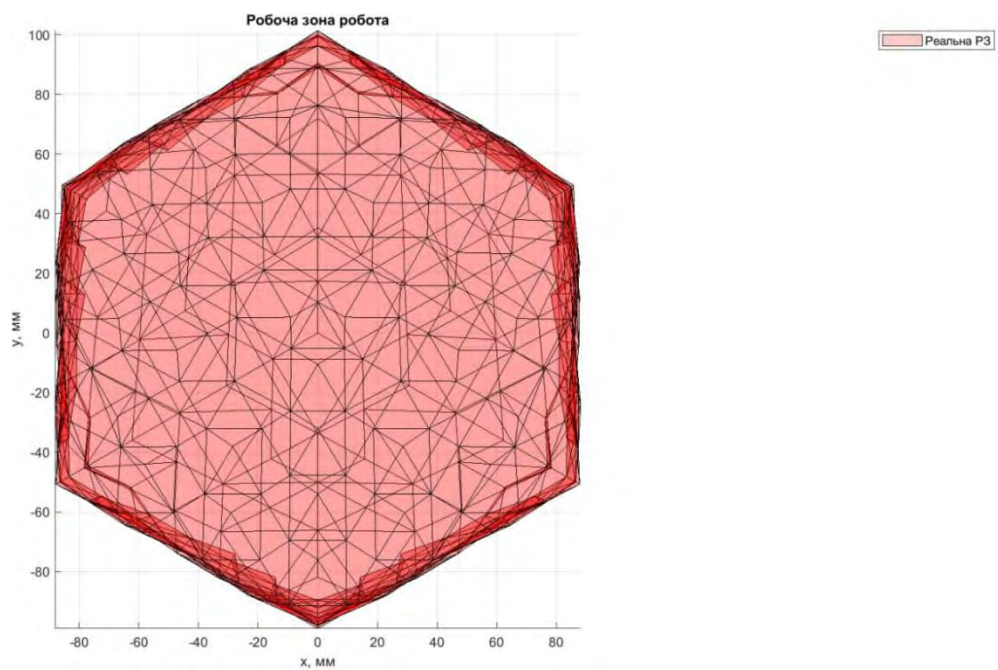


Рис. 3.2. Робоча зона дельта-робота (вид зверху)

Аналізуючи отриману область робимо висновок, що в неї ми зможемо вписати циліндр з діаметром 160 мм. та висотою 150 мм. Відобразимо це графічно, як показано на рисунках 3.3 – 3.4.

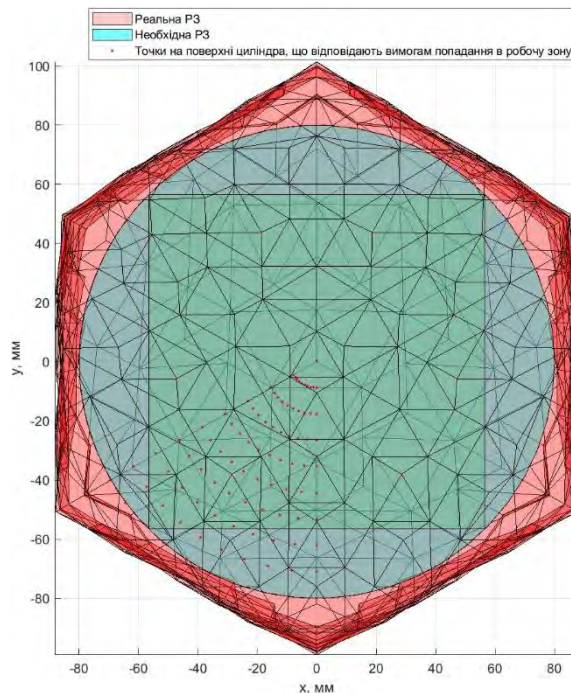


Рис. 3.3. Робоча зона, що вписується в допустимі значення (вид зверху)

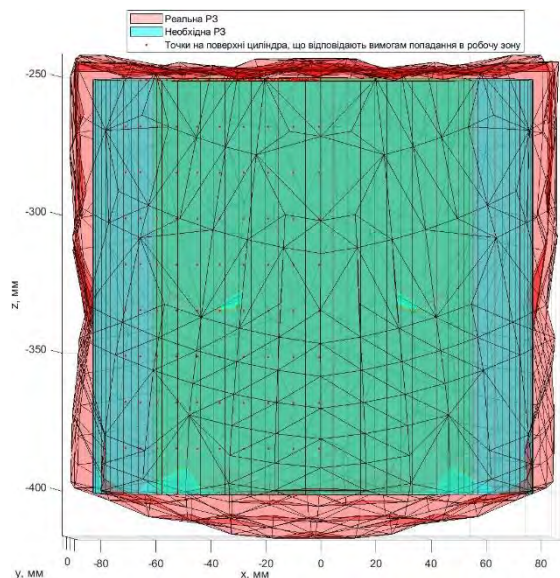


Рис. 3.4. Робоча зона, що вписується в допустимі значення (вид збоку)

Висновки до Розділу 3

У цьому розділі виконано аналітичний розрахунок та моделювання робочої зони дельта-робота на основі раніше виведених кінематичних рівнянь.

В результаті чисельного моделювання визначено, що допустима робоча зона дозволяє вписати в себе циліндр з діаметром 160 мм та висотою 150 мм, що відповідає вимогам завдання на дипломний проєкт.

