

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.ПМІ-66.00.00.000.ПЗ

Група ПМІ-20-1

Яцущак Роман

Мирославович

2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інженерної механіки та робототехніки

Кафедра комп'ютеризованого машинобудування

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДИВ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 2024 року

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Яцушаку Роману Мирославовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка двокоординатного паралельного робота

керівник роботи Врюкало В.В., доцент кафедри КМВ

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "30" травня 2024 року № 330/7

2. Строки подання студентом роботи 12 червня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи: Література з питань проектування роботів, характеристики крокових двигунів і драйверів, технічні вимоги до робота

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

1. Огляд та аналіз сучасних паралельних роботів та принципів їх роботи. 2. Дослідження робочої зони паралельного 2D робота, його конструювання 3. Аналіз прямої та зворотної задач. 4. Розробка програм керування паралельним роботом.

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

1. Промислові паралельні маніпулятори – 1 лист А1.

2. Дослідження робочої зони паралельного 2D робота – 1 лист А1.

3. Конструкція та деталі паралельного 2D робота – 1 лист А1.

4. Прямі та зворотні задачі паралельного 2D робота – 1 лист А1.

5. Програми керування паралельним роботом – 1 лист А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	Врюкало В.В., доцент кафедри КМВ	25.01.2024	25.01.2024

7. Дата видачі

завдання 25.01.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз літературних джерел	22.02.2024	
2	Проектування робота	18.05.2024	
3	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	10.06.2024	

Студент Яцушак Р.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Врюкало В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

“ 25 ” 01 2024 р.

Анотація

Бакалаврська робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавра на тему: «Розробка двокоординатного паралельного робота».

Бакалаврська робота складається з пояснювальної записки на 60 аркушах формату А4 з додатками, містить 29 рисунків та 7 таблиць. Графічна частина проекту містить 5 креслень формату А1.

Виконано аналіз конструкцій паралельних роботів. Проведено дослідження форми та розмірів робочої зони робота. Проведено аналіз задач прямої та зворотної кінематики робота. Отримано математичні залежності координат кінцевого ефектора від кутів повороту вхідних ланок для задачі прямої кінематики та залежності кутів повороту вхідних ланок робота від координат кінцевого ефектора для задачі зворотної кінематики.

Розроблено параметричну модель двокоординатного паралельного робота та його тривимірну модель. Розроблені програми мовою Python для керування рухами робота через плати Raspberry Pi та Arduino.

Ключові слова: *моделювання, паралельний робот, тривимірне моделювання, Python, Arduino, Raspberry Pi.*

Студент

Яцушак Р.М.

Abstract

Bachelor's thesis on the subject: "Development of a two-coordinate parallel robot".

The bachelor thesis consists of an explanatory note on 60 sheets of A4 format with appendices, contains 29 figures and 7 tables. The graphic part of the project contains 5 drawings in A1 format.

The analysis of parallel robot designs was performed. The shape and dimensions of the robot's working area were studied. The analysis of problems of direct and inverse robot kinematics was carried out. Mathematical dependences of the coordinates of the end effector on the angles of rotation of the input links for the problem of direct kinematics and the dependence of the angles of rotation of the input links of the robot on the coordinates of the end effector for the problem of inverse kinematics were obtained.

A parametric model of a two-coordinate parallel robot and its three-dimensional model have been developed. Developed programs in the Python language to control the movements of the robot through Raspberry Pi and Arduino boards.

Keywords: *simulation, parallel robot, three-dimensional modeling, Python, Arduino, Raspberry Pi.*

Student

Yatsuschak R.M.

ЗМІСТ

	ВСТУП	5
1	ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД ПАРАЛЕЛЬНИХ РОБОТІВ ТА ПРИНЦИПІВ ЇХ РОБОТИ	7
1.1	Області застосування паралельних роботів	10
1.2	Відмінності від роботів SCARA	11
1.3	Найвідоміші виробники паралельних роботів	11
2	КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	23
2.1	Дослідження робочої зони паралельного 2D робота	23
2.2	Розрахунки параметрів двокоординатного паралельного робота	31
2.3	Побудова параметричної моделі робота	34
3	ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	37
3.1	Аналіз прямої кінематики робота	37
3.2	Аналіз зворотної кінематики робота	41
3.3	Програмування робота	45
3.3.1	Програма для плати Raspberry Pi	45
3.3.2	Програма для плати Arduino	49
	ВИСНОВКИ	55
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	56
	ДОДАТКИ	58

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Пояснювальна записка	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	Яцушак						4	
<i>Перевір.</i>	Врюкало							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Врюкало							
<i>Затверд.</i>	Панчук В.Г.							ІФНТУНГ ПМІ-20-1

ВСТУП

Автоматизація та роботизація стали невід’ємними ознаками сучасного світу. Роботи у сучасному виробництві виконують різноманітні завдання, що дозволяє значно підвищити ефективність, якість продукції та безпеку праці завдяки їх здатності виконувати складні операції з високою точністю і надійністю.

Роботи відіграють ключову роль у сучасному світі, впливаючи на різні аспекти економіки, суспільства та технологій, серед яких найхарактернішими є

- Автоматизація виробничих процесів: Роботи можуть виконувати складні операції збирання, які вимагають високої точності та повторюваності, що зменшує ризик помилок і підвищує якість кінцевого продукту. Роботизовані системи зварювання забезпечують високу якість зварних швів, автоматичне налаштування параметрів і підвищену продуктивність. Роботи забезпечують рівномірне і якісне нанесення фарб та інших покриттів, зменшуючи витрати матеріалів і забруднення навколишнього середовища.

- Інспекція та контроль якості: Роботи, оснащені камерами і сенсорами, можуть виконувати візуальний контроль якості продукції, виявляючи дефекти на ранніх стадіях виробництва. Роботизовані системи можуть проводити різноманітні випробування продукції, забезпечуючи високу точність і повторюваність результатів.

- Обробка матеріалів: Роботизовані верстати з ЧПК використовуються для високоточної обробки матеріалів, що дозволяє виробляти деталі складної геометрії. Роботи можуть виконувати шліфування та полірування з високою якістю поверхні, що особливо важливо для виробів, які потребують ідеального зовнішнього вигляду.

- Транспорт та логістика: Роботи можуть виконувати завдання по складуванню та переміщенню матеріалів у виробничих приміщеннях, зменшуючи необхідність ручної праці і підвищуючи ефективність логістики.

- Пакування: Роботи можуть автоматизувати процеси пакування продукції, забезпечуючи швидкість і точність.

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У майбутньому розвиток робототехніки, штучного інтелекту і технологій Індустрії 4.0 буде продовжувати змінювати виробничі процеси, підвищуючи ефективність, якість та гнучкість виробництва.

Зважаючи на це, важливим є вивчення принципів робототехніки, розробка та впровадження роботів у нові сфери, включаючи виробництво, науку, суспільне життя, побут та т.і.

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

1 ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД ПАРАЛЕЛЬНИХ РОБОТІВ ТА ПРИНЦИПІВ ЇХ РОБОТИ

Паралельні роботи – це роботи, які використовують паралельно з'єднані кінематичні ланцюги (руки) для виконання високошвидкісних точних рухів до однієї точки. Руки складаються з частин - зв'язків та з'єднань. Найпоширенішим типом паралельних роботів є виробы, що складаються з трьох плечей – дельта-роботи. Паралельних роботів легко обслуговувати завдяки їхній простій конфігурації. Механізм включає кілька вихідних сигналів двигуна в одній точці на кінці руки, що забезпечує високу потужність і високу точність руху.

Дельта-робот - це маніпулятор, який був винайдений на початку 1980-х років Реймондом Клавелем (Reymond Clavel) у Федеральній політехнічній школі Лозанни (EPFL, Швейцарія). Основним задумом було оперувати легкими об'єктами, але з великою швидкістю, що відповідало запитам промисловості.

У 1987 році компанія Demarex купила ліцензію на роботу і почала випускати дельта-роботів для пакувальної промисловості. У 1991 році Реймонд Клавель представив свою докторську роботу "Conception d'un robot parallèle rapide a 4 degres de liberté" і в 1999 році отримав за свій внесок у розвиток дельта-робота золоту нагороду.

Дельта-робот є паралельним роботом, що означає наявність більше одного кінематичного ланцюга від основи до виконавчого пристрою робота. Дельта-робота можна розглядати як просторове узагальнення пантографа. Звичайні не паралельні механізми є послідовністю ланок (портальний маніпулятор, шарнірний робот) (рисунок 1.1). На відміну від них, робоча ланка дельта-робота пов'язана з нерухомою основою трьома незалежними кінематичними ланцюгами, а сам механізм робота сприймає навантаження як просторова ферма. Вихідна ланка-ефектор дельта-робота має три поступальні ступені свободи.

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

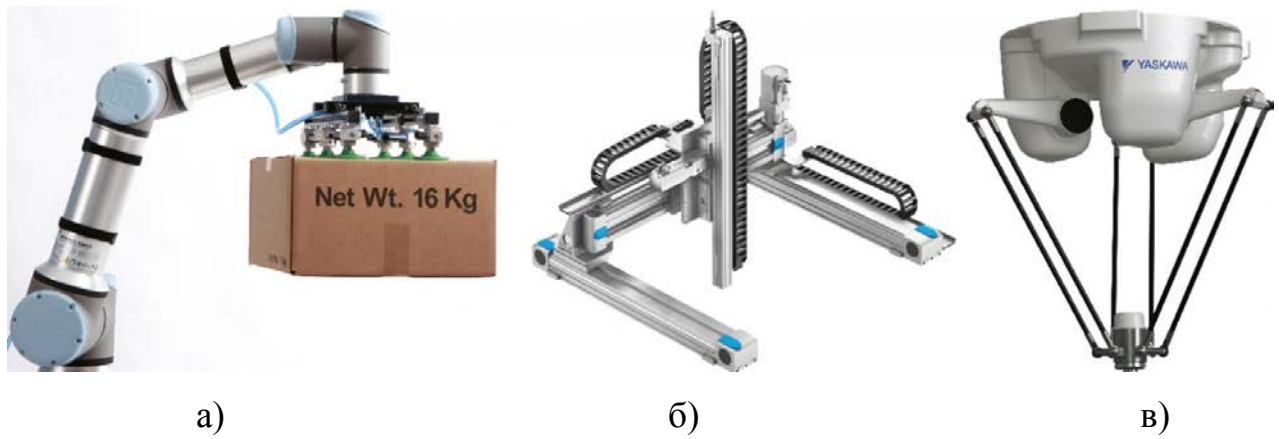


Рисунок 1.1 – а) Шарнірний робот; б) Портальний маніпулятор; в) Дельта-робот

Основною перевагою механізму дельта-робота виступає висока швидкість маніпулювання легкими об'єктами, що досягається за рахунок того, що важкі приводи розташовані на нерухомій основі, а всі рухомі ланки механізму виконані з легких, найчастіше, композитних матеріалів. У зв'язку з тим, що привід знаходиться в основі робота, а важелі зроблені з легких композитних матеріалів, рухомі частини дельта-робота мають дуже малу інерцію. Це дозволяє досягти значних прискорень до 30 g і швидкостей до 10 м/с.

Типова конструкція дельта-робота подана на рисунку 1.2.

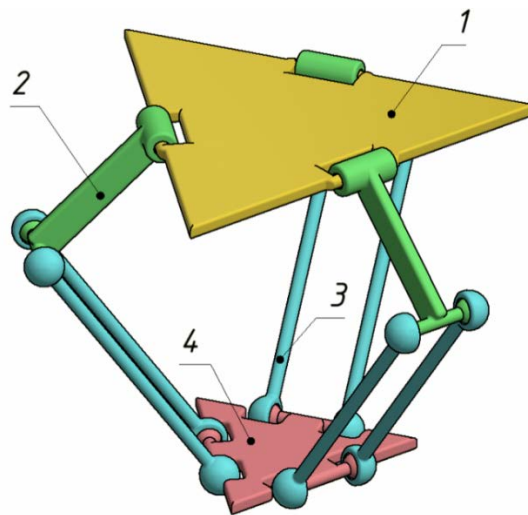


Рисунок 1.2 - Типова конструкція дельта-робота:

1 – основа; 2 – важіль; 3 – штанга; 4 – платформа

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Робот складається з масивної основи 1, до якої кріпляться три приводи, що змінюють положення важелів 2, площини обертання яких повернуті на 120° один щодо одного. Кожен важіль закінчується двома рухомими шарнірами. На рухомій платформі 4 також знаходяться по два рухливі шарніри на кожне з плеч дельта-робота. Плечем для цього механізму називатимемо сукупність важеля і двох з'єднаних з ним штанг 3.

Переміщення платформи в задану точку здійснюється шляхом повороту трьох важелів на потрібні кути.

Часто говорять про те, що у дельта-роботі використовується "принцип паралелограмів" (рисунок 1.3).

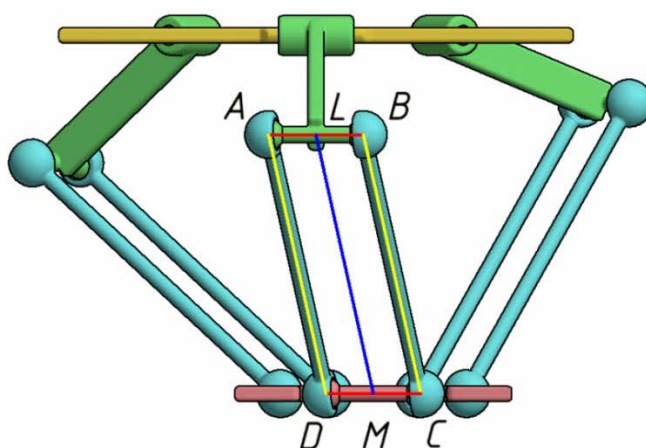


Рисунок 1.3 – Використання «принципу паралелограмів»

Дві штанги, платформа та важіль утворюють паралелограм ABCD. Як відомо, сторони AB і DC у цьому паралелограмі завжди будуть паралельні. Отже, відрізок DC рухомої платформи буде паралельний до площини основи. Через те, що аналогічні відрізки, які відносяться до двох інших плечей, також будуть паралельні до основи, легко зробити висновок, що площина платформи завжди буде паралельна до площини основи. Для спрощення теоретичного аналізу цього механізму дві штанги замінюють однією (LM), але далі враховується той факт, що орієнтація рухомої платформи завжди залишається такою самою, як і в основі.

Дельта-робот – популярна архітектура маніпулятора. Майже кожна велика компанія-виробник має представника цього виду у своєму модельному ряді.

1.1 Области застосування паралельних роботів

Паралельні роботи, дельта-роботи широко використовуються в різних галузях промисловості завдяки їх швидкісним, точним і універсальним рухам. Деякі з поширених застосувань дельта-роботів включають:

Пакування: в харчовій промисловості та виробництві напоїв для швидкого й точного пакування продуктів, таких як цукерки та кондитерські вироби.

Складання: для складання невеликих і делікатних деталей, таких як електронні компоненти та іграшки, з високою точністю та швидкістю.

Вибір і розміщення: часто використовуються в електронній промисловості, щоб з високою точністю та швидкістю підбирати та розміщувати компоненти, як-от друковані плати та мікросіпи.

Палетування: можна використовувати для ефективного й автоматизованого складання й упорядкування пакетів, наприклад коробок і контейнерів.

Маркування косметики та інших товарів: часто застосовуються для нанесення маркування на невеликі вироби, які рухаються конвеєром – такі як косметичні вироби чи вироби з пластику.

Транспортування матеріалів: можна використовувати для передачі матеріалів, таких як сировина та готова продукція, між станціями виробничої лінії.

Логістична галузь: використовуються для високошвидкісного й точного сортування та розповсюдження пакунків, таких як пошта та посилки.

Крім цих поширених застосувань дельта-роботів їх можна використовувати в інших галузях промисловості та задачах, де потрібні високошвидкісні, точні та універсальні роботизовані рухи.

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1.2 Відмінності від роботів SCARA

Роботи SCARA — це горизонтально шарнірні промислові роботи з трьома осями обертання для горизонтального руху та однією віссю для вертикального руху. Паралельні роботи та роботи SCARA подібним чином застосовуються для транспортування заготовок на конвеєрі. Різниця між ними полягає в горизонтальній роботі та високій швидкості.

Роботи SCARA, також відомі як горизонтальні шарнірні роботи, є роботами з послідовним зв'язком. Ці роботи здатні здійснювати горизонтальні рухи відносно землі та виконувати такі завдання, як горизонтальне закручування гвинтів і утримування заготовки.

З іншого боку, паралельні роботи добре справляються із завданнями, які виконуються вертикально до землі. Іншими словами, важко виконувати такі завдання, як закручування гвинтів, які можуть виконувати роботи SCARA. Однак паралельні роботи можуть працювати швидше, ніж роботи SCARA, і є більш ефективними, ніж роботи SCARA, коли йдеться про вертикальну роботу.

1.3 Найвідоміші виробники паралельних роботів



Kawasaki Robotics, Inc.

Kawasaki Robotics, Inc., (США) дочірня компанія Kawasaki Heavy Industries, заснованої в 1878 році з представництвами по всьому світу, є виробником промислових виробничих роботів і компонентів робототехніки. Продукція компанії включає промислові роботи з корисним навантаженням від 3 до 1500кг, контролери роботів, системи моделювання та бачення тощо. Продукція Kawasaki Robotics, Inc. використовується в різних галузях промисловості, включаючи ринки складання електроніки, обробки матеріалів, промислового фарбування,

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

напівпровідників і дугового зварювання. Компанія також надає нестандартні збірки роботів і багатороботові системи, щоб задовольнити виробничі вимоги своїх клієнтів.

Таблиця 1.1 – Дельта-роботи Kawasaki Robotics, Inc.



Надшвидкісний дельта-робот YF002N — це компактна модель із серії Y, яку можна встановити у вузьких місцях. Високошвидкісні роботи серії Y можуть використовуватися для обробки матеріалів і складання в різних галузях промисловості, включаючи харчову, фармацевтичну, косметичну, електроніку, машинобудування та сонячні батареї. Корисне навантаження – 2 кг
Максимальна досяжність – 300 мм



Надшвидкісний дельта-робот YF003N pick & place має максимальну вантажопідйомність 3 кг і пропонує ширший діапазон руху, ніж моделі серії Y. Високошвидкісні роботи-підбирачі та розміщувачі серії Y можуть використовуватися для обробки матеріалів і монтажу в різних галузях промисловості, включаючи харчову, фармацевтичну, косметичну, електронну, машинобудівну та сонячні батареї. Корисне навантаження – 3 кг
Максимальна досяжність – 650 мм

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Корпорація FANUC, заснована в 1972 році зі штаб-квартирою в префектурі Яманасі, Японія є виробником систем автоматизації виробництва, робототехніки та Інтернету речей. Компанія пропонує великий та різноманітний портфель продуктів, включаючи серводвигун, невелику ріжучу машину robodrill, електричну машину для лиття під тиском roboshot, електророзрядну машину для роботи з дротом і лазери. Ці передові продукти призначені для широкого кола галузей промисловості, починаючи від автомобільної, охорони здоров'я та аерокосмічної галузі до електроніки. Метою компанії є надання клієнтам ефективних і недорогих продуктів.

Таблиця 1.2 - Специфікація FANUC Robot DR

	Робот FANUC DR	/05-3A-6X	/05-3A	/05-4A-6X	/05-4A
	Керовані осі	6	4	6	4
	Макс. корисне навантаження на зап'ясті	0,5 кг (опція: 1 кг)			
	Діапазон руху (X, Y)	ф280 мм, 100 мм		ф420 мм, 150 мм	
	Повторюваність	±0,02 мм			
	Маса (без підставки)	17 кг	14 кг	20 кг	17 кг
	монтаж	Підлога, На стелі, Під кутом			
	Відповідний контролер	R-50iA Mate			

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

	застосування	Транспортування, складання	поводження	Транспортування, складання	поводження
 	Робот FANUC DR	/3-8A	/3-11A	/6-14A	/12-14A-3X
	Керовані осі	4			3
	Макс. корисне навантаження на зап'ясті	3 кг		6 кг (опція: 8 кг)	12 кг
	Діапазон руху (X, Y)	φ800 мм, 300 мм	φ1130 мм, 400 мм	φ1350 мм, 500 мм	
	Повторюваність	±0,03 мм			
	Маса (без підставки)	130 кг	160 кг	155 кг	
	монтаж	На стелі			
	Відповідний контролер	R-50 <i>i</i> A (A-Cabinet), R-50 <i>i</i> A Mate			
	застосування	поводження			

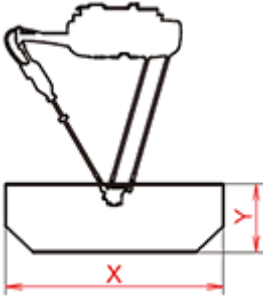
	Робот FANUC DR	/6-12B нержавіюча сталь	/8-16Б
	Керовані осі	4	
	Макс. корисне навантаження на зап'ясті	6 кг	8 кг
	Діапазон руху (X, Y)	φ1200 мм, 450 мм	φ1600 мм, 500 мм
Повторюваність	±0,03 мм		

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

14


	маса	250 кг	170 кг
	монтаж	Догори ногами	
	Відповідний контролер	R-50 <i>i</i> A (A-Cabinet), R-50 <i>i</i> A Mate	
	застосування	поводження	



Omron

Корпорація Omron, заснована в 1933 році, зі штаб-квартирою в Кіото, Японія, є виробником компонентів, обладнання та систем автоматизації. Вона розробила перший безконтактний перемикач у 1960 році. Вона має чотири сфери, включаючи промислову автоматизацію, електронні компоненти, охорону здоров'я та соціальні системи, і надає продукти та послуги приблизно в 120 країнах і регіонах. Деякі з її продуктів включають мікродатчики, системи контролю доступу, промислові роботи, камери спостереження та монітори артеріального тиску. У 1971 році вона розробила перший онлайн-банкомат, а в 1972 році заснувала першу в Японії фабрику соціального забезпечення.

Таблиця 1.3 – Паралельні роботи Omron

	Версія Parallel Robots EtherCAT (NJ501-R).iX3
	Паралельний робот ідеально підходить для використання в харчовій промисловості та виробництві напоїв, фармацевтичній та медичній промисловості
	• Максимальний робочий діаметр 1130 мм

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15




	<ul style="list-style-type: none"> • Робоча висота 425 мм • Максимальне корисне навантаження 8 кг • Вага 52 кг
	<p>Версія Parallel Robots EtherCAT (NJ501-R).iX4</p> <p>Чотирихосьовий паралельний робот забезпечує високу швидкість і високу точність</p> <ul style="list-style-type: none"> • Максимальний робочий діаметр 1600 мм • Робоча висота 500 мм • Максимальне корисне навантаження 10 кг • Вага 117 кг
	<p>Паралельні роботи Hornet</p> <p>Паралельний робот ідеально підходить для використання в харчовій промисловості та виробництві напоїв, фармацевтичній та медичній промисловості</p> <ul style="list-style-type: none"> • Максимальний робочий діаметр 1130 мм • Робоча висота 425 мм • Максимальне корисне навантаження 8 кг • Вага 52 кг
	<p>Паралельні роботи Quattro</p> <p>Чотирихосьовий паралельний робот забезпечує високу швидкість і високу точність</p> <ul style="list-style-type: none"> • Максимальний робочий діаметр 1600 мм • Робоча висота 500 мм • Максимальне корисне навантаження 10 кг • Вага 117 кг



ABB E-mobility пропонує рішення для зарядки електромобілів для клієнтів по всьому світу. ABB E-mobility пропонує швидкі зарядні пристрої постійного струму, а також зарядні пристрої змінного струму з акцентом на надійність і час безвідмовної роботи. З 2010 року ABB E-mobility продала понад 50 000 швидких зарядних пристроїв постійного струму та понад 1 мільйон зарядних пристроїв змінного струму. ABB E-mobility пропонує однозарядні та багатозарядні блоки для дому, зарядні блоки для роздрібної торгівлі, на робочому місці та в готельних закладах, продаж електромобілів, а також громадський транспорт. Крім того, доступні численні цифрові рішення та програмні послуги.

IRB 360 FlexPicker®



Рисунок 1.4 – Робот IRB 360 FlexPicker®

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Понад 20 років FlexPicker від ABB є лідером у сфері найсучасніших високошвидкісних роботизованих технологій збирання та пакування. IRB 360 — це найшвидший промисловий дельта-робот у світі, який забезпечує високу надійність і точність.

IRB 360 FlexPicker від ABB здатний виконувати найшвидші роботи з комплектування та оптимізований для пакування. Робот має надзвичайну продуктивність руху з найкоротшим часом циклу, високою точністю для корисного навантаження від 1 до 8 кг.

Сімейство IRB 360 включає варіанти з вантажопідйомністю 1 кг, 3 кг, 6 кг і 8 кг і радіусом дії 1130 мм і 1600 мм, тобто IRB 360 знайдеться майже для всіх потреб.

KUKA

КУКА АГ

KUKA AG була заснована в 1898 році в Аугсбурзі, Німеччина. Компанія є дочірньою компанією GD Midea Holding Co., Ltd. і займається розробкою систем автоматизації, розробляє та виробляє автоматизовані рішення на основі роботів для медичної, автомобільної, складської та розподільчої промисловості. Продуктові сегменти компанії включають роботизовані системи, виробничі машини та системи, мобільність як рушій Індустрії 4.0 і технологічні процеси, які забезпечують спеціальні процеси зварювання на підприємствах. Послуги компанії включають ремонт та обслуговування роботів і машин, а також інженерні послуги з проектування та програмування робототехнічних систем.

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18



Рисунок 1.5 – Робот KR DELTA

Робот KR DELTA з корисним навантаженням до 6 кг підходить для різних сфер застосування, включаючи такі галузі, як фармацевтика, електроніка та інші.

Промисловий робот надійно працює в циліндричній робочій зоні висотою 250мм і діаметром 1200мм.

Висока швидкість - надзвичайно короткий час циклу, до 0,5 секунди.

Гігієнічний: виготовлений повністю з нержавіючої сталі

- Легко чистити та дезінфікувати роботизовані компоненти
- Високий клас захисту IP 67 для всього робота Delta та IP 69K для Axe 4
- Стійкість до температур і корозії

SIASUN

SIASUN Robot & Automation CO.,Ltd

Компанія Shenyang SIASUN Robot Automation Co., Ltd., заснована в 2000 році, є розробником, виробником і постачальником рішень для робототехніки та інтелектуального виробництва зі штаб-квартирою в місті Шеньян, Китай. Компанія розробляє промислові, спеціальні, чисті, медичні послуги та роботів для переміщення, а також інтелектуальних &

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата




БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

19

інтелектуальне транспортне обладнання. Він також пропонує такі системні послуги, як автоматизація логістики, автоматизація складання та автоматизація зварювання. Його технології використовуються в будівельній техніці, автомобілебудуванні, охороні здоров'я, інтелектуальному транспорті та нафтохімії.

Таблиця 1.4 – Паралельні роботи SIASUN

 <p>SRBD1100 parallel robot</p>	<p>1. Області застосування – пакування, сортування, перенесення, збирання</p> <p>2. Характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> - висока точність руху, повторне позиціонування становить $\pm 0,05$ мм - швидкий рух, до 120 рухів/хв - найбільший діапазон підхоплення становить 1100 мм у діаметрі - максимальне навантаження 8 кг
 <p>SRBD1100 parallel robot (stainless steel)</p>	<p>1. Області застосування – пакування, сортування, перенесення, збирання</p> <p>2. Характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> - висока точність руху, повторне позиціонування становить $\pm 0,05$ мм - швидкий рух, до 120 рухів/хв - найбільший діапазон підхоплення становить 1100 мм у діаметрі - максимальне навантаження 8 кг
 <p>SRBD1600 Parallel Robot</p>	<p>1. Області застосування – пакування, сортування, перенесення, збирання</p> <p>2. Характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> висока точність руху, повторне позиціонування становить $\pm 0,05$ мм - швидкий рух, до 90 рухів /хв - найбільший діапазон підхоплення становить 1600 мм у діаметрі - максимальне навантаження 15 кг

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

20

Асrome є виробником роботизованих систем, що базується в Стамбулі, Туреччина, з 2013 року. Компанія в основному надає роботизовані рішення для допомоги дослідникам, інженерам і академікам. Продукція компанії включає розумні драйвери двигунів, мобільні автономні роботи, лінійні перевернуті маятники, асrobot, лінійні перевернуті маятники тощо. Його продукти призначені для навчання, досліджень і практичного досвіду, використовуються більш ніж 50 установами в 15 країнах для дослідницьких і освітніх цілей. Інструменти та ресурси надаються вченим і студентам для досягнення цілей в інженерних лабораторіях, що дозволє отримати практичний досвід навчання.



Рисунок 1.6 – Дельта-робот Акром

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Рейтинг виробників паралельних роботів

Про популярність виробників паралельних роботів можна судити за рейтингом, розрахованим на основі частки кліків на сторінці виробника паралельного робота (станом на грудень 2023 року).

(<https://us.metoree.com/categories/parallel-robot/>)

Таблиця 1.5 - Рейтинг виробників паралельних роботів серед користувачів у США

Ранг	Компанія	Кількість кліків
1	Kawasaki Robotics, Inc.	18,8%
2	FANUC	18,8%
3	Акром	16,7%
4	Електронна мобільність ABB	14,6%
5	КУКА АГ	12,5%
6	SIASUN Robot & Automation CO.,Ltd	10,4%
7	Omron	8,3%

Таблиця 1.6 - Рейтинг виробників паралельних роботів серед користувачів у світі

Ранг	Компанія	Кількість кліків
1	Акром	18,5%
2	Kawasaki Robotics, Inc.	18,5%
3	FANUC	18,5%
4	Електронна мобільність ABB	13,0%
5	КУКА АГ	13,0%
6	SIASUN Robot & Automation CO.,Ltd	11,1%
7	Omron	7,4%

2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Дослідження робочої зони паралельного 2D робота

Двокоординатний паралельний робот за своєю найбільш загальною конструктивною схемою є п'ятиланковим механізмом (рисунок 2.1). Він складається з двох ведучих ланок, з'єднаних з відповідними кроковими двигунами, двох ведених ланок, які шарнірно з'єднані з ведучими ланками та ланкою, на якій розміщується кінцевий ефектор робота. Кінцевий ефектор залежно від призначення робота та виконуваних ним функцій може бути різного типу – затиск, магнітний тримач, пневматична присоска, стилус для малювання і т.і.

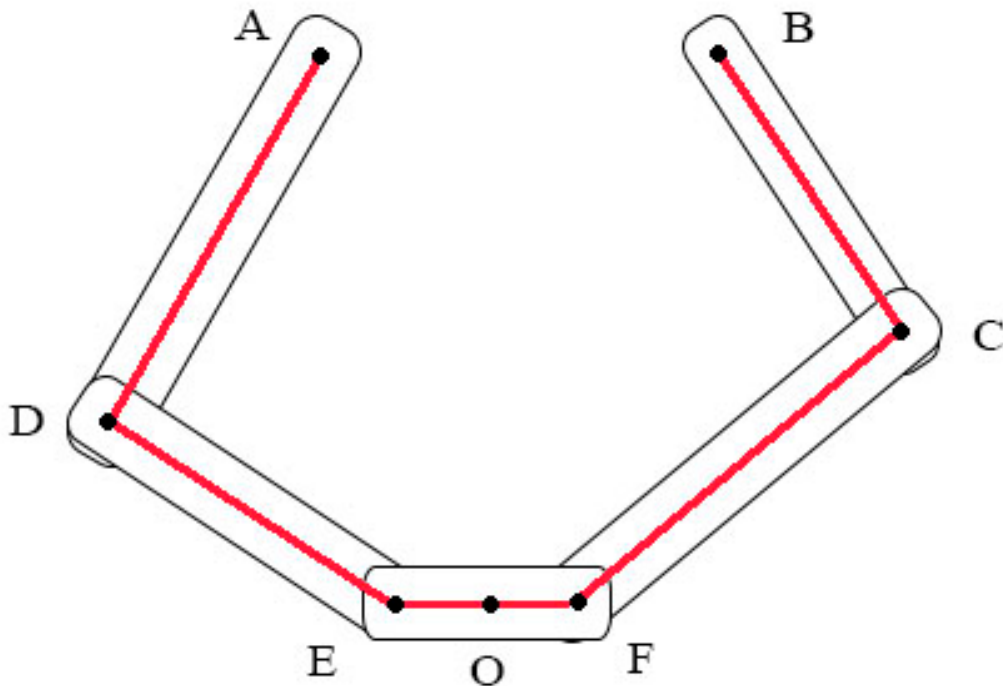


Рисунок 2.1 – Кінематична схема двокоординатного паралельного робота

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Часто в конструкції двокоординатного паралельного робота ланка з кінцевим ефектором задається не з 2 розміщеними на відстані шарнірами, а з шарнірами, осі яких співпадають. В такому виконанні робот з точки зору кінематики є чотириланковим механізмом (рисунок 2.2).

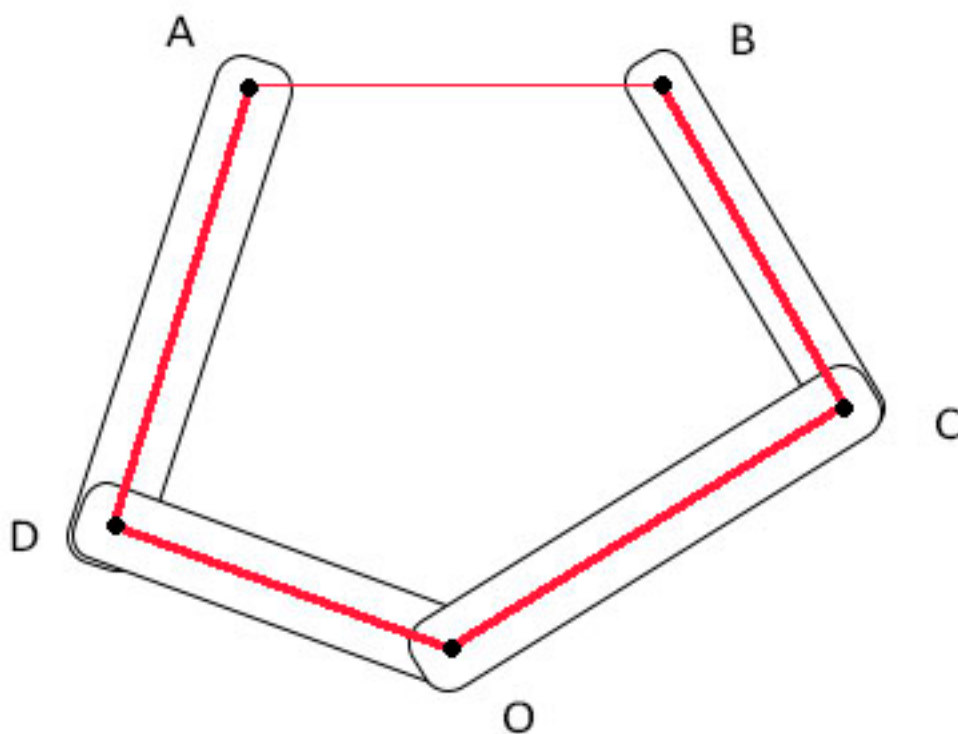


Рисунок 2.2 – Кінематична схема двокоординатного паралельного робота з одним кінцевим шарніром

Довжини цих чотирьох ланок механізму є геометричними параметрами, які впливають на положення кінцевого ефектора робота. Їх числові значення повинні знаходитися в певних межах, які дозволяють рух ланок механізму. При конкретних значеннях довжин ланок в площині їх руху утворюється область можливих (допустимих) положень точки розміщення кінцевого ефектора. Фактично ця область визначає робочу зону робота.