Графічна інтерпретація отриманих результатів дозволила наочно переконатись у можливості використання робочої зони такого розміру для робота з такими геометричними розмірами. Це підтверджує правильність вибраних конструктивних параметрів.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. КОНСТРУКЦІЯ РОЗРОБЛЕНОГО ДЕЛЬТА-РОБОТА

4.1 Вибір компонентів для дельта робота

Дельта робот складається з двох типів компонентів, а саме: пасивних та активних. Пасивні компоненти – це конструктивні частини, до яких належать рама, вали, елементи кріплення, профілі, підшипники, шківів тощо. Активні – це електричні та електронні пристрої, що забезпечують керування і рух робота: мікроконтролер, двигуни, драйвери, сенсори та інші елементи системи. .

Для створення конструкції робота були обрані такі пасивні компоненти:

- V-подібні станочні профілі 20x20 мм;
- З'єднувачі профілів для формування верхньої трикутної основи;
- Тримачі кінцевих вимикачів;
- Корпус блоку керування (верхня та нижня частини);
- Корпус передаточного механізму з алюмінієвою проставкою;
- Пружина стискання для забезпечення натягування;
- Пластикові елементи редуктора;
- зубчасті шківів (6 мм шириною, на вали 5 мм/8 мм з відповідно 20 і 60 зубами)
- Ремінь GT2;
- Гладкий вал 8 мм;
- Підшипники кочення;
- З'єднувач вихідного валу з верхнім плечем;
- Профіль алюмінієвий 10x20 мм;
- З'єднувач верхнього та нижнього плеча;

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Шарнірні наконечники;
- Метричні вали М5;
- Проставки пластикові;
- Нижня платформа з отвором для механізму захвату;
- Т-гайки, болти, шайби типорозмірів М3 та М5;

Усі пластикові деталі виготовлятимуться методом 3D друку з використанням PLA – пластику, що має достатню міцність та термостійкість для задач робота, що проектується.

4.2 Візуалізація розробленого робота

Для візуалізації конструкції було використано середовище 3D – моделювання SolidWorks, у якому змодельовано всі основні частини дельта-робота, згідно з обраними механічними параметрами.

4.2.1 Верхня основа

Рама верхньої основи побудована з'єднанням V-подібних профілів 20x20 мм у форму правильного трикутника з використанням роздрукованих пластикових з'єднувачів. Зовнішній вигляд рами верхньої основи зображено на рисунку 4.1.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 4.1. Зовнішній вигляд рами верхньої основи

4.2.2 Блок керування

Блок керування є частиною верхньої платформи, в якому розміщено електроніку: мікроконтролер, драйвери моторів, прилади системи захвату. Корпус блоку складається з двох частин і кріпиться до профілю рами за допомогою гвинтів M5 і Т-гайок. Зовнішній вигляд показано на рисунку 4.2.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

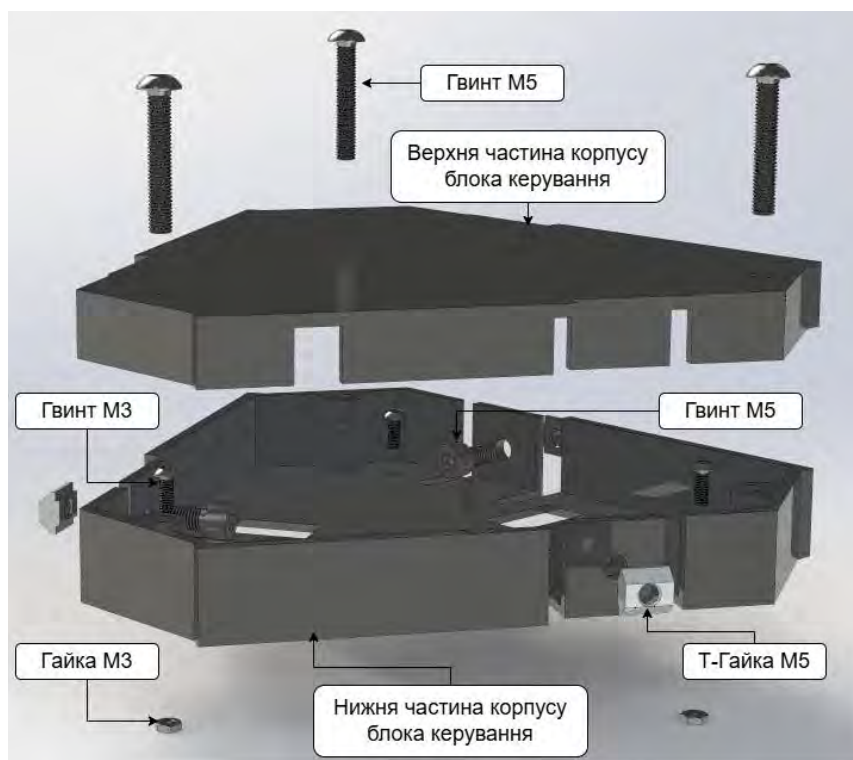


Рис. 4.2. Зовнішній вигляд корпусу блоку керування

4.2.3 Тримач кінцевого вимикача

Цей елемент фіксує положення кінцевих вимикачів на рамі та дозволяє точно налаштувати їх розташування. Його конструкція показана на рисунку 4.3.