Були проведені дослідження залежності форми робочої зони двокоординатного паралельного робота від співвідношення довжин ланок

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

механізму робота. В позначенні варіантів конструкцій роботів, які розглядалися в дослідження застосовано наступне позначення: відносні довжини ведучих ланок – відносні довжини ведених ланок – відносна відстань між осями обертання ведучих ланок. Відносні довжини вираховуються діленням на довжину ведучої ланки, що обертається лівим приводом. Результати проведених досліджень подані на рисунках 2.3-2.12.

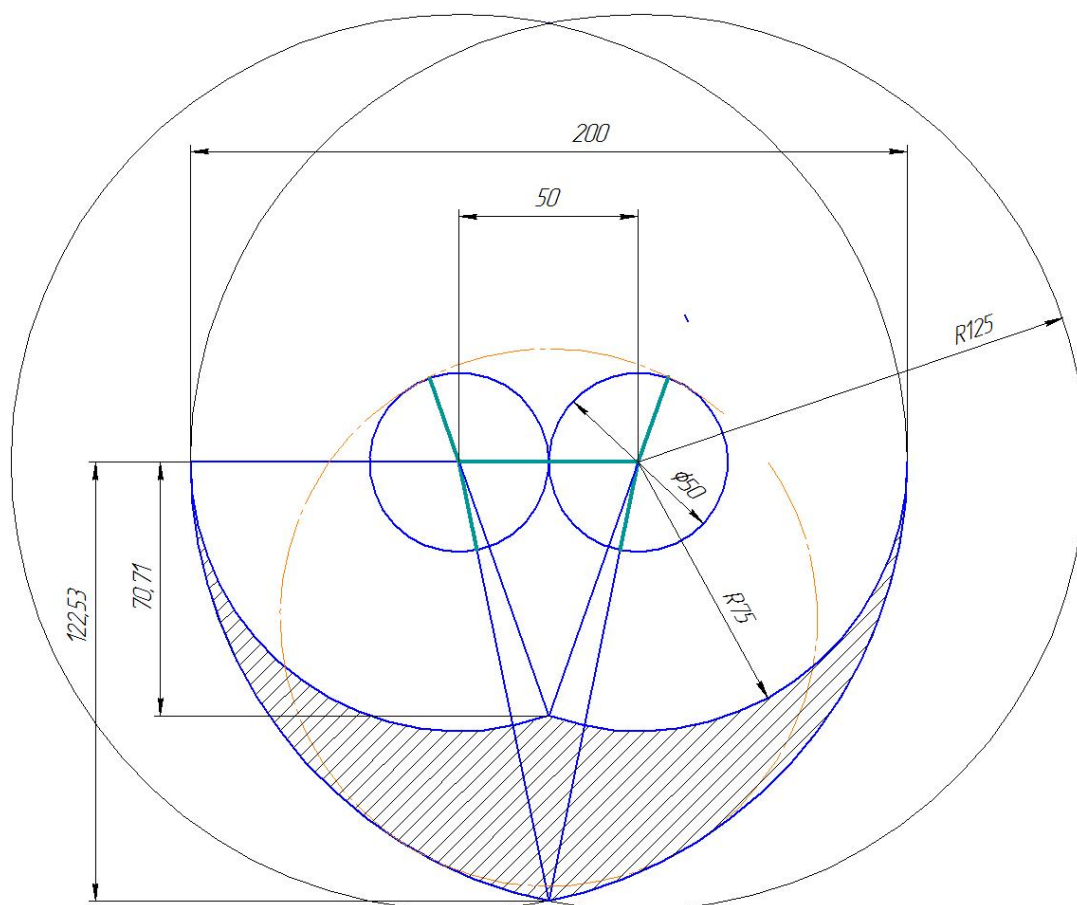


Рисунок 2.3 – Робоча зона робота 1-1-4-4-2

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

25

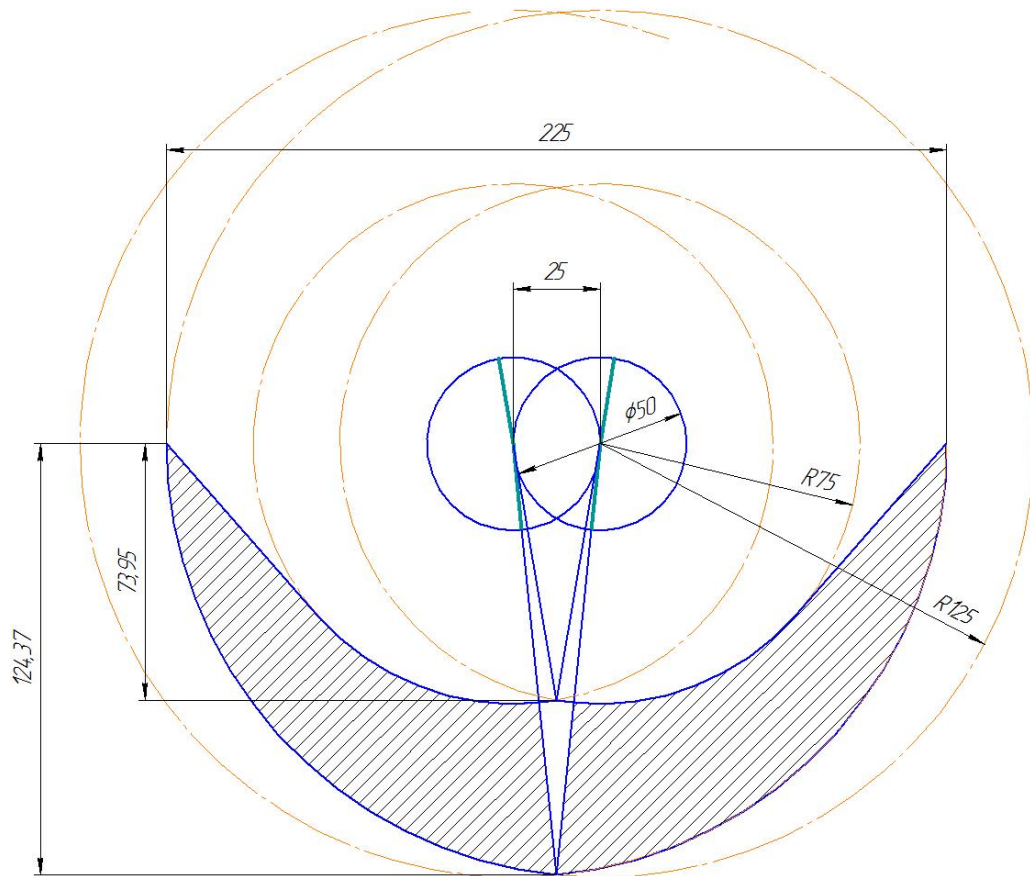


Рисунок 2.4 - Робоча зона робота 1-1-4-4-1

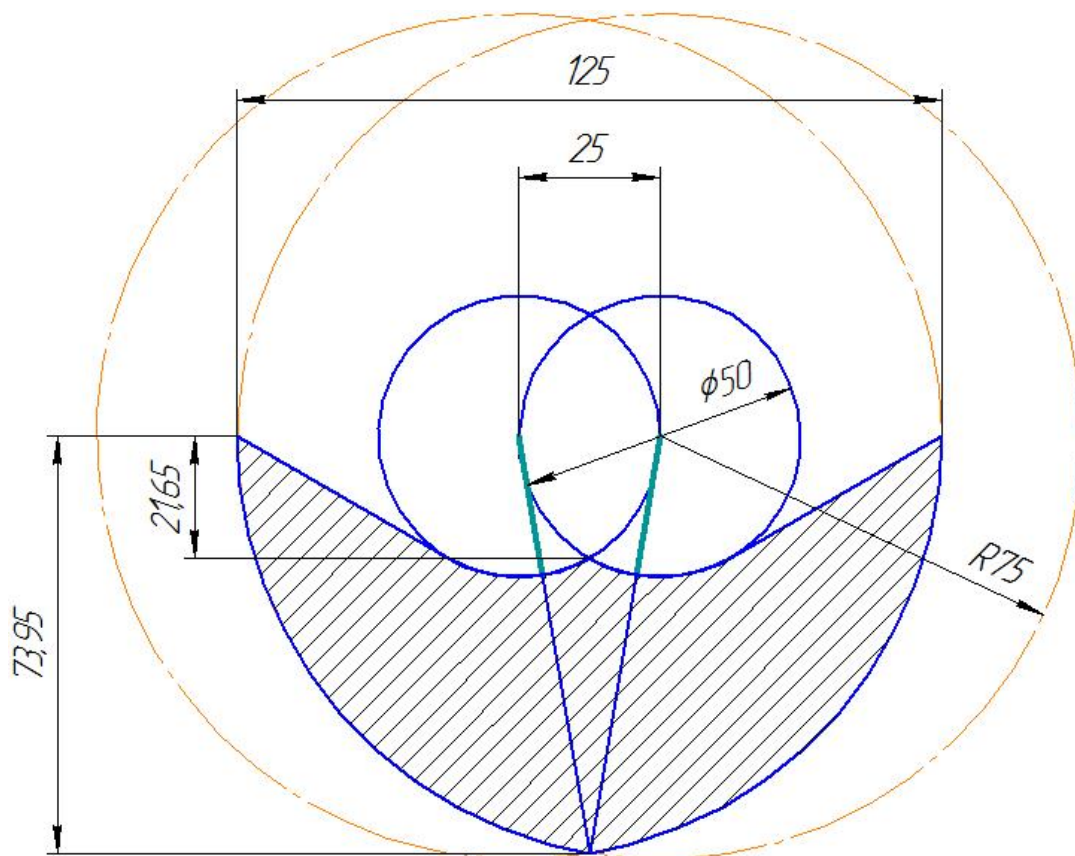


Рисунок 2.5 - Робоча зона робота 1-1-2-2-1

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

26

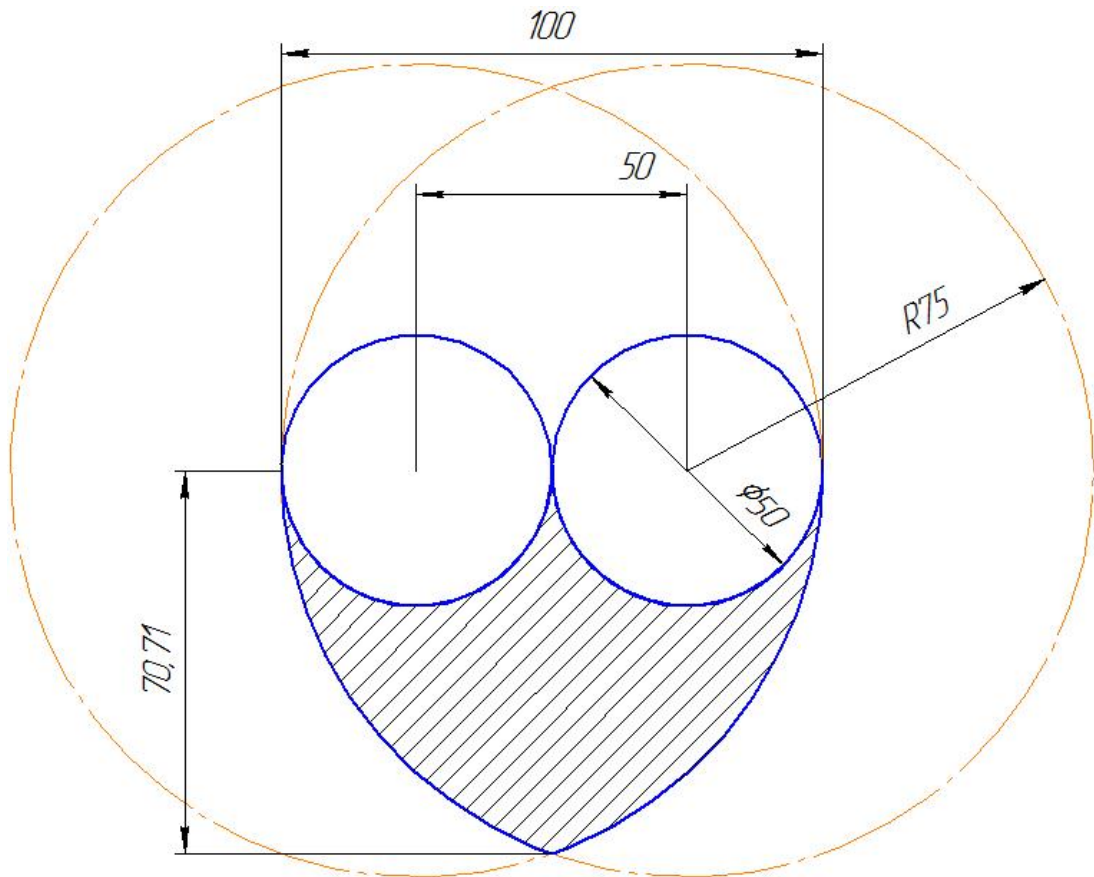


Рисунок 2.6 - Робоча зона робота 1-1-2-2-2

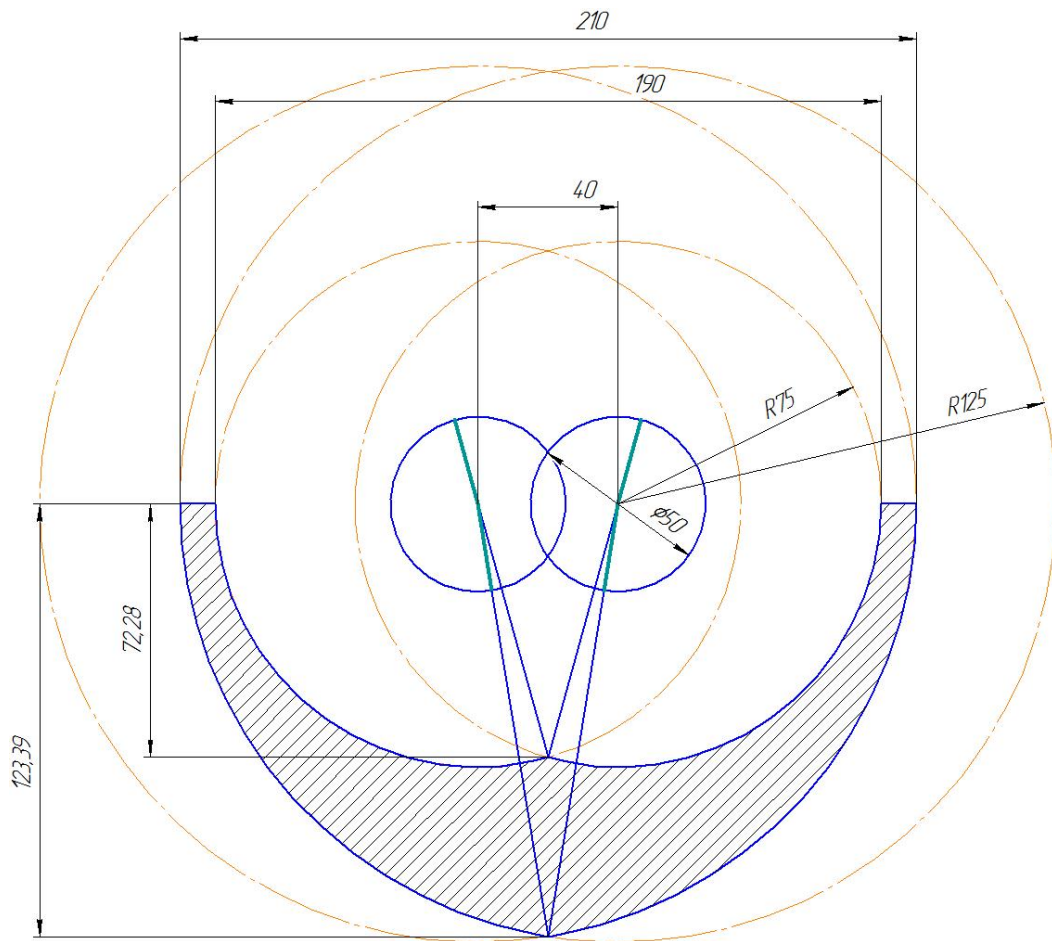


Рисунок 2.8 - Робоча зона робота 1-1-4-4-1,6

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

27

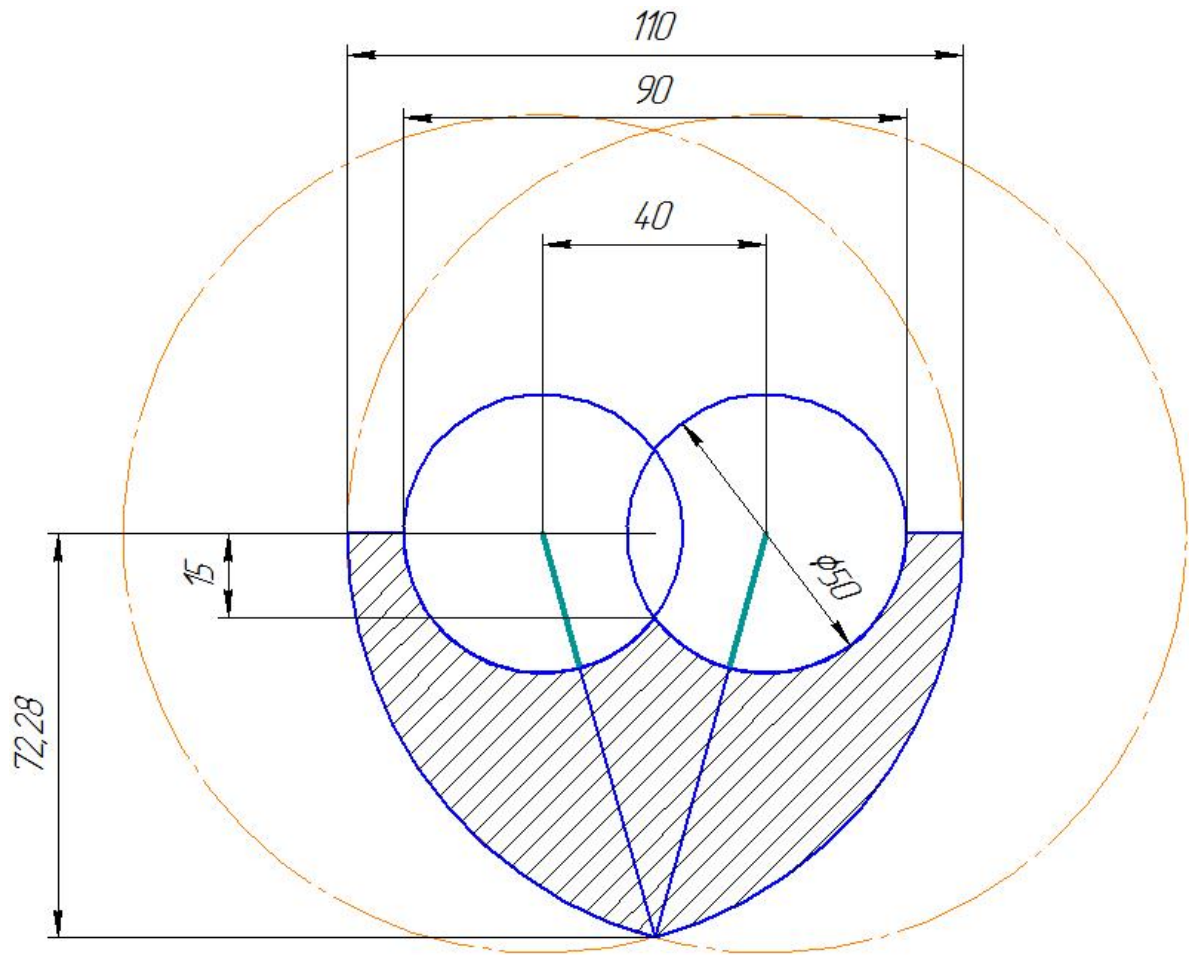


Рисунок 2.9 - Робоча зона робота 1-1-2-2-1,6

На рисунках 2.3 – 2.9 зображені робочі зони робіт, які мають симетричну конфігурацію, тобто довжини ланок, з'єднаних з лівим двигуном, співпадають з довжинами відповідних ланок, з'єднаних з правим двигуном.

Але можливі варіанти виконання паралельних двокоординатних робіт несиметричної конструкції. Робочі зони кількох варіантів таких конструкцій робіт показані на рисунках 2.10-2.12.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

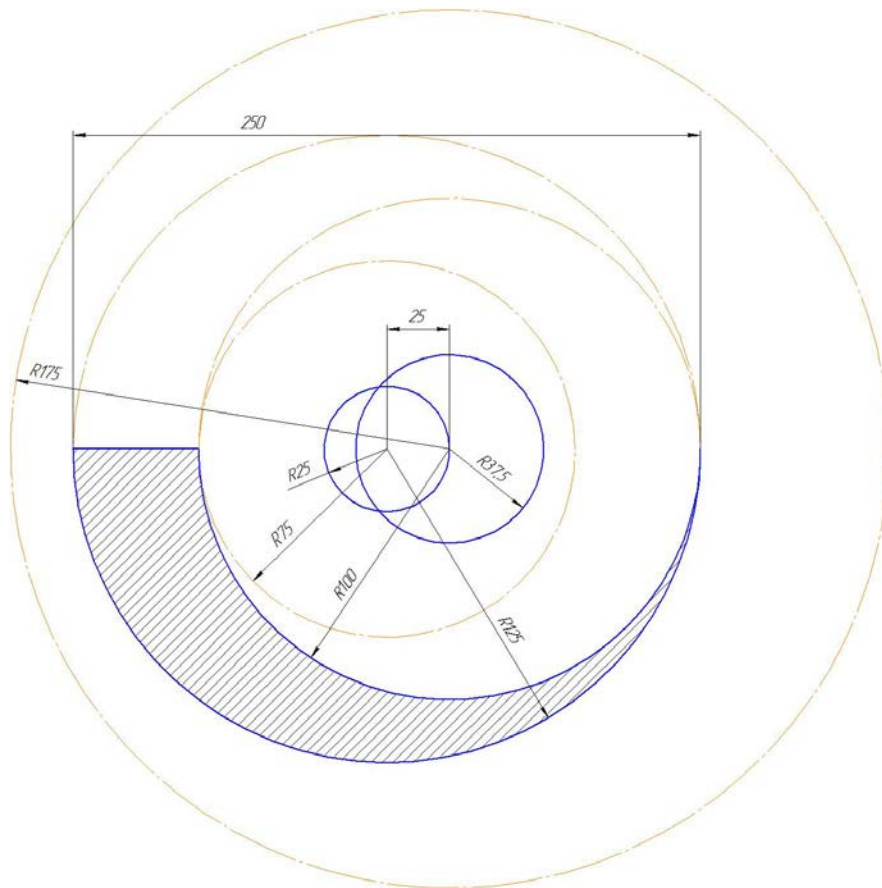