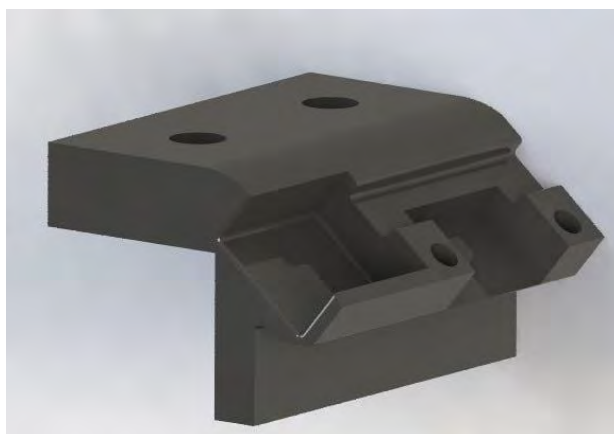


Рис. 4.3. Зовнішній вигляд тримача кінцевого вимикача

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2.4 Передаточний механізм

Передача моменту від двигуна до валу, що обертає верхнє плече, здійснюється за допомогою ремінного механізму, який складається з корпусу, двох шківів, ременя GT2, системи натягу та підшипників. Посилення жорсткості забезпечує алюмінієва проставка. Модель передаточного механізму зображено на рисунку 4.4.

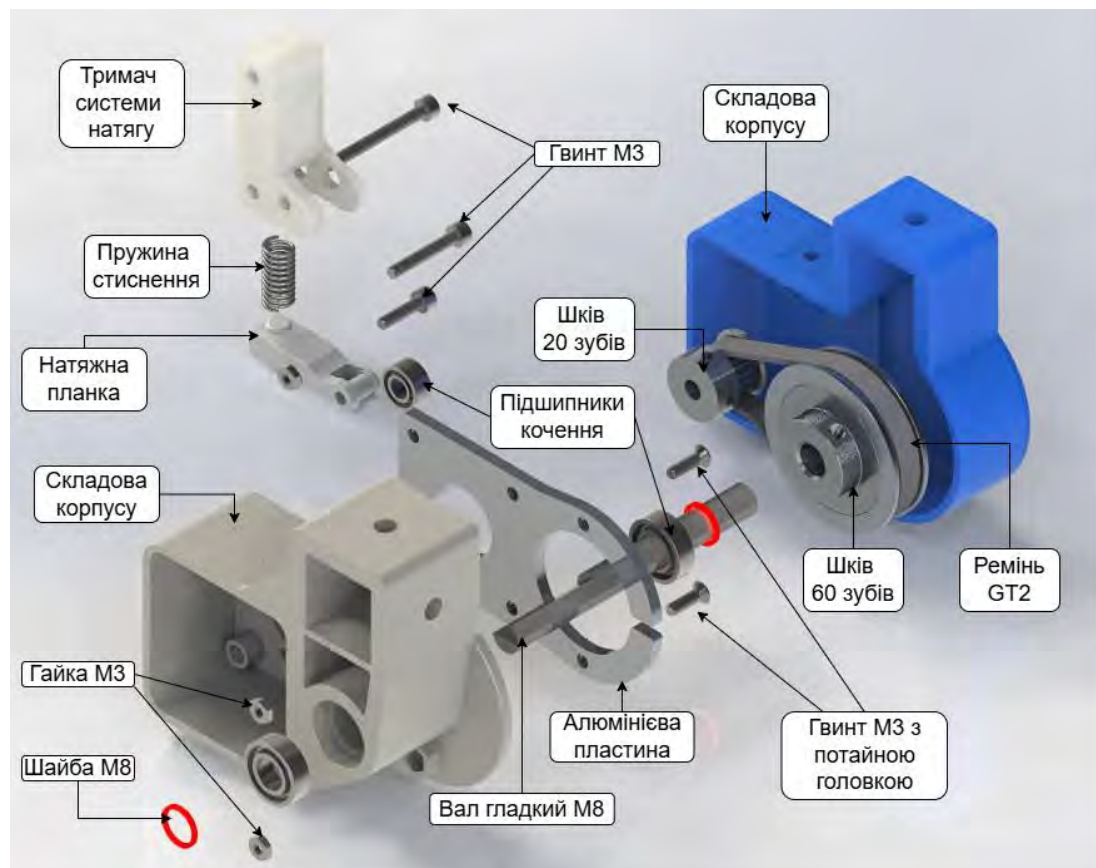


Рис. 4.4. Складові передаточного механізму

4.2.5 Верхнє плече

Верхнє плече складається з надрукованого з'єднувача вихідного валу передаточного механізму з верхнім плечем, алюмінієвого профілю 10x20 мм, надрукованого з'єднувача верхнього плеча з нижнім. Зовнішній вигляд зображено на рисунку 4.5.

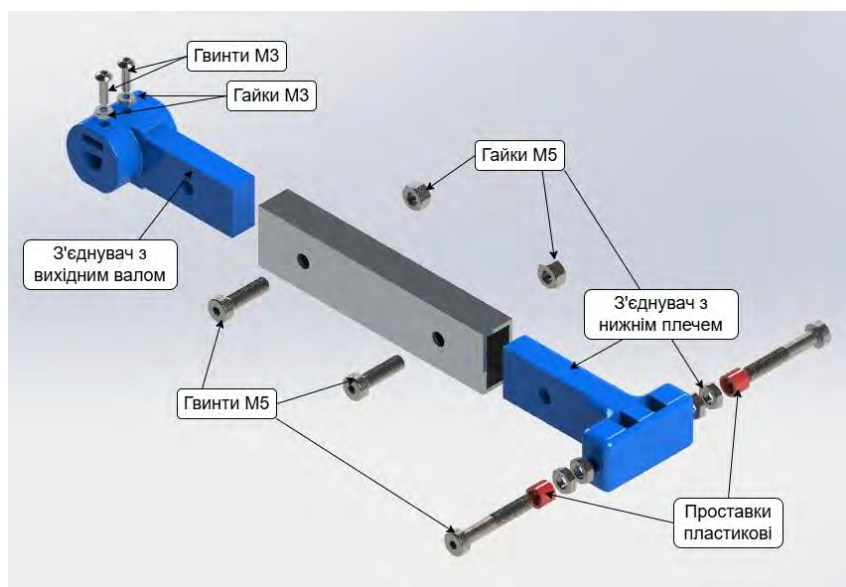


Рис. 4.5. Зовнішній вигляд верхнього плеча

4.2.6 Нижнє плече

Нижнє плече містить шарнірний підшипник (рисунок 4.6) та метричний вал М5.