Рисунок 2.10 - Робоча зона робота 1-1,5-4-5,5-1

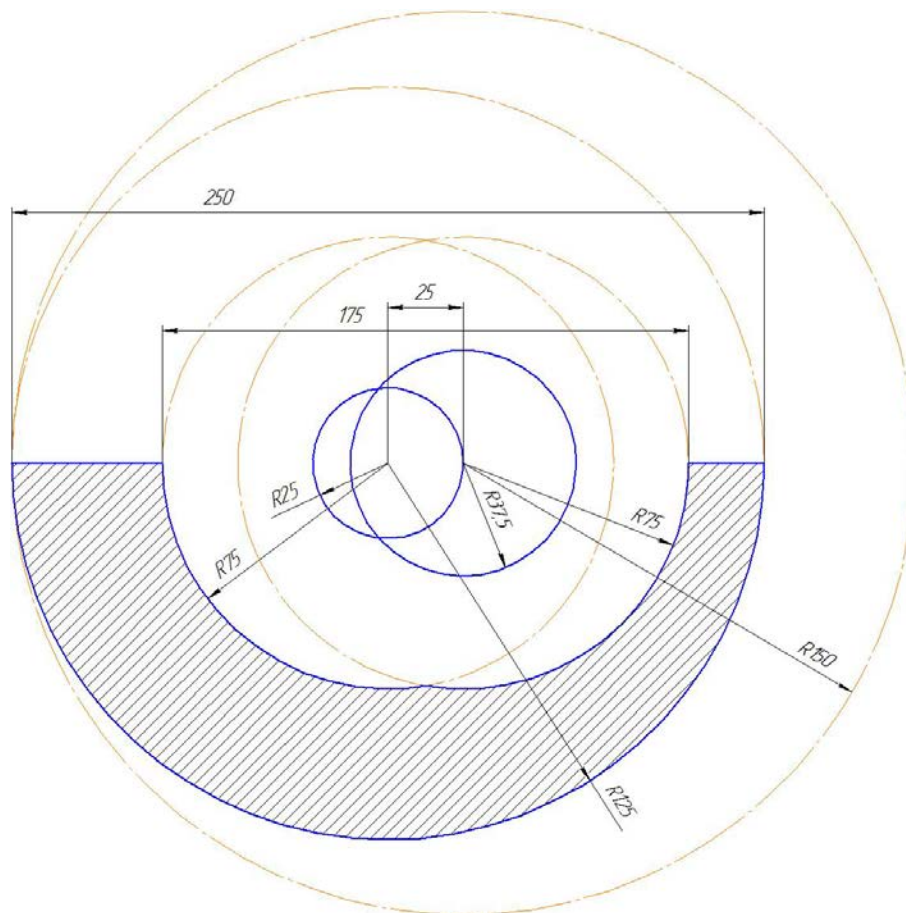


Рисунок 2.11 - Робоча зона робота 1-1,5-4-4,5-1

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

29

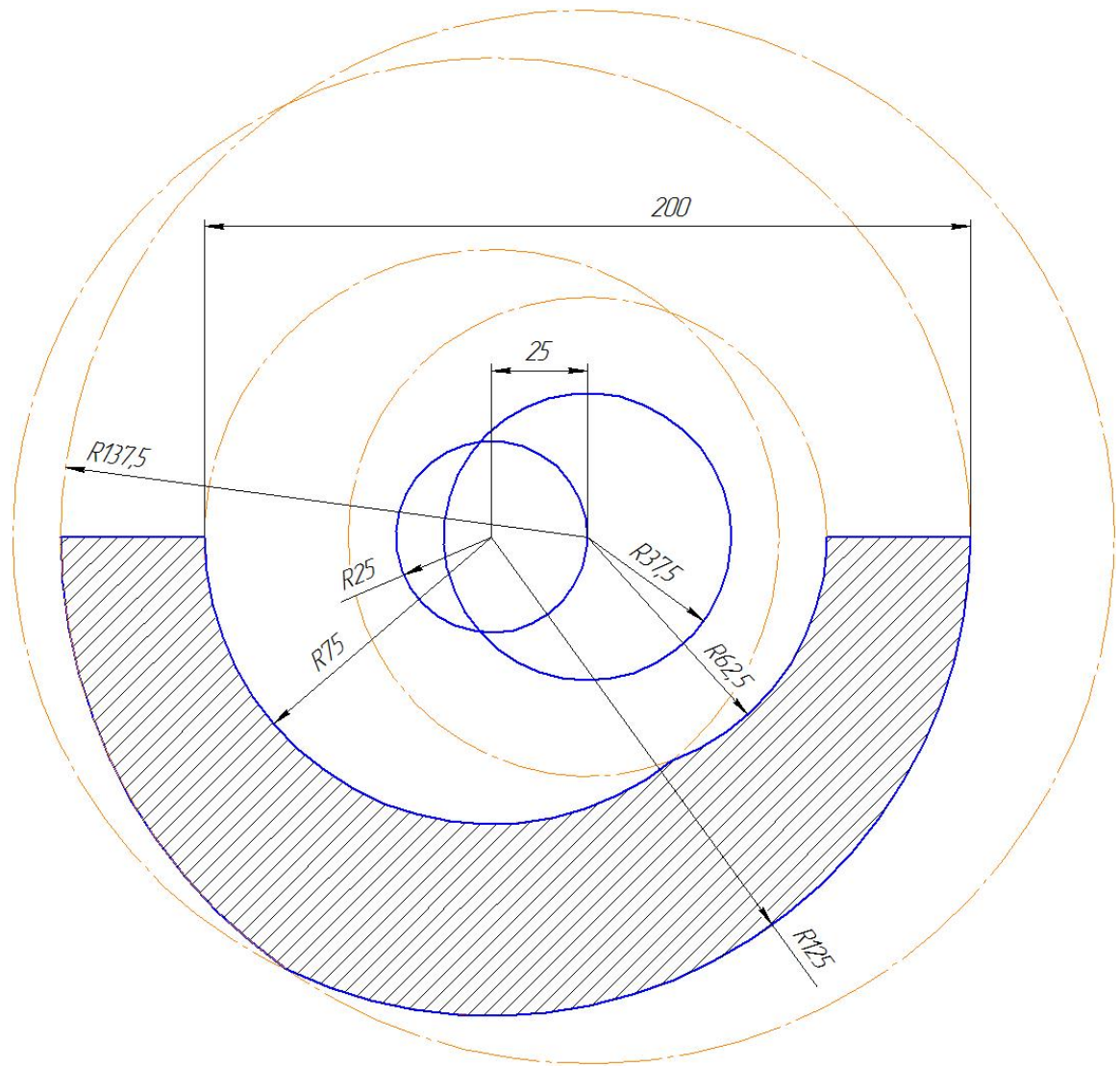


Рисунок 2.12 - Робоча зона робота 1-1,5-4-4-1

Як показали дослідження виду робочої зони паралельних двокоординатних робіт, розміри їх ланок і відстань між приводами впливають на форму і габарити робочої зони. Це дозволяє проводити проектування таких робіт для виконання не тільки загальних задач, але і задач, які вимагають використання специфічної форми робочої зони робота.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

30

2.2 Розрахунки параметрів двокоординатного паралельного робота

Використовуємо схему розміщення приводів і співвідношення розмірів ланок, зображену на рисунку 2.13, тобто конструкції типу 1-1-5/3-5/3-4/3 за прийнятою нами класифікацією. Довжина другої (веденої) ланки в 1,66 (або 5/3) рази більша довжини першої (ведучої) ланки, яка з'єднана з валом привода. Таке співвідношення розмірів забезпечує достатньо велику робочу зону робота.

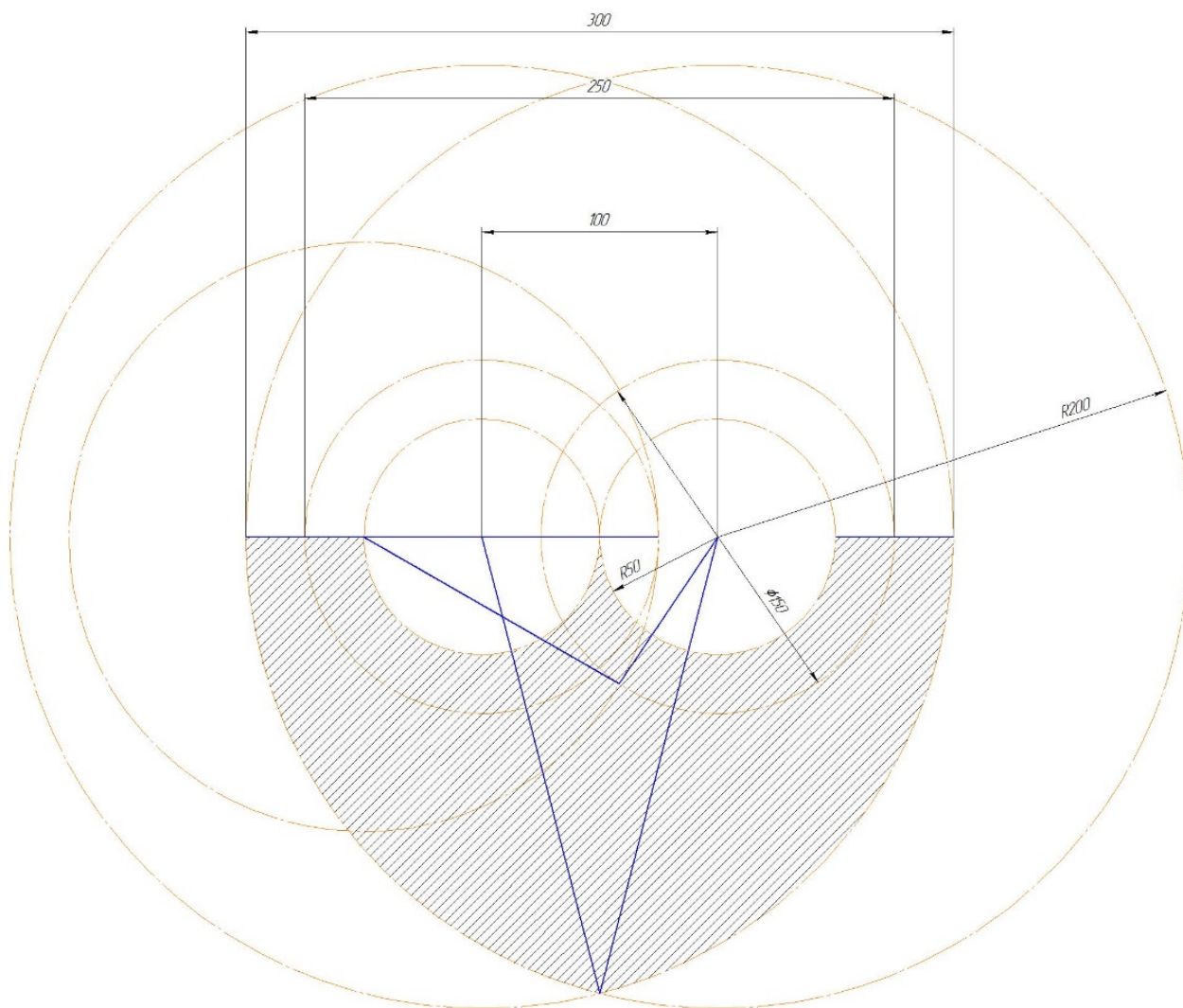


Рисунок 2.13 – Робоча зона робота 1-1-5/3-5/3-4/3

Найбільше зусилля буде прикладатися до ведучої ланки приводу у положенні, коли вона знаходиться в горизонтальному положенні (рисунок 2.14)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

31

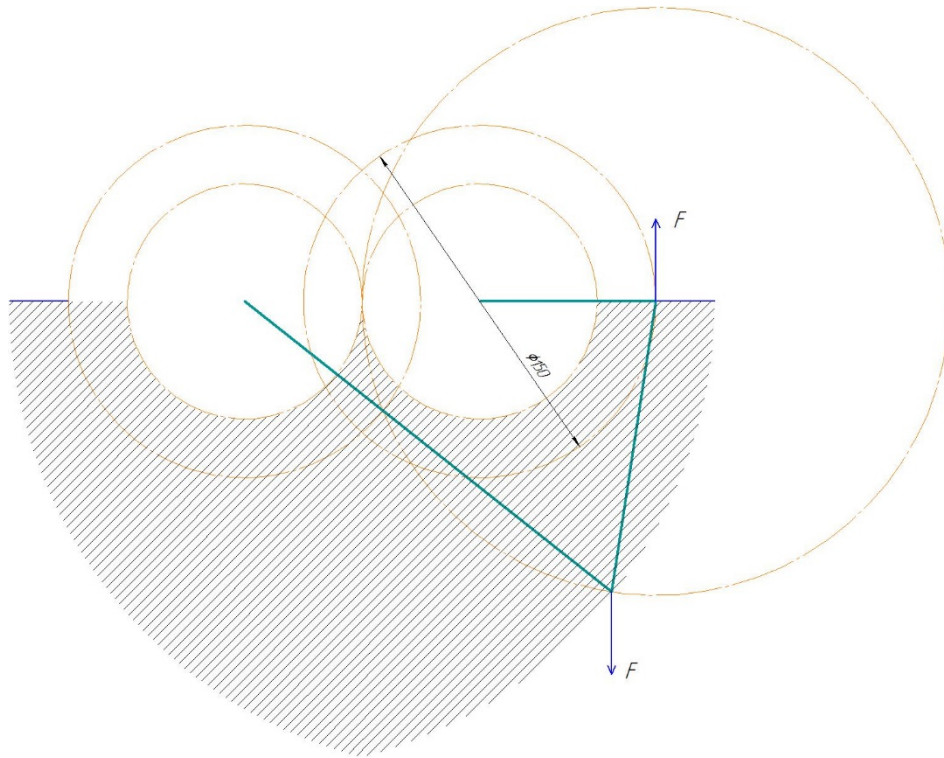


Рисунок 2.14 – Схема до силового розрахунку робота

За схемою рисунка 2.14 можна визначити величину крутного моменту M привода при заданій мінімальній вантажопідйомності F або мінімальну вантажопідйомність F при відомому крутному моменті привода M .

$$M = F \cdot l, \text{ або } F = \frac{M}{l} \quad (2.1)$$

де l – довжина ведучої ланки приводу.