Рис. 4.6. Шарнірний підшипник

4.2.7 Нижня основа

Виготовляється з пластика з отворами для кріплення системи захвату. Зовнішній вигляд зображено на рисунку 4.7.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 4.7. Нижня основа

4.2.8 Зовнішній вигляд дельта-робота

Використовуючи всі складові компоненти описані раніше було створено повну модель дельта-робота, зовнішній вигляд якої показано на рисунку 4.8.

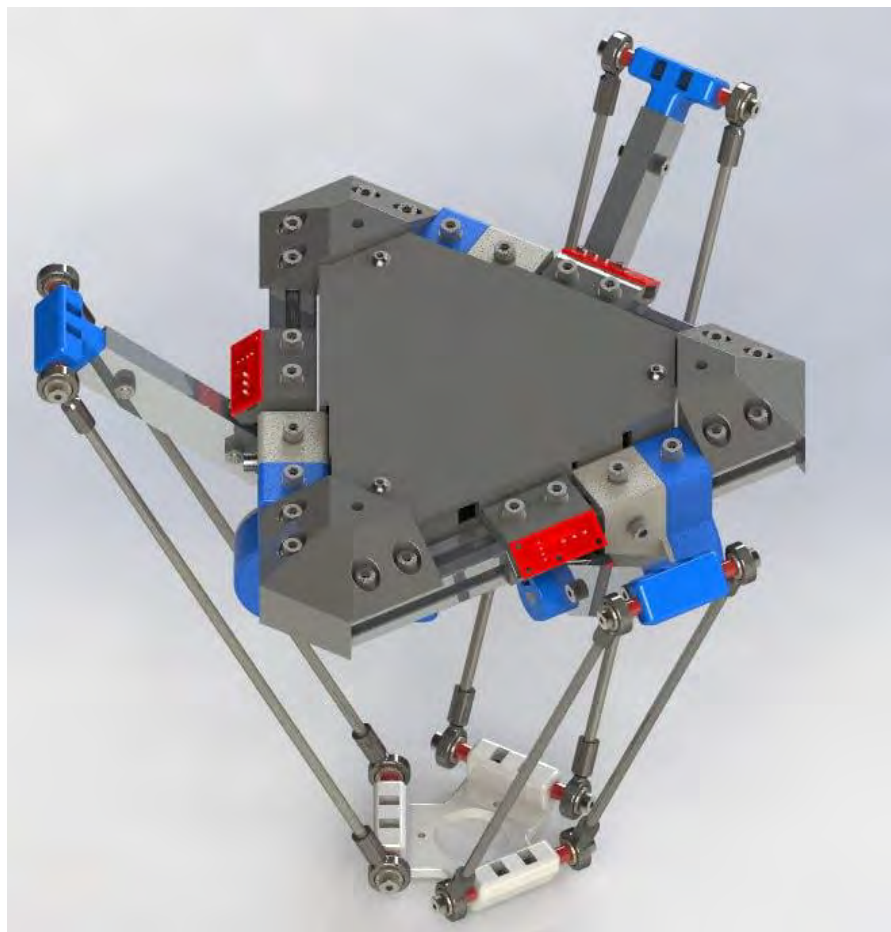


Рис. 4.8. Дельта-робот

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК11.080000.000 ПЗ

Арк.

Висновки до Розділу 4

У цьому розділі було виконано візуалізацію конструктивної частини дельта-робота. Систему розділено на активні та пасивні компоненти, що дозволило чітко визначити функціональні задачі кожного з елементів у загальній структурі пристрою.

Обрано й описано комплект пасивних конструктивних елементів, таких як профілі, підшипники, вали, корпуси, елементи кріплення, шків та інші. Усі пластикові компоненти були спроектовані з урахуванням можливості їх виготовлення за допомогою 3D друку з використанням PLA – пластику, що забезпечує необхідну жорсткість.

У середовищі SolidWorks побудовано тривимірну модель усіх складових конструкції: раму верхньої основи, корпус блоку керування, передаточний механізм, важелі верхній та нижній, нижню основу та з'єднувальні елементи. Це дозволило переконатися у взаємній сумісності компонентів, ергономії розміщення та загальній геометричній цілісності конструкції.

Створена 3D модель є повноцінним віртуальним прототипом, що готовий до виготовлення та складання.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5. СХЕМОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА

У цьому розділі розглянуто електронну частину керування дельта роботом. Включено розробку структурної та функціональної схем, вибір електричних компонентів і побуду принципової електричної схеми системи.

5.1 Розробка структурної схеми

Структурна схема дельта-робота демонструє основні функціональні вузли, та взаємодію між ними. Основними елементами системи є:

- Комп'ютер для обробки зображення з камери за допомогою бібліотеки OpenCV і відповідно сама камера;
- Мікроконтролер на базі плати Arduino UNO;
- Драйвери крокових двигунів;
- Крокові двигуни;
- Кінцеві вимикачі;
- Датчик відстані;
- Повітряний насос;
- Електромагнітний клапан;
- Блок живлення;

Вигляд побудованої структурної схеми зображено на рисунку 5.1.

Надається за запитом до авторів

Рис. 5.1. Структурна схема дельта-робота

5.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема деталізує логічну структуру взаємодії між усіма модулями системи керування дельта роботом. Вона служить для

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відображення основних потоків даних і сигналів керування, починаючи від сприйняття інформації за допомогою візуальної системи, обробки координат на комп'ютері, до фізичного виконання рухів та дій виконавчим механізмом. Завдяки функціональній схемі можна чітко відслідковувати, які саме сигнали надходять у систему, яким чином вони обробляються і як відбувається керування усіма складовими дельта-робота.

Вигляд розробленої функціональної схеми наведено на рисунку 5.2.

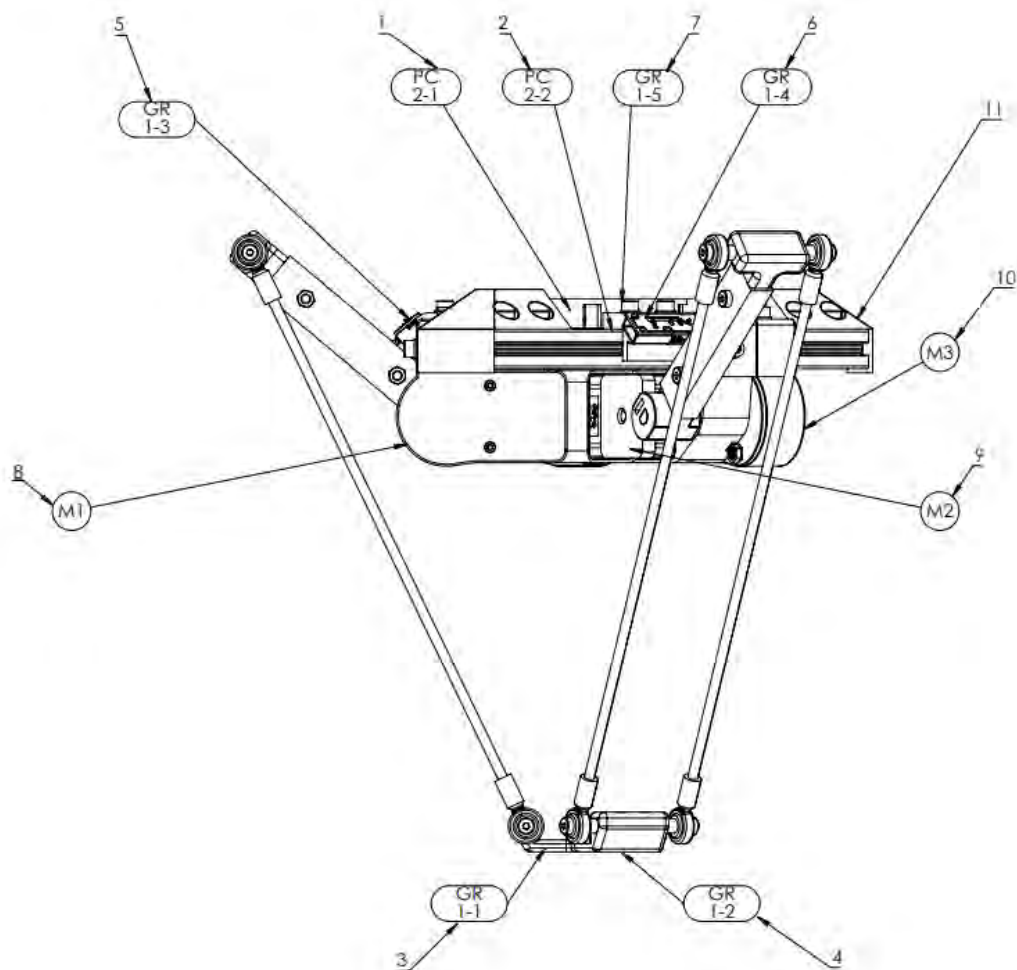


Рис. 5.2. Функціональна схема автоматизації дельта-робота

Позначення, що використовуються на функціональній схемі, представляють наступні елементи:

- М1- 3 – двигуни постійного струму;

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- GR 1-1 – лазерний датчик відстані;
- GR 1-2 – камера;
- GR 1-3 – GR 1-5 - кінцеві вимикачі;
- PC 2-1 – повітряний насос;
- PC 2-2 – Електромагнітний клапан;

Відбувається обмін даних між елементами функціональної схеми і мікроконтролером. Тип бажаних даних продемонстровано на рисунку 5.3.