Мінімальна відстань між осями приводів буде визначатися габаритами приводів, а саме шириною фланця крокового двигуна (рисунок 2.15). Ширина фланця крокового двигуна дорівнює 42.2 мм, тому вона не є обмежуючим чинником для проєктованого механізму.

Крокові двигуни з гальмом призначені для фіксації валу двигуна в момент, коли на нього не подається живлення внаслідок зупинки механізму або при аварійних відключеннях та збоях.

Технічні характеристики крокового двигуна 42BYGH47 0,6Нм з електрогальмом подані в таблиці 2.1.

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

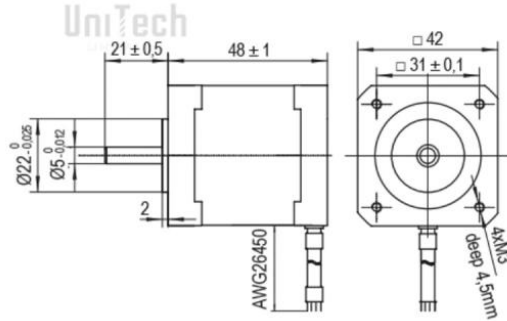
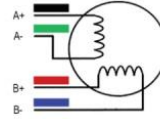
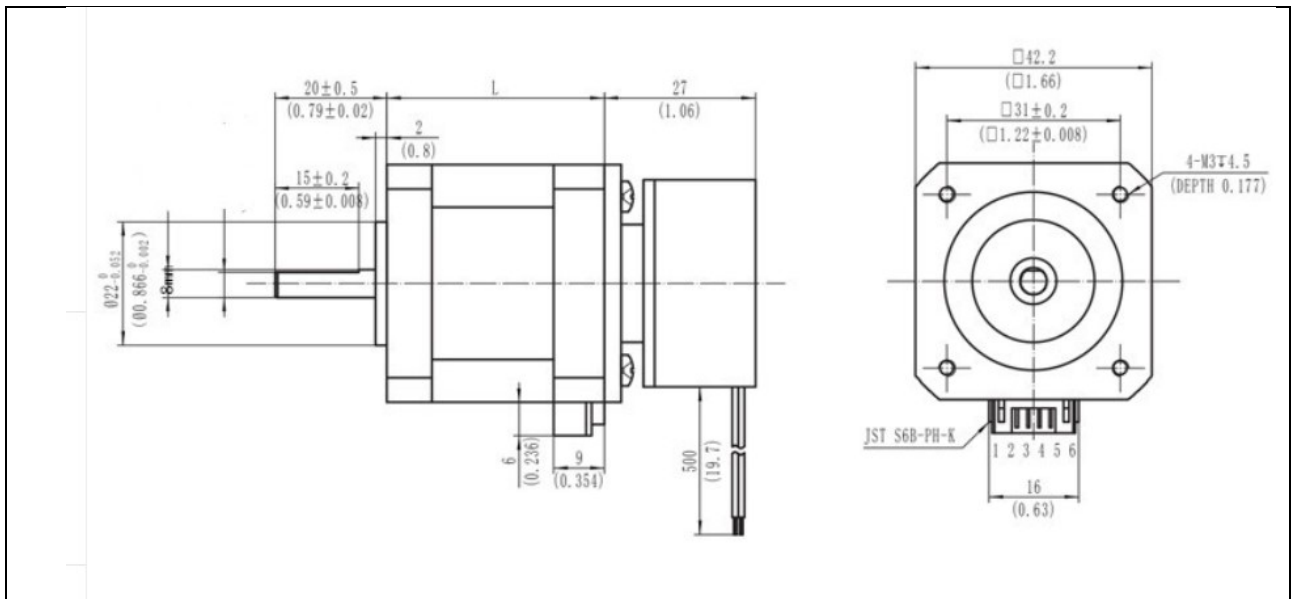


Рисунок 2.15 – Кроковий двигун
(чорний колір A+ зелений A- червоний B + синій B-)

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики крокового двигуна 42BYGH47



Кількість фаз	2 фази
Кут кроку (град)	1.8
Крутний момент	0.6 Нм
Струм	2А
Вага	0.5 кг
Напруга живлення гальма	24 V постійного струму
Довжина	47 мм
Тип кріплення	Nema 17
Розміри габаритні	95мм * 43мм * 43мм
Діаметр валу	5мм

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

33

Задаємося відстанню між осями приводів робота 100 мм.

Довжина ланки, яка обертається на валу привода – 75 мм

Довжина другої ланки – 125 мм

2.3 Побудова параметричної моделі робота

Згідно вибраних раніше геометричних параметрів компонентів робота були створені креслення деталей та побудована тривимірна модель двокоординатного паралельного робота.

Креслення деталей робота подані у Додатках.

Тривимірні моделі деталей показані на рисунках 2.16 – 2.19.

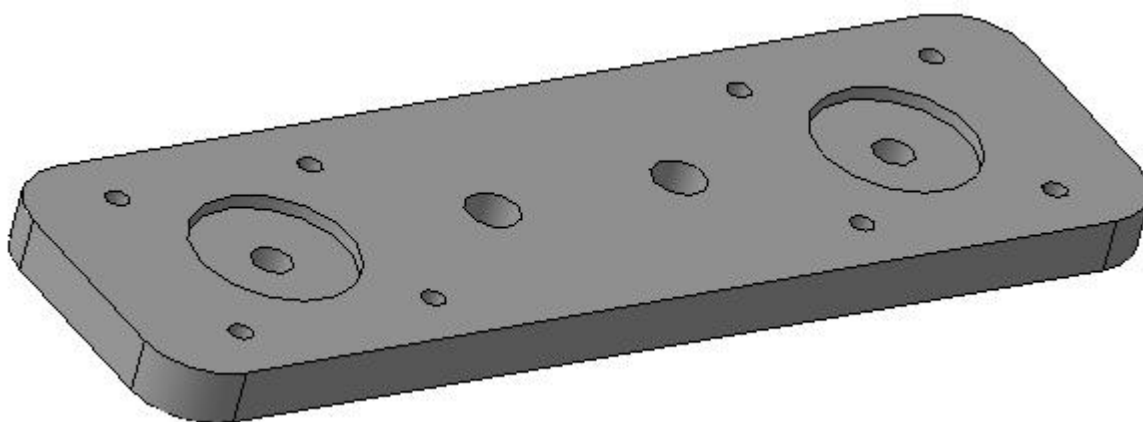


Рисунок 2.16 –Кріпильна плита

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

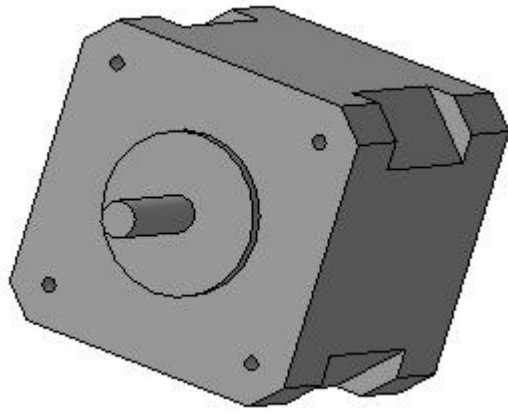


Рисунок 2.17 – Кроковий двигун

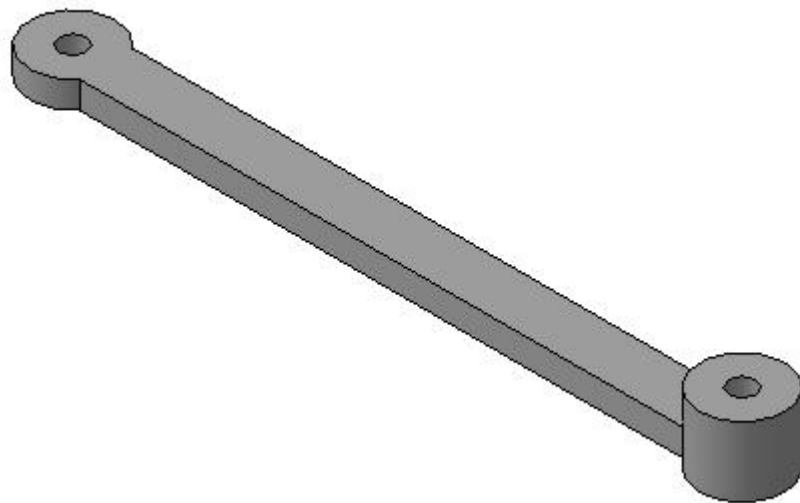


Рисунок 2.18 – Ведена ланка

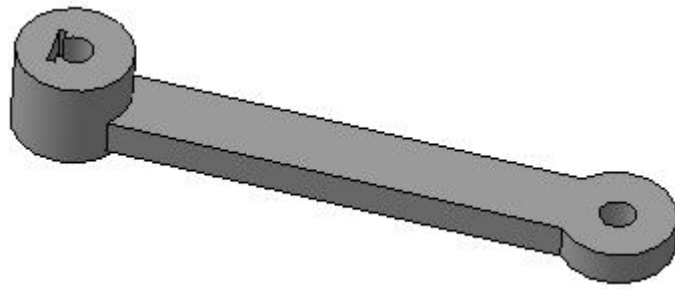


Рисунок 2.19 – Ведуча ланка

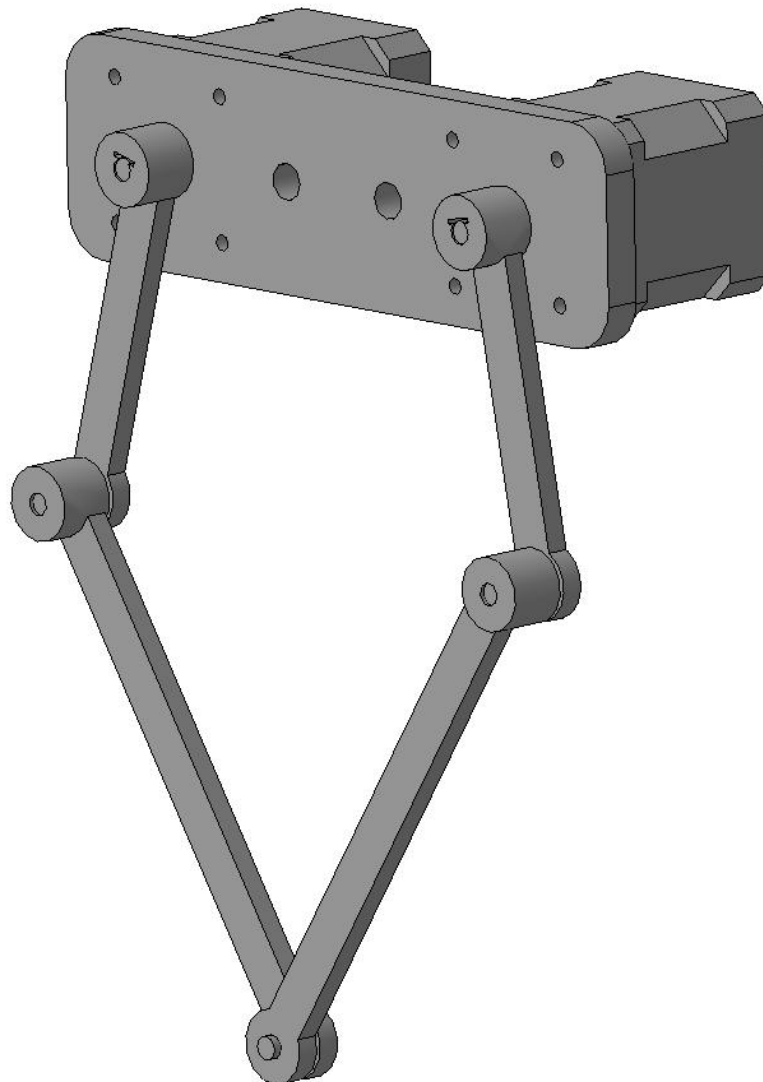


Рисунок 2.20 – 3D модель двокоординатного паралельного робота

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

36

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз прямої кінематики робота

Метою вирішення задачі прямої кінематики є визначення координат точки розміщення кінцевого ефектора в залежності від значення керуючого параметра – кута повороту ланки, закріпленої на валу крокового двигуна.

Як показано на рисунку 3.1, для встановлення співвідношення координат використовується площина X-Y. Весь робот переміщується або обертається в площині X-Y. Середня точка O кінцевого ефектора є точкою з'єднання кінцевих ланок двох плеч робота. Вона береться як об'єкт дослідження, координати точки дорівнюють (T_x, T_y) . Нехай довжина AF дорівнює L_1 , довжина FE – L_2 , довжина OC – L_3 , довжина BC – L_4 , довжина AB – L_5 .

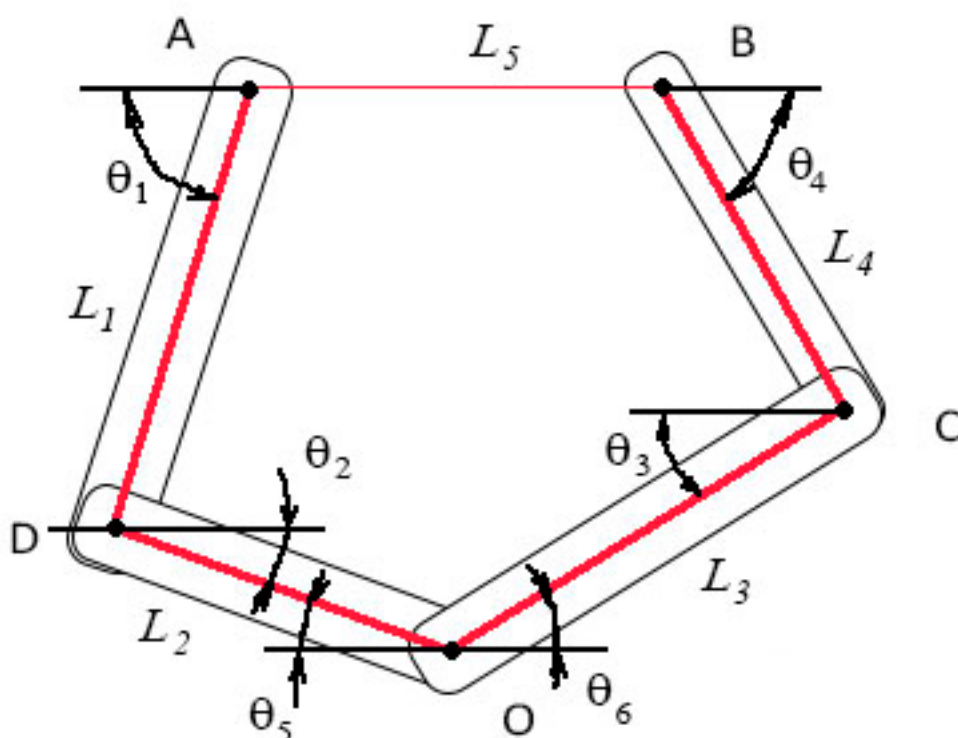


Рисунок 3.1 – Розрахункова кінематична схема робота

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Математична модель руху встановлюється такими співвідношеннями:

$$-L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 = L_5 + L_4 \cos \theta_4 - L_3 \cos \theta_3 \quad (3.1)$$

Рівняння (3.1) виражає горизонтальне відхилення точки О відносно точки А, виражене через лівий та правий кінематичний ланцюг.

$$-L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2 = -L_3 \sin \theta_3 - L_4 \sin \theta_4 \quad (3.2)$$

Рівняння (3.2) виражає вертикальне відхилення точки О відносно точки А, виражене через лівий та правий кінематичний ланцюг.

$$(180^\circ - \theta_1) + (\theta_2 + \theta_1) + (180^\circ - \theta_2 - \theta_3) + (\theta_3 + \theta_4) + (180^\circ - \theta_4) = 540^\circ \quad (3.3)$$

Рівняння (3.3) складене для перевірки на основі виразу для суми внутрішніх кутів багатокутника (в нашому випадку – п'ятикутника). Після зведення подібних доданків отримуємо тотожність $540^\circ = 540^\circ$.

Необхідно виразити невідомі кути θ_2 та θ_3 через кути повороту θ_1 та θ_4 ведучих ланок L_1 та L_4 . Маємо 2 невідомих і 2 рівняння. Довжини ланок відомі.

$$\begin{cases} -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 - L_5 - L_4 \cos \theta_4 + L_3 \cos \theta_3 = 0 \\ -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 + L_4 \sin \theta_4 = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Позначимо

$$A = -L_1 \cos \theta_1 - L_5 - L_4 \cos \theta_4 \quad (3.5)$$

$$B = -L_1 \sin \theta_1 + L_4 \sin \theta_4 \quad (3.6)$$

Тоді система набуде вигляду

$$\begin{cases} A + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 = 0 \\ B - L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

З першого рівняння системи:

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_2 \cos \theta_2 = -A - L_3 \cos \theta_3$$

$$\cos \theta_2 = \frac{-A - L_3 \cos \theta_3}{L_2} \quad (3.8)$$

З другого рівняння системи:

$$L_2 \sin \theta_2 = B + L_3 \sin \theta_3$$

$$\sin \theta_2 = \frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2} \quad (3.9)$$

Піднесемо вирази (3.8) і (3.9) до квадрату та додамо

$$\left(\frac{-A - L_3 \cos \theta_3}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2}\right)^2 = 1 \quad (3.10)$$

Помножимо рівняння на L_2^2 :

$$(-A - L_3 \cos \theta_3)^2 + (B + L_3 \sin \theta_3)^2 = L_2^2 \quad (3.11)$$

Розкриємо дужки:

$$A^2 + 2AL_3 \cos \theta_3 + L_3^2 \cos^2 \theta_3 + B^2 + 2BL_3 \sin \theta_3 + L_3^2 \sin^2 \theta_3 = L_2^2 \quad (3.12)$$

Або, після скорочень

$$A^2 + B^2 + L_3^2 + 2AL_3 \cos \theta_3 + 2BL_3 \sin \theta_3 = L_2^2 \quad (3.13)$$

$$2AL_3 \cos \theta_3 + 2BL_3 \sin \theta_3 = L_2^2 - A^2 - B^2 - L_3^2 \quad (3.14)$$

$$A \cos \theta_3 + B \sin \theta_3 = \frac{L_2^2 - A^2 - B^2 - L_3^2}{2L_3} \quad (3.15)$$

Вираз (3.15) можна записати у вигляді

$$A \cos \theta_3 + B \sin \theta_3 = C \quad (3.16)$$

де $C = \frac{L_2^2 - A^2 - B^2 - L_3^2}{2L_3} \quad (3.17)$

Використавши формули для подвійного кута, отримаєм

$$A \cos^2 \left(\frac{\theta_3}{2}\right) - A \sin^2 \left(\frac{\theta_3}{2}\right) + 2B \sin \left(\frac{\theta_3}{2}\right) \cos \left(\frac{\theta_3}{2}\right) - C = 0 \quad (3.18)$$

Або

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

$$A \cos^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right) - A \sin^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right) + 2B \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_3}{2}\right) - C \cos^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right) - C \sin^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right) = 0$$

Поділимо на $\cos^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right)$

$$-\frac{C \sin^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right)} - \frac{A \sin^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right)} + \frac{2B \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_3}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta_3}{2}\right)} - C + A = 0 \quad (3.19)$$

або

$$-C \operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right) - A \operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta_3}{2}\right) + 2B \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_3}{2}\right) - C + A = 0 \quad (3.20)$$

$$\text{Зробимо підстановку } t = \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_3}{2}\right) \quad (3.21)$$

Отримаємо квадратне рівняння

$$(C + A)t^2 - 2Bt + (C - A) = 0 \quad (3.22)$$

Дискримінант рівняння:

$$D = 4B^2 - 4(C + A)(C - A) = 4(B^2 - C^2 + A^2) \quad (3.23)$$

$$\text{Корені рівняння: } t_{1,2} = \frac{2B \pm 2\sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{2(C + A)} = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{C + A} \quad (3.24)$$

Отже, врахувавши зроблену підстановку (3.21), отримаємо

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta_3}{2}\right) = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{C + A} \quad (3.25)$$

$$\frac{\theta_3}{2} = \pi k + \operatorname{arctg}\left(\frac{B}{C + A} \pm \frac{\sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{C + A}\right)$$

$$\theta_3 = 2\pi k + 2 \operatorname{arctg}\left(\frac{B}{C + A} \pm \frac{\sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{C + A}\right) \quad (3.26)$$

З виразу (3.9) маємо

$$\theta_2 = \operatorname{arcsin}\left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2}\right) \quad (3.27)$$

Рівняння (3.26), (3.27) виражають залежність між кутами повороту ланок та приводів для забезпечення рухів ланок робота.

$$T_x = -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 = -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \left(\arcsin \left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2} \right) \right) \quad (3.28)$$

$$T_y = -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2 = -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2} \right) \quad (3.29)$$

Вирази (3.28), (3.29) з врахуванням (3.26) та (3.27) є розв'язком задачі прямої кінематики двокоординатного паралельного робота.

Якщо розглядати варіант симетричної конструкції робота, то

$$L_1 = L_4 \text{ і } L_2 = L_3 \quad (3.30)$$

В цьому випадку вирази для (3.5), (3.6), (3.17) спростяться. Відповідно простішими будуть залежності для обчислення кутів повороту θ_2 та θ_3 .

3.2 Аналіз зворотної кінематики робота

Метою вирішення задачі зворотної кінематики є знаходження кутів повороту валів крокових двигунів для забезпечення заданих координат (T_x, T_y) точки закріплення кінцевого ефектора робота.

Розв'язок задачі зворотної кінематики можна отримати з рівнянь розв'язку задачі прямої кінематики, виразивши кути θ_1 та θ_4 через задані координати кінцевого ефектора (T_x, T_y) .

$$T_x = -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2$$

$$T_y = -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2$$

$$\cos \theta_2 = \frac{1}{L_2} (T_x - L_1 \cos \theta_1) \quad (3.31)$$

$$\sin \theta_2 = -\frac{1}{L_2} (T_y + L_1 \sin \theta_1) \quad (3.32)$$

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Піднесемо (3.31) та (3.32) до квадрату та додамо отримані вирази:

$$1 = \frac{1}{L_2^2} (T_x^2 + T_y^2 - 2T_x L_1 \cos\theta_1 + 2T_y L_1 \sin\theta_1 + L_1^2)$$

або

$$2L_1(T_y \sin\theta_1 - T_x \cos\theta_1) = L_2^2 - L_1^2 - (T_x^2 + T_y^2)$$

$$2L_1 T_y \sin\theta_1 - 2L_1 T_x \cos\theta_1 + T_x^2 + T_y^2 + L_1^2 - L_2^2 = 0 \quad (3.33)$$

$$\text{Зробимо підстановку } x = tg \frac{\theta_1}{2}. \sin\theta_1 = \frac{2x}{x^2+1}; \cos\theta_1 = \frac{-x^2+1}{x^2+1}. \quad (3.34)$$

Тоді з (3.33) отримаємо:

$$T_x^2 + T_y^2 + L_1^2 - L_2^2 - \frac{2L_1 T_x}{x^2+1} + \frac{4L_1 T_y x}{x^2+1} + \frac{2L_1 T_x x^2}{x^2+1} = 0 \quad (3.35)$$

Помноживши на $x^2 + 1$, отримаємо

$$T_x^2 + T_y^2 - 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2 + 4L_1 T_y x + T_x^2 x^2 + T_y^2 x^2 + 2L_1 T_x x^2 + L_1^2 x^2 - L_2^2 x^2 = 0$$

або, після зведення доданків

$$T_x^2 + T_y^2 - 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2 + 4L_1 T_y x + x^2(T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2) = 0 \quad (3.36)$$

Поділимо (3.36) на $T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2$. Отримаємо:

$$\frac{T_x^2 + T_y^2 - 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2}{T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2} + \frac{4L_1 T_y x}{T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2} + x^2 = 0 \quad (3.37)$$

Додамо до обох частин (3.37) вираз $\frac{4L_1^2 T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2)^2}$. Отримаємо:

$$\left(\frac{2L_1 T_y}{T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2} + x \right)^2 = \frac{4L_1^2 T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2)^2} - \frac{T_x^2 + T_y^2 - 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2}{T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2} \quad (3.38)$$

Візьмемо квадратний корінь з обох частин (3.39) і врахуємо (3.34):

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

$$tg \frac{\theta_1}{2} = -\frac{2L_1T_y}{T_x^2+T_y^2+2L_1T_x+L_1^2-L_2^2} \pm \sqrt{\frac{4L_1^2T_y^2}{(T_x^2+T_y^2+2L_1T_x+L_1^2-L_2^2)^2} - \frac{T_x^2+T_y^2-2L_1T_x+L_1^2-L_2^2}{T_x^2+T_y^2+2L_1T_x+L_1^2-L_2^2}} \quad (3.39)$$

Тоді

$$\frac{\theta_1}{2} = \pi n - \arctg \left(\frac{2L_1T_y}{T_x^2+T_y^2+2L_1T_x+L_1^2-L_2^2} \pm \sqrt{\frac{4L_1^2T_y^2}{(T_x^2+T_y^2+2L_1T_x+L_1^2-L_2^2)^2} - \frac{T_x^2+T_y^2-2L_1T_x+L_1^2-L_2^2}{T_x^2+T_y^2+2L_1T_x+L_1^2-L_2^2}} \right)$$

Остаточний вираз для кута повороту θ_1 матиме вигляд:

$$\theta_1 = 2\pi n - 2\arctg \left(\frac{2L_1T_y}{T_x^2+T_y^2+2L_1T_x+L_1^2-L_2^2} \pm \sqrt{\frac{4L_1^2T_y^2}{(T_x^2+T_y^2+2L_1T_x+L_1^2-L_2^2)^2} - \frac{T_x^2+T_y^2-2L_1T_x+L_1^2-L_2^2}{T_x^2+T_y^2+2L_1T_x+L_1^2-L_2^2}} \right) \quad (3.40)$$

Знайдемо подібним шляхом вираз для кута повороту θ_4 другої ведучої ланки.

$$T_x = L_5 + L_4 \cos \theta_4 - L_3 \cos \theta_3 \quad (3.41)$$

$$T_y = -L_4 \sin \theta_4 - L_3 \sin \theta_3 \quad (3.42)$$

$$\cos \theta_3 = \frac{L_5 + L_4 \cos \theta_4 - T_x}{L_3} \quad (3.43)$$

$$\sin \theta_3 = \frac{-L_4 \sin \theta_4 - T_y}{L_3} \quad (3.44)$$

Піднесемо обидва вирази до квадрату і додамо:

$$1 = \frac{L_5^2 + L_4^2 \cos^2 \theta_4 + T_x^2 + 2L_5L_4 \cos \theta_4 - 2L_5T_x - 2L_4T_x \cos \theta_4 + L_4^2 \sin^2 \theta_4 + T_y^2 + 2L_4T_y \sin \theta_4}{L_3^2} \quad ,$$

Звівши подібні доданки отримаємо:

$$\begin{aligned} L_3^2 &= L_5^2 + L_4^2 + T_x^2 + T_y^2 - 2L_5T_x + \cos \theta_4(2L_5L_4 - 2L_4T_x) + 2L_4T_y \sin \theta_4 \\ \cos \theta_4(2L_5L_4 - 2L_4T_x) + 2L_4T_y \sin \theta_4 + L_5^2 + L_4^2 + T_x^2 + T_y^2 - 2L_5T_x - L_3^2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\text{Зробимо підстановку } x = tg \frac{\theta_4}{2}. \text{ Отже } \sin \theta_4 = \frac{2x}{x^2+1}; \cos \theta_4 = \frac{-x^2+1}{x^2+1}. \quad (3.46)$$

Тоді з (3.45) отримаємо:

$$\frac{2L_4T_x x^2}{x^2+1} - \frac{2L_5L_4 x^2}{x^2+1} - \frac{2L_4T_x}{x^2+1} + \frac{2L_5L_4}{x^2+1} + \frac{4L_4T_y x}{x^2+1} + L_5^2 + L_4^2 + T_x^2 + T_y^2 - 2L_5T_x - L_3^2 = 0 \quad (3.47)$$

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Помноживши на $x^2 + 1$, отримаємо

$$2L_4T_x x^2 - 2L_5L_4 x^2 + 4L_4T_y x + 2L_5L_4 - 2L_4T_x + (L_5^2 + L_4^2 + T_x^2 + T_y^2 - 2L_5T_x - L_3^2)x^2 + L_5^2 + L_4^2 + T_x^2 + T_y^2 - 2L_5T_x - L_3^2 = 0.$$

Після зведення доданків буде:

$$(T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x)x^2 + 4L_4T_y x + T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 + 2L_5L_4 - 2L_4T_x - 2L_5T_x = 0$$

Поділивши на $T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x$, отримаємо:

$$x^2 + \frac{4L_4T_y x}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x} + \frac{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 + 2L_5L_4 - 2L_4T_x - 2L_5T_x}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x} = 0 \quad (3.48)$$

Додамо до обидвох частин (3.48) вираз $\frac{4L_4^2T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x)^2}$.

$$\text{Отримаємо:} \quad \left(x + \frac{2L_4T_y}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x} \right)^2 = \frac{4L_4^2T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x)^2} - \frac{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 + 2L_5L_4 - 2L_4T_x - 2L_5T_x}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x} \quad (3.49)$$

Візьмемо квадратний корінь з обох частин (3.49) і врахуємо (3.46):

$$\begin{aligned} & \operatorname{tg} \frac{\theta_4}{2} \\ &= - \frac{2L_4T_y}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x} \\ & \pm \sqrt{\frac{4L_4^2T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x)^2} - \frac{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 + 2L_5L_4 - 2L_4T_x - 2L_5T_x}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x}} \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$\text{Тоді} \quad \theta_4 = 2\pi n - 2\arctg \left(- \frac{2L_4T_y}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x} \pm \sqrt{\frac{4L_4^2T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x)^2} - \frac{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 + 2L_5L_4 - 2L_4T_x - 2L_5T_x}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4L_5 + 2L_4T_x - 2L_5T_x}} \right) \quad (3.51)$$

Вирази (3.40) та (3.51) є розв'язком задачі зворотної кінематики робота. Вони дають значення кутів повороту θ_1 та θ_4 ведучих ланок для досягнення заданих координат (T_x, T_y) кінцевого ефектора робота.

3.3 Програмування робота

Для керування кроковими двигунами робота за відомими залежностями для координат керованої точки від кута повороту вала крокового двигуна на Python можна використовувати бібліотеку Rpi.GPIO (для Raspberry Pi) або pyfirmata (для Arduino).

3.3.1 Програма для плати Raspberry Pi

Raspberry Pi – це мініатюрний одноплатний комп'ютер, який легко поміститься на долоні дорослої людини (рисунок 3.2). Незважаючи на свої скромні розміри, плата має високу продуктивність, що дозволяє вийти на один рівень зі стаціонарними ПК. Спочатку Raspberry Pi була розроблена як навчальний інструмент з інформатики. Але сама ідея виявилася настільки вдалою, що за кілька років міні-комп'ютер став популярним у дуже широких колах.



Рисунок 3.2 – Плата Raspberry Pi

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ

Арк.

45

Розглянемо варіант плати Raspberry Pi та бібліотеки Rpi.GPIO. Ми будемо керувати двома кроковими двигунами, використовуючи драйвери A4988, і будемо мати функцію, яка розраховує кути повороту (θ_1 , θ_2) на основі заданих координат (x , y).

Щоб створити програму на Python для керування кроковими двигунами паралельного двокоординатного робота, спочатку потрібно врахувати кінематику робота і залежності координат керованої точки від кутів повороту валів крокових двигунів. Для цього нам знадобляться кілька бібліотек: numpy для математичних розрахунків, time для управління затримками і Rpi.GPIO (для Raspberry Pi) для керування GPIO пінів.

Для реалізації цієї програми ми використовуємо такі основні кроки:

1. Обчислення прямих кінематичних залежностей.
2. Обчислення зворотних кінематичних залежностей.
3. Керування кроковими двигунами на основі розрахованих кутів.

Для початку напишемо основні функції для обчислення кінематики. Ми маємо вже виведені залежності $T_x(\theta_1, \theta_2)$, $T_y(\theta_1, \theta_2)$ для прямої кінематики та залежності $\theta_1(T_x, T_y)$, $\theta_2(T_x, T_y)$ для зворотної кінематики.