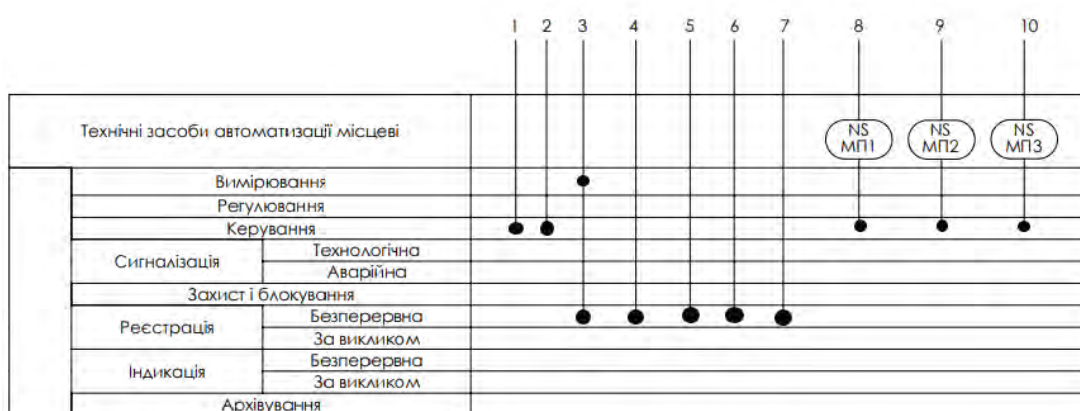


Рис. 5.2. Функціональна схема системи мікроконтролера дельта-робота

Технічні засоби автоматизації місцеві, показані на рисунку 5.2 наступні:

- NS – драйвери моторів постійного струму.

5.3 Вибір електричних компонентів

Важливим етапом кожного проекту є правильний вибір електричних (активних) компонентів, що будуть мати змогу оброблювати всю необхідну інформацію та виконувати відповідні функції. Крім того, цей етап має вирішальне значення для створення принципової електричної схеми з належною роботою системи.

5.3.1 Мікроконтролер

В якості керуючого пристрою в цій роботі буде застосовувались плата Arduino UNO з мікроконтролером ATmega328P. Він був обраний з урахуванням його простоти використання, широкий підтримці існуючих бібліотек, а також універсальності, завдяки якій його можливості можуть бути розширені під наші потреби. Цей контролер забезпечує стабільну роботу із зовнішніми модулями та підтримує популярні протоколи зв'язку, такі як I²C, UART та SPI. Зовнішній вигляд представлено на малюнку 5.3.

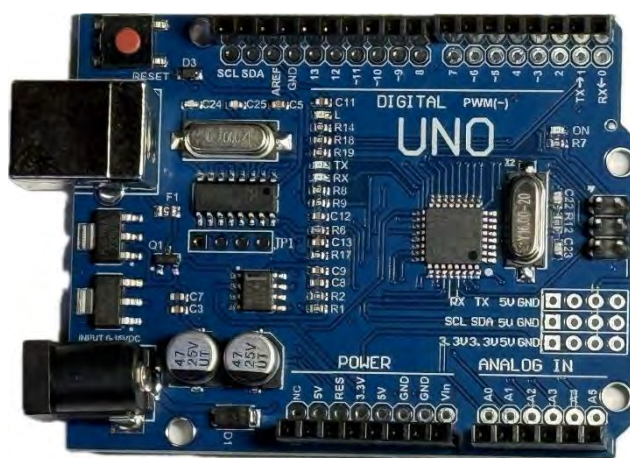


Рис. 5.3. Arduino UNO

Основні технічні характеристики:

- Мікроконтролер: ATmega328P;
- Вхідна напруга (рекомендована/допустима) В: 7-12/6-20;
- Цифрові піни I/O: 14 (6 з них підтримують ШІМ);
- Аналогові вхідні піни: 6;
- Флеш-пам'ять: 32Кб;
- SRAM: 2 Кб;
- Clock speed: 16 МГц;

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.3.2 Плата розширення

Для розширення кількості виходів плати Arduino UNO будемо використовувати плату розширення CNC Shield V3, зовнішній вигляд зображено на рисунку 5.4. Ця плата є зручною платформою, так як підтримує підключення чотирьох драйверів двигунів A4988, кінцевих вимикачів, а також можливість подачі живлення в діапазоні від 12 до 36 В.

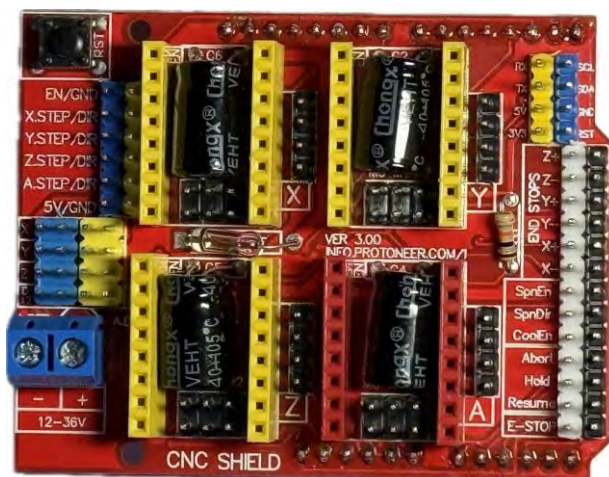


Рис. 5.4. CNC Shield V3

5.3.3 Драйвери моторів

В якості драйверів керування кроковими двигунами будемо використовувати драйвери A4988, показаного на рисунку 5.5. Вони базуються на мікросхемі Allegro A4988, яка підтримує управління двигунів у режимах від повно крокового до 1/16 крокового режимах. Це дозволяє реалізувати високу плавність та точність переміщення.