Шаблон коду програми на мові Python

```
import math

import RPi.GPIO as GPIO

from time import sleep

# Налаштування GPIO для керування кроковими двигунами

GPIO.setmode(GPIO.BCM)

GPIO.setwarnings(False)
```

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

```
# Піни для керування кроковими двигунами
```

```
STEP_PIN_1 = 17
```

```
DIR_PIN_1 = 27
```

```
STEP_PIN_2 = 22
```

```
DIR_PIN_2 = 23
```

```
GPIO.setup(STEP_PIN_1, GPIO.OUT)
```

```
GPIO.setup(DIR_PIN_1, GPIO.OUT)
```

```
GPIO.setup(STEP_PIN_2, GPIO.OUT)
```

```
GPIO.setup(DIR_PIN_2, GPIO.OUT)
```

```
# Функції для керування кроковими двигунами
```

```
def step_motor(step_pin, dir_pin, steps, direction):
```

```
    GPIO.output(dir_pin, direction)
```

```
    for _ in range(steps):
```

```
        GPIO.output(step_pin, GPIO.HIGH)
```

```
        sleep(0.01) # Налаштування швидкості кроків
```

```
        GPIO.output(step_pin, GPIO.LOW)
```

```
        sleep(0.01)
```

```
# Функція для обчислення прямих кінематичних залежностей L2=L3 L1=L4
```

```
def forward_kinematics(theta1, theta4):
```

```
    L1 = 75 # Задаєм значення для L1
```

```
    L2 = 125 # Задаєм значення для L2
```

```
    L5 = 100 # Задаєм значення для L5
```

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

# Залежності для Tx, Ty

Tx = ...

Ty = ...

return Tx, Ty

# Функція для обчислення зворотних кінематичних залежностей
def inverse_kinematics(Tx, Ty):

    # Залежності для  $\theta_1, \theta_4$ 

    theta1 = ...

    theta4 = ...

    return theta1, theta4

# Основна функція для керування роботом
def move_to(Tx, Ty):

    theta1, theta2 = inverse_kinematics(Tx, Ty)

    steps1 = int(theta1 * 200 / (2 * math.pi)) # Перетворення кутів у кроки
    steps2 = int(theta2 * 200 / (2 * math.pi))

    direction1 = GPIO.HIGH if steps1 > 0 else GPIO.LOW
    direction2 = GPIO.HIGH if steps2 > 0 else GPIO.LOW

    step_motor(STEP_PIN_1, DIR_PIN_1, abs(steps1), direction1)
    step_motor(STEP_PIN_2, DIR_PIN_2, abs(steps2), direction2)

# Приклад виклику функції для переміщення у точку (Tx, Ty)
move_to(1.0, 1.0)

```

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Очищення GPIO

GPIO.cleanup()

Опис складових частин програми:

1. Налаштовується GPIO. При цьому використовується бібліотека RPi.GPIO для керування кроковими двигунами через GPIO-піни Raspberry Pi.
2. Функція для керування двигунами: `step_motor` керує одним кроковим двигуном, виконуючи задану кількість кроків у вказаному напрямку.
3. Функції `forward_kinematics` та `inverse_kinematics` обчислюють прямі та зворотні кінематичні залежності відповідно.
4. Основна функція керування: `move_to` використовує зворотні кінематичні залежності для обчислення необхідних кутів повороту двигунів, перетворює їх у кроки та керує двигунами для досягнення заданої точки (T_x , T_y).

3.3.2 Програма для плати Arduino

Arduino (Ардуіно) — апаратна обчислювальна платформа для аматорського конструювання, основними компонентами якої є плата мікроконтролера з елементами вводу/виводу та середовище розробки Processing/Wiring на мові програмування, яка є спрощеною підмножиною C/C++ (рисунок 3.3). Arduino може використовуватися як для створення автономних інтерактивних об'єктів, так і підключатися до програмного забезпечення, яке виконується на комп'ютері

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

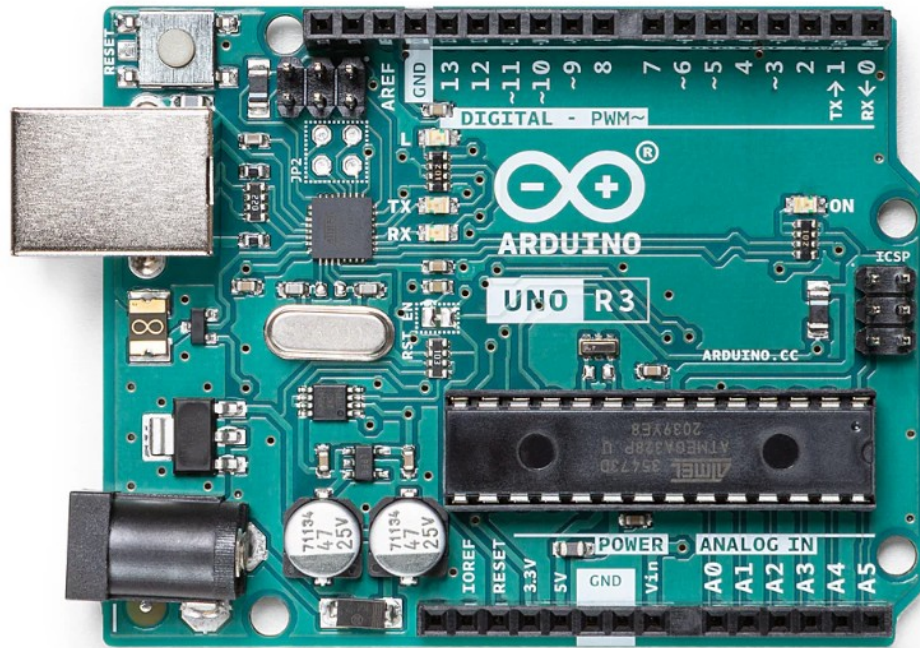


Рисунок 3.3 – Плата Arduino Uno

Для керування кроковими двигунами двокоординатного паралельного робота за допомогою Arduino і Python, так само, як і у випадку для RaspberryPi, потрібно врахувати пряму і зворотну кінематику робота. Використаємо бібліотеку pySerial для зв'язку між Python і Arduino.

Залежності для прямої кінематики:

$$T_x(\theta_1, \theta_4), T_y(\theta_1, \theta_4)$$

Залежності для зворотної кінематики:

$$\theta_1(T_x, T_y), \theta_4(T_x, T_y)$$

Створимо шаблон програми на мові Arduino Sketch

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

```
#define MOTOR_X_STEP_PIN 2
```

```
#define MOTOR_X_DIR_PIN 5
```

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

```

#define MOTOR_Y_STEP_PIN 3

#define MOTOR_Y_DIR_PIN 6

AccelStepper motorX(AccelStepper::DRIVER, MOTOR_X_STEP_PIN,
MOTOR_X_DIR_PIN);

AccelStepper motorY(AccelStepper::DRIVER, MOTOR_Y_STEP_PIN,
MOTOR_Y_DIR_PIN);

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  motorX.setMaxSpeed(1000);

  motorX.setAcceleration(500);

  motorY.setMaxSpeed(1000);

  motorY.setAcceleration(500);

}

void loop() {

  if (Serial.available() > 0) {

    String input = Serial.readStringUntil('\n');

    char command = input.charAt(0);

    float value = input.substring(1).toFloat();

    if (command == 'X') {

      motorX.moveTo(value);

    } else if (command == 'Y') {

      motorY.moveTo(value);

    }

  }

}

```

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

```
motorX.run();  
motorY.run();  
}  
}
```

Скрипт на мові Python

```
import serial  
import time  
import math  
  
# Встановлення параметрів послідовного порту  
ser = serial.Serial('COM3', 9600) # Треба змінити 'COM3' на відповідний порт  
  
def move_to_position(Tx, Ty):  
    # Визначення кутів для двигунів через зворотну кінематику  
    theta1 = inverse_kinematics_theta1(Tx, Ty)  
    theta4 = inverse_kinematics_theta4(Tx, Ty)  
  
    # Конвертація кутів у кроки (припускаємо 1 крок = 1 градус)  
    steps_motor_x = theta1_to_steps(theta1)  
    steps_motor_y = theta4_to_steps(theta4)  
  
    # Відправка команд на Arduino
```

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

```

ser.write(f'X{steps_motor_x}\n'.encode())

ser.write(f'Y{steps_motor_y}\n'.encode())

time.sleep(2)    # Затримка для виконання руху

def inverse_kinematics_theta1(Tx, Ty):

    # Тут розміщуємо формули для зворотної кінематики

    # Повертає значення theta1

    pass        # нічого не виконується - замість pass має бути код формули

def inverse_kinematics_theta4(Tx, Ty):

    # Тут розміщуємо формули для зворотної кінематики

    # Повертає значення theta4

    pass        # нічого не виконується - замість pass має бути код формули

def theta1_to_steps(theta1):

    # Конвертація кутів в кроки для лівого двигуна

    steps = theta1        # Варіант конвертації 1 до 1

    return steps

def theta4_to_steps(theta4):