Рис. 5.5. Драйвер A4988

Основні технічні характеристики:

- Робоча напруга двигуна: 8-35 В;
- Максимальний струм навантаження: 2 А (з охолодженням);

5.3.4 Крокові двигуни

З урахуванням невеликих розмірів розробленого дельта-робота в якості двигунів будемо використовувати Nema17 HS4401, зовнішній вигляд показано на рисунку 5.6. Це гібридні двофазні двигуни з кроковим кутом 1.8° , що відповідає 200 крокам на один повний оберт ротора. У поєднанні з драйвером A4988 можна досягти показника 3200 кроків на оберт, що дозволить зменшити похибку рухів.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 5.6. Мотор Nema17HS4401

Основні технічні характеристики:

- Кроковий кут: 1.8° ;
- Номінальний струм: 1.7A;
- Крутний момент утримання 40 Н*см;

5.3.5 Кінцеві вимикачі

Для обмеження руху системи відповідно механічним характеристикам робота та встановлення референтного нуля на початку роботи системи будемо використовувати кінцеві вимикачі, що показані на рисунку 5.7.

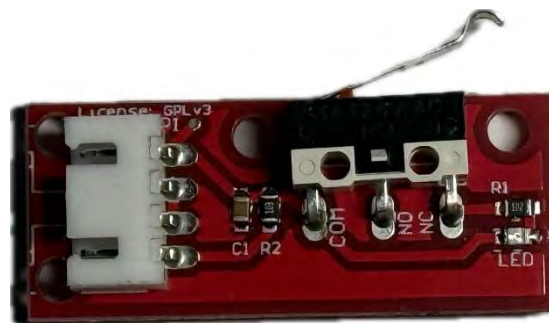


Рис. 5.7. Кінцевий вимикач

5.3.6 Датчик відстані

В якості датчика контролю відстані по осі Z будемо використовувати лазерний ToF датчик VL53L0X-V2, зовнішній вигляд якого показано на рисунку 5.8. Він використовує імпульсну технологію для точного вимірювання відстані до об'єкта, що забезпечує високу точність, до 1мм, у діапазоні до 2м.



Рис. 5.8. Датчик відстані VL53L0X-V2.

Основні технічні характеристики:

- Протокол зв'язку: I²C (до 400 кГц);
- Діапазон вимірювань відстані: 1 – 200 см;
- Напруга живлення: 2.6 – 3.5 В;
- Точність вимірювань відстані: ± 1 мм;

5.3.7 Камера

В якості камери для зорового позиціювання та розпізнавання об'єктів у полі зору робота будемо використовувати Logitech C270, яка зображена на рисунку 5.9. Вона підключатиметься до комп'ютера з метою обробки зображень у реальному часі.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 5.9. Камера Logitech C270.

Основні технічні характеристики:

- Роздільна здатність: HD 720p;
- Підключення: USB 2.0;

5.3.8 Компоненти системи захвату

Система захвату в цьому проекті реалізована на основі вакуумної технології, що дозволяє швидко, надійно та обережно взаємодіяти з об'єктами різної форми та розміру. В склад системи входять наступні електричні компоненти: повітряний насос, показаний на рисунку 5.10, та електромагнітний клапан, показаний на рисунку 5.11. Функцією електронасосу є забезпечення зниження тиску у вакуумній системі, забезпечуючи силу притягання. Електромагнітний клапан дозволяє керувати герметичність вакуумної системи.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 5.10. Насос Airpump-370C.

Основні технічні характеристики:

- Напруга живлення: 12 В;
- Продуктивність: 2.8-3 л/хв;



Рис. 5.11. Електромагнітний клапан.

Основні технічні характеристики:

- Номінальна напруга: 12В;
- Максимальний тиск: 0.4 бар;

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.3.9 Блок живлення

Для живлення усіх електричних компонентів використовується блок живлення на 12 В та струмом 10 А, зовнішній вигляд якого показано на рисунку 5.12.

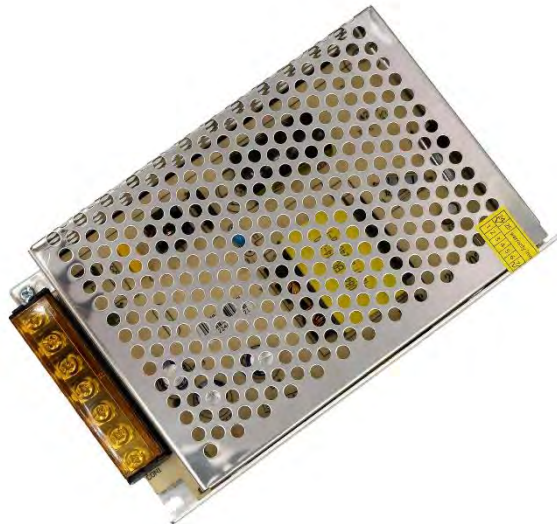


Рис. 5.12. Блок живлення.

5.4 Розробка електричної принципової схеми

Для повної реалізації проекту обов'язковим етапом є створення принципової електричної схеми. Вона забезпечує повне уявлення про взаємозв'язки між усіма електричними компонентами системи. В ході проектування дельта-робота була розроблена електрична принципова схема, показана на рисунку 5.13, що складається з компонентів, які відповідають за приведення в рух робочого інструмента робота та орієнтацію в просторі.

До складу електричної принципової схеми входять:

- Мікроконтролер Arduino Uno;

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Драйвера моторів постійного струму A4988;
- Двигуни постійного струму Nema17 HS4401;
- Кінцеві вимикачі;
- Датчик відстані VL53L0X;
- **Надається за запитом до авторів**

•

Рис. 5.13. Схема електрична принципова

Висновки до Розділу 5

У п'ятому розділі було детально розглянуто електронну частину дельта-робота, яка є критичною для функціонування механізму. Було розроблено структурну та функціональну схеми, які відображають загальну архітектуру системи та логіку взаємодії між усіма компонентами.

Виконано обґрунтований вибір електричних елементів: мікроконтролера Arduino Uno, драйверів моторів постійного струму A4988, датчику відстані, засобу для комп'ютерного зору у вигляді камери, а також елементів системи захвату (насоса і електромагнітного клапана). Усі компоненти були підібрані з урахуванням сумісності, доступності та відповідності технічним вимогам до розробленого дельта-робота.

Завершальним етапом розділу стала побудова електричної принципової схеми, яка демонструє електричні з'єднання активних елементів системи. Вона є основою подальшого складання, монтажу та налагодження системи керування дельта-роботом.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломного проекту було пройдено повний цикл розробки дельта робота для задач збирання та пакування.

В першому розділі було проаналізовано основні типи існуючих роботів маніпуляторів, їх плюси та мінуси та обґрунтовано вибір дельта-робота. Наведено історію впровадження роботів цього типу в промисловості, та проаналізовано основні характеристики існуючих роботів відомих виробників.

В другому розділі було описано складові дельта робота. Розглянуто кінематичні залежності, та виведені формули кінематичних розрахунків притаманних роботі робота, а саме формули для розрахунку прямої, зворотної задач кінематики, розглянуто основні обмеження та кінематичний розрахунок ремінної передачі.

В третьому розділі було побудовано дійсну робочу зону з урахуванням всіх обмежень, а також проаналізовано робочу зону, в межах якої буде працювати розроблений робот.

В четвертому розділі було побудовано зовнішню модель робота з урахуванням всіх необхідних деталей для його збирання.

В п'ятому розділі для наочності роботи приладу було побудовано структурну схему . Також було розроблено функціональну схему автоматизації робота з метою аналізу потоку даних. Також було обрано необхідні електричні (активні) компоненти робота з урахуванням кінематичних та механічних особливостей. Було розроблено електричну принципову схему для наочності підключення всіх електричних приладів в одну систему.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Schwab Klaus. The Fourth Industrial Revolution, 2016. P. 4.
- [2] Nayyar Anand, Kumar Akshi. A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development. 2020. P. 16.
- [3] Pantoja German, Giraldo Daniel, Montes Ana, García Andrea, Rodriguez Carlos, Marín César, Alvarez Martinez, David. Comprehensive Review of Robotized Freight Packing. *Logistics*. 2024. Vol. 8, No. 3. P. 2.
- [4] A. Renfrew. Book Review: Introduction to Robotics: Mechanics and Control. *International Journal of Electrical Engineering, Education*. 2004. Vol. 41, No. 4. P. 388.
- [5] M. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar. Robot Modeling and Control. *IEEE Control Systems*. 2006. Vol. 26, No. 6. P. 113–115.
- [6] Bottin M., Cipriani G., Tommasino D., Doria A. Analysis and Control of Vibrations of a Cartesian Cutting Machine Using an Equivalent Robotic Model. *Machines*. 2021. Vol. 9, No. 8. P. 162.
- [7] Mehmood Yasir, Cannella Ferdinando, Cocuzza Silvio. Analytical Modeling, Virtual Prototyping, and Performance Optimization of Cartesian Robots: A Comprehensive Review. *Robotics*. 2025. Vol. 14, No. 5. P. 62.
- [8] S. Suri, A. Jain, N. Verma, N. Prasertpoj. SCARA Industrial Automation Robot. *2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*. Greater Noida, India, 2018. P. 173-177.
- [9] M. Taylan Das, L. Canan Dülger. Mathematical modelling, simulation and experimental verification of a scara robot. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2005. Vol. 13, No. 3. P. 257-271.
- [10] Vitolo Ferdinando. Multi-Attribute Task Sequencing Optimisation with Neighbourhoods for Robotic Systems: thesis, eng., 2017. P. 10.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[11] Clavel, R., "Device for the Movement and Positioning of an Element in Space," US Patent No. 4,976,582, December 11, 1990.

[12] Elghitany Mohamed, Ahmed Asser, Zaki Dina, Behhit Dohaa, Hosni Hagar, Nour Hashem, Hassan Menna, Ali Nada, Khalaf Noha, Sobhy Rober, Alaaeldin Zeyad, Ahmed Mohamed. Advancements in Design, Kinematics, and Control: A Comprehensive Review of Delta Robot Research. *Advanced Sciences and Technology Journal*. 2024. Vol.1, No.2, P. 1-38.

[13] Bonev, Ilian. Delta Parallel Robot — the Story of Success. 2001. P. 2-7.

[14] Robots. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/robots> (дата звернення 15.04.2025).

[15] Parallel Robots. URL: <https://automation.omron.com/en/us/products/families/parallel-robots> (дата звернення 15.04.2025)

[16] Where There's Automation, There's Fanuc! URL: <https://www.fanuc.eu>. (Дата звернення 15.04.2025)

[17] KR DELTA robot in Hygienic Design. URL: <https://www.kuka.com/en-se/products/robotics-systems/industrial-robots/kr-delta-robot-hm> (дата звернення 15.04.2025)

[18] Mingkun Wu, Jiangping Mei, Yanqin Zhao, Wentie Niu. Vibration reduction of delta robot based on trajectory planning. *Mechanism and Machine Theory*. 2020. Vol. 153, No. 4.

[19] Cheng Hongtai, Li Wei. Reducing the Frame Vibration of Delta Robot in Pick and Place Application: An Acceleration Profile Optimization Approach. *Shock and Vibration*. Volume 2018. P. 1-15.

[20] Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.

					ПК11.080000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

Надається за запитом до авторів

					<i>ПК11.080000.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		