    # Конвертація кутів в кроки для правого двигуна

    steps = theta4        # Варіант конвертації 1 до 1

    #Для конвертації кутів в кроки двигунів потрібно знати співвідношення між

    # кутами обертання і кроками двигуна. Це можна зробити за допомогою

```

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

коефіцієнта, який залежить від двигуна та передавального механізму

return steps

Приклад виклику функції для руху до заданої точки (Tx, Ty)

move_to_position(100, 150)

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота складається із пояснювальної записки, графічної частини та виконана згідно із завданням. Було спроектовано конструкцію двокоординатного паралельного робота. Також був проведений огляд сучасних розробок паралельних роботів, їх переваги та області застосування.

В конструкторській частині проведено аналіз впливу геометричних параметрів ланок двокоординатного робота на форму та розміри його робочої зони. Для вибраних співвідношень геометричних параметрів ланок робота розроблено конструкції ланок, створено їх креслення. В середовищі графічного 3D редактора створено тривимірні моделі деталей робота. На основі 3D моделей створено тривимірну збірку двокоординатного паралельного робота.

В технологічній частині проведено аналіз прямої та зворотної кінематик двокоординатного паралельного робота, отримано математичні залежності координат ефектора від кутів повороту ведучих ланок на валах крокових двигунів робота для задачі прямої кінематики та залежності кутів повороту ланок на валах крокових двигунів для забезпечення заданих координат ефектора для задачі зворотної кінематики. Також розроблено шаблони програм для керування роботом через плати RaspberryPi та Arduino.

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Huang T., Li Z., Li M., et al. Conceptual Design and Dimensional Synthesis of a Novel 2DOF Translational Parallel Robot for Pick-and-Place Operations[J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(3):449-455.
2. Wu J., Wang J., Li T., et al. Analysis and Application of a 2DOF Planar Parallel Mechanism[J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(4):434-437.
3. Zhang D. and Gosselin C.M. Parallel kinematic machine design with kinetostatic model. Robotica, 20(4):429–438, July 2002.
4. Панчук В.Г., Карпик Р.Т., Врюкало В.В., Одосій З.М. Бакалаврська робота: методичні вказівки. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. - 59 с.
5. Wang J. and Gosselin C.M. Kinematic analysis and design of kinematically redundant parallel mechanisms. ASME J. of Mechanical Design, 126(1):109–118, January 2004.
6. Tsai L-W. Solving the inverse dynamics of a Stewart-Gough manipulator by the principle of virtual work. ASME J. of Mechanical Design, 122(1):3–9, March 2000.
7. Sugar T.G. and Kumar V. Design and control of a compliant parallel manipulator. ASME J. of Mechanical Design, 124(4):676–683, December 2002.
8. Rao A.C. Parallelism in planar kinematic chains (manipulators). Mechanism and Machine Theory, 39(10):1111–1122, October 2004.
9. Miller K. Optimal design and modeling of spatial parallel manipulators. Int. J. of Robotics Research, 23(2):127–140, February 2004.
10. Angeles J. The qualitative synthesis of parallel manipulators. ASME J. of Mechanical Design, 126(4):617–624, July 2004.
11. Alizade R.I. and Bayram C. Structural synthesis of parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory, 39(8):857–870, August 2004.
12. J.-P. MERLET. Parallel Robots (Second Edition). INRIA, Sophia-Antipolis, France. ISBN-10 1-4020-4133-0 (e-book), 2006, - 417 p.
13. Samir Lahouar, Said Zeghloul, Lotfi Romdhane. Parallel manipulator robots design and simulation. Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on System Science

					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

and Simulation in Engineering, Tenerife, Canary Islands, Spain, December 16-18, 2006

14. Viera Poppeová, Juraj Uriček, Vladimír Bulej, Peter Šindler. Delta robots - robots for high speed manipulation. Technical Gazette 18, 3(2011), pp. 435-445

15. Zhang, D. Parallel Robotic Machine Tools. Oshawa: Springer Science and Business Media, LLC 2010, ISBN 978-1-4419-1116-2, e-ISBN 978-1-4419-1117-9

16. Bonev I. Delta Parallel Robot – the Story of Success 2003.
<http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>.

17. Bogdan Gajić, Miloš Božić, Vojislav Vujičić, Miroslav Bjekić, Srećko Ćurčić. Control of 2D delta robot with Siemens Technology PLC. International Scientific Conference “UNITECH 2019”, 15 – 16 November 2019, Gabrovo

18. <https://us.metoree.com/categories/parallel-robot/>

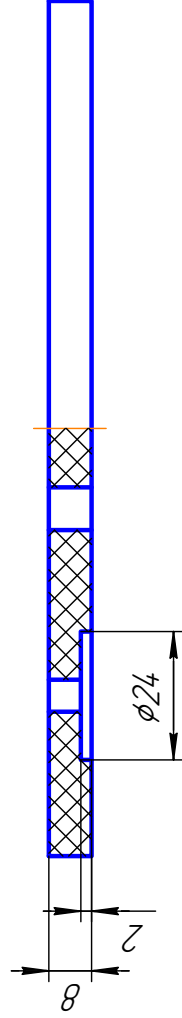
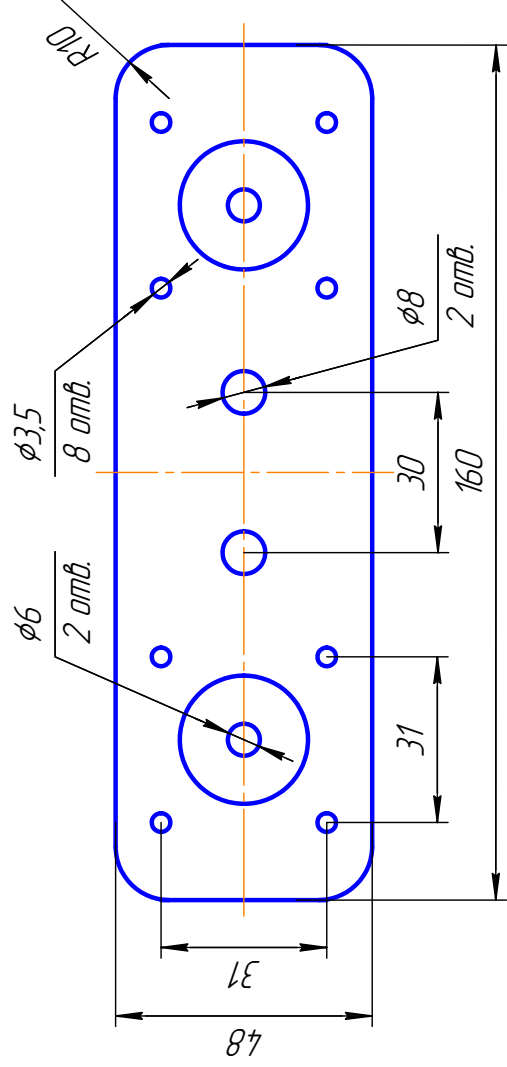
					БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ДОДАТКИ

					<i>БР.ПМІ-66.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

БР.ПМІ-066.01 01

А



Лист, нумер.

Лист, №

Лист, u дата

И№, № д/дн

Вам, уиб, №

Лист, u дата

И№, № подл.

БР.ПМІ-066.01 01		Лист	Масса	Масштаб
ПЛИТА		Лист		1:1
		Лист		1
		ИФНТУНГ		ПМІ-20-1
		Враќало		Панчук
		И.контр.		
		Реценз.		
		Т.контр.		
		Проб.		
		№ док.им.		
		Разраб.		
		Изм.		

Копировал

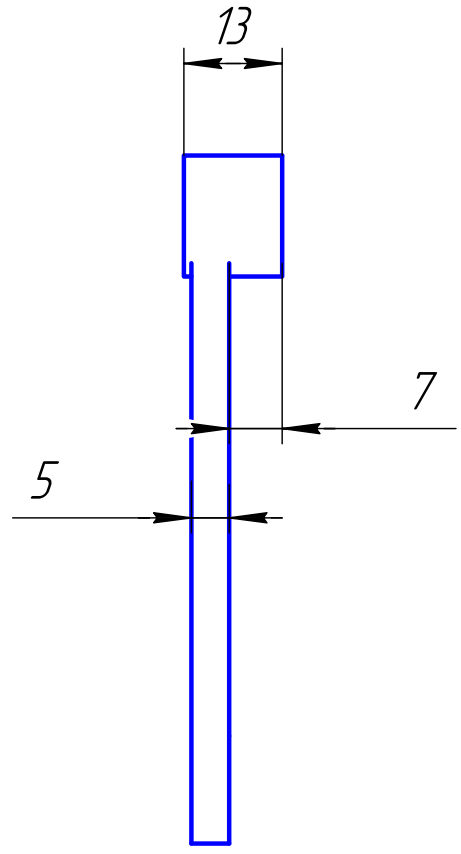
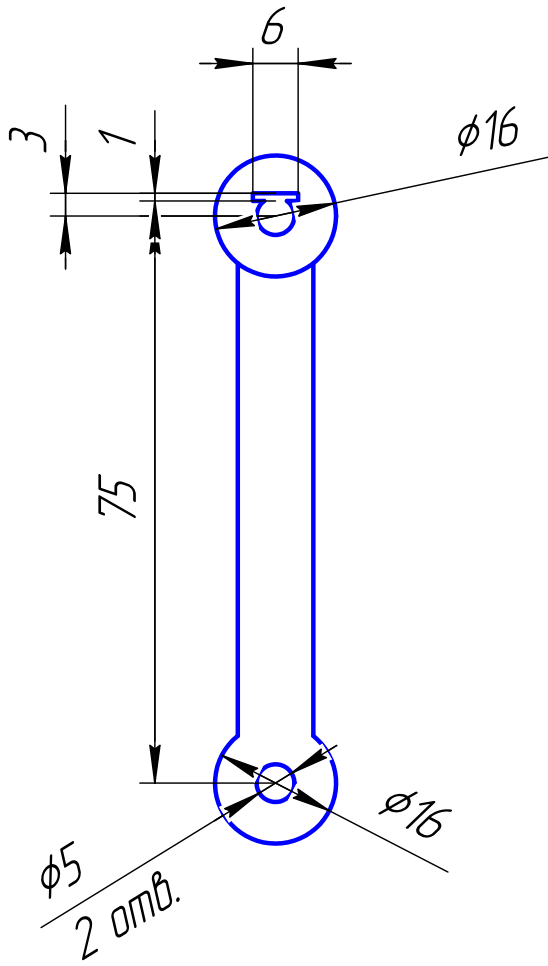
Формат А3

БР.ПМІ-066.01 02



Перв. примен.

Справ. №



Подп. и дата

Инв. № дцкл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Яцущак			
Пров.	Врюкало			
Т.контр.	Врюкало			
Н.контр.	Врюкало			
Утв.	Панчук			

БР.ПМІ-066.01 02

Вахіль

Лист	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1
ІФНТУНГ		
ПМІ-20-1		

Копировав

Формат А4

БР.ПМІ-066.01 03



Перв. примен.

Справ. №

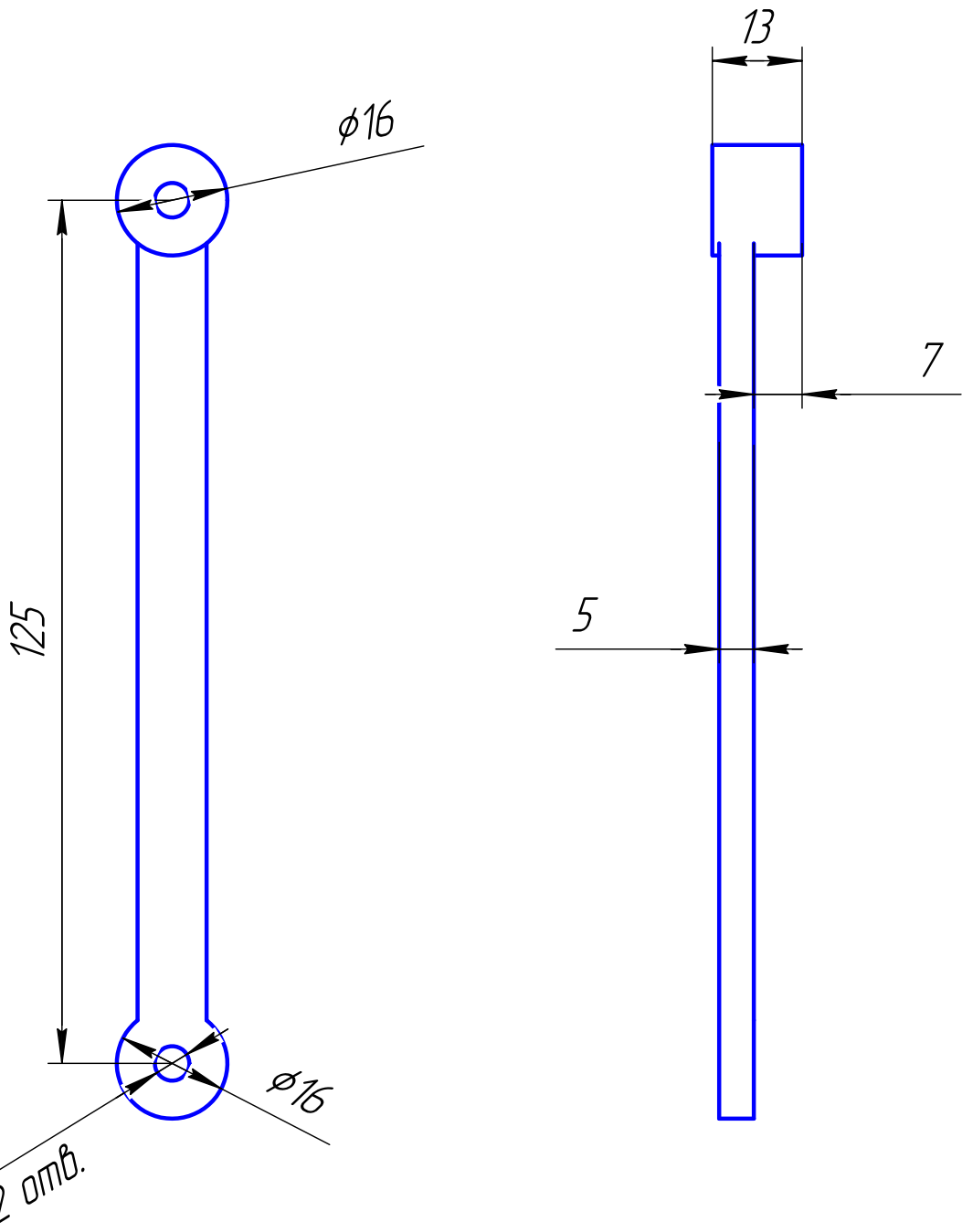
Подп. и дата

Инв. № дцкл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



$\phi 5$
2 отв.

БР.ПМІ-066.01 03

Вахіль

Лист	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1
ІФНТУНГ		
ПМІ-20-1		

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Яцущак		
Пров.		Врюкало		
Т.контр.		Врюкало		
Н.контр.		Врюкало		
Утв.		Панчук		

Копировал

Формат А4

Види роботів-маніпуляторів



Шарнірний робот



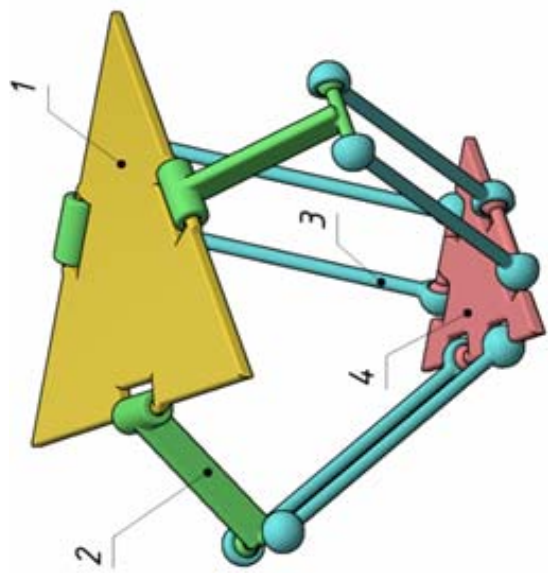
Портальний маніпулятор



Дельта-робот

Рейтинг виробників паралельних роботів серед користувачів у світі (2023 р.) за часткою кліків на сайті виробника

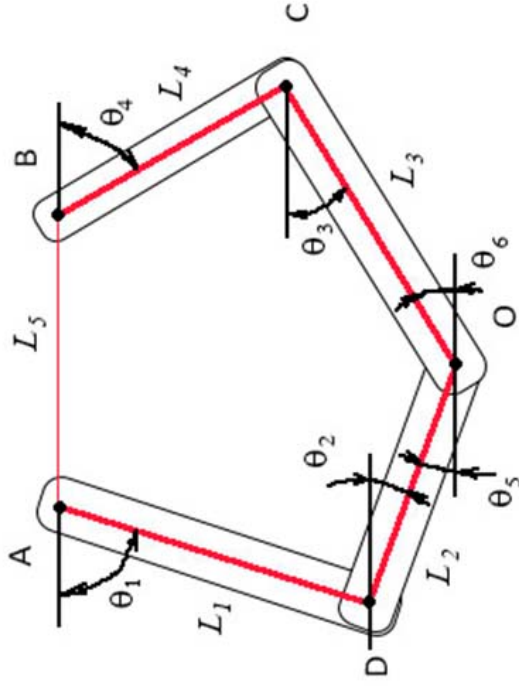
Ранг	Компанія	Кількість кліків
1	Acrome	18,5%
2	Kawasaki Robotics, Inc.	18,5%
3	FANUC	18,5%
4	Електронна мобільність АВВ	13,0%
5	KUKA AG	13,0%
6	SIASUN Robot & Automation CO.,Ltd	11,1%
7	Omron	7,4%



Типова конструкція дельта-робота

1 - основа; 2 - важіль; 3 - штанга; 4 - платформа

БР-ПМ-66.00-001		Лист 11	
Проект		Маніпулятори	
Контур		ПМ-20-1	



Пряма кінематика

$$\begin{aligned} T_x &= -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 \\ T_y &= -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 - L_5 - L_4 \cos \theta_4 + L_3 \cos \theta_3 = 0 \\ -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 + L_4 \sin \theta_4 = 0 \end{cases}$$

$$A = -L_1 \cos \theta_1 - L_5 - L_4 \cos \theta_4$$

$$B = -L_1 \sin \theta_1 + L_4 \sin \theta_4$$

$$\begin{cases} A + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 = 0 \\ B - L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 = 0 \end{cases}$$

$$C = \frac{L_2^2 - A^2 - B^2 - L_3^2}{2L_3}$$

$$\theta_3 = 2\pi k + 2 \arctg \left(\frac{B}{C+A} \pm \frac{\sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{C+A} \right)$$

$$\theta_2 = \arcsin \left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2} \right)$$

$$T_x = -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 = -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \left(\arcsin \left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2} \right) \right)$$

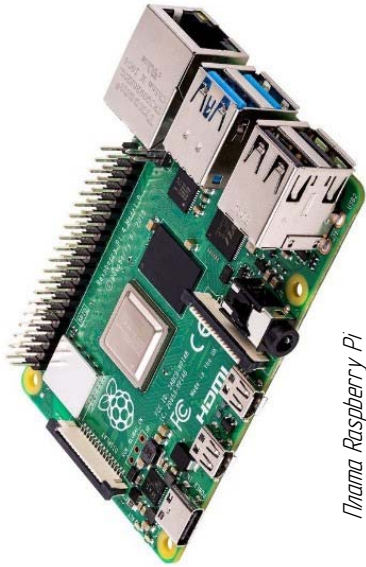
$$T_y = -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2 = -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2} \right)$$

Зворотна кінематика

$$\theta_1 = 2\pi n - 2 \arctg \left(\frac{2L_1 T_y}{T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2} \pm \sqrt{\frac{4L_1^2 T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2)^2} - \frac{T_x^2 + T_y^2 - 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2}{T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2}} \right)$$

$$\theta_4 = 2\pi n - 2 \arctg \left(-\frac{2L_4 T_y}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4 L_5 + 2L_4 T_x - 2L_5 T_x} \pm \right)$$

$$\sqrt{\frac{4L_4^2 T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4 L_5 + 2L_4 T_x - 2L_5 T_x)^2} - \frac{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4 L_5 + 2L_4 T_x - 2L_5 T_x}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4 L_5 + 2L_4 T_x - 2L_5 T_x}}$$



Плата Raspberry Pi

```

import math
import RPi.GPIO as GPIO
from time import sleep

# Налаштування GPIO для керування кроковими двигунами
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)
STEP_PIN_1 = 17
STEP_PIN_2 = 27
DIR_PIN_1 = 27
DIR_PIN_2 = 23

GPIO.setup(STEP_PIN_1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(DIR_PIN_1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(STEP_PIN_2, GPIO.OUT)
GPIO.setup(DIR_PIN_2, GPIO.OUT)
# Функції для керування кроковими двигунами
def step_motor(step_pin, dir_pin, steps, direction):
    GPIO.output(dir_pin, direction)
    for i in range(steps):
        GPIO.output(step_pin, GPIO.HIGH)
        sleep(0.01) # Налаштування швидкості кроків
        GPIO.output(step_pin, GPIO.LOW)
        sleep(0.01)

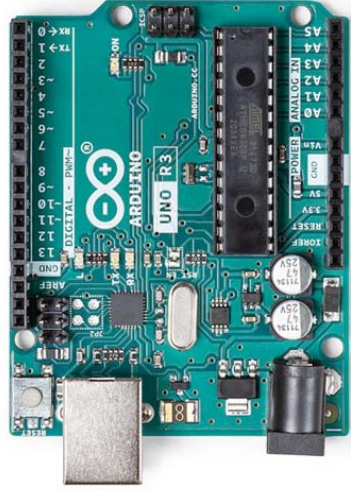
# Функція для обчислення прямих кінематичних залежностей L2=L3 L1=L4
def forward_kinematics(theta1, theta4):
    L1 = 75 # Задасм значення для L1
    L2 = 125 # Задасм значення для L2
    L5 = 100 # Задасм значення для L5
    # Залежності для Tx, Ty
    .....
    return Tx, Ty

# Функція для обчислення зворотних кінематичних залежностей
def inverse_kinematics(Tx, Ty):
    # Залежності для u1, u4
    theta1 = ...
    theta4 = ...
    return theta1, theta4

# Основна функція для керування роботом
def move_to(Tx, Ty):
    theta1, theta2 = inverse_kinematics(Tx, Ty)
    steps1 = int(theta1 * 200 / (2 * math.pi)) # Перетворення кутів у кроки
    steps2 = int(theta2 * 200 / (2 * math.pi))
    direction1 = GPIO.HIGH if steps1 > 0 else GPIO.LOW
    direction2 = GPIO.HIGH if steps2 > 0 else GPIO.LOW
    step_motor(STEP_PIN_1, DIR_PIN_1, abs(steps1), direction1)
    step_motor(STEP_PIN_2, DIR_PIN_2, abs(steps2), direction2)

# Приклад виклику функції для переміщення у точку (Tx, Ty)
move_to(1.0, 1.0)
# Очищення GPIO
GPIO.cleanup()

```



Плата Arduino

```

// Arduino Sketch
#include <AccelStepper.h>
#define MOTOR_X_STEP_PIN 2
#define MOTOR_X_DIR_PIN 5
#define MOTOR_Y_STEP_PIN 3
#define MOTOR_Y_DIR_PIN 6

AccelStepper motorX(AccelStepper::DRIVER, MOTOR_X_STEP_PIN, MOTOR_X_DIR_PIN);
AccelStepper motorY(AccelStepper::DRIVER, MOTOR_Y_STEP_PIN, MOTOR_Y_DIR_PIN);

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    motorX.setMaxSpeed(1000);
    motorX.setAcceleration(500);
    motorY.setMaxSpeed(1000);
    motorY.setAcceleration(500);
}

void loop() {
    if (Serial.available() > 0) {
        String input = Serial.readStringUntil('\n');
        char command = input.charAt(0);
        float value = input.substring(1).toFloat();
        if (command == 'X') {
            motorX.moveTo(value);
        } else if (command == 'Y') {
            motorY.moveTo(value);
        }
    }
    motorX.run();
    motorY.run();
}

Python Script
import serial
import time
import math

# Встановлення параметрів послідовного порту
ser = serial.Serial('COM3', 9600) # Треба змінити 'COM3' на відповідний порт

def move_to(position(Tx, Ty):
    # Визначення кутів для двигунів через зворотну кінематику
    theta1 = inverse_kinematics_theta1(Tx, Ty)
    theta4 = inverse_kinematics_theta4(Tx, Ty)

    # Конвертація кутів у кроки (припускаємо 1 крок = 1 градус)
    steps_motor_x = theta1 * 200 / (2 * math.pi)
    steps_motor_y = theta4 * 200 / (2 * math.pi)

    # Відправка команд на Arduino
    ser.write(f'X{steps_motor_x}\n')
    ser.write(f'Y{steps_motor_y}\n')
    time.sleep(2) # Затримка для виконання руху

```

```

def inverse_kinematics_theta1(Tx, Ty):
    # Тут розміщуємо формули для зворотної кінематики
    # Повертає значення theta1
    pass # замість pass вставити код формули

def inverse_kinematics_theta4(Tx, Ty):
    # Тут розміщуємо формули для зворотної кінематики
    # Повертає значення theta4
    pass # замість pass вставити код формули

def theta1_to_steps(theta1):
    # Конвертація кутів в кроки для лівого двигуна
    steps = theta1 # Варіант конвертації: 1 до 1
    return steps

def theta4_to_steps(theta4):
    # Конвертація кутів в кроки для правого двигуна
    steps = theta4 # Варіант конвертації: 1 до 1
    return steps

# Приклад виклику функції для руху до заданої точки (Tx, Ty)
move_to_position(100, 150)

```

```

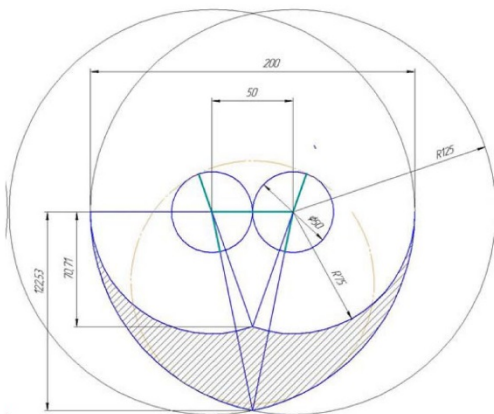
# Основна функція для керування роботом
def move_to(Tx, Ty):
    # Визначення кутів для двигунів через зворотну кінематику
    theta1 = inverse_kinematics_theta1(Tx, Ty)
    theta4 = inverse_kinematics_theta4(Tx, Ty)

    # Конвертація кутів у кроки (припускаємо 1 крок = 1 градус)
    steps_motor_x = theta1 * 200 / (2 * math.pi)
    steps_motor_y = theta4 * 200 / (2 * math.pi)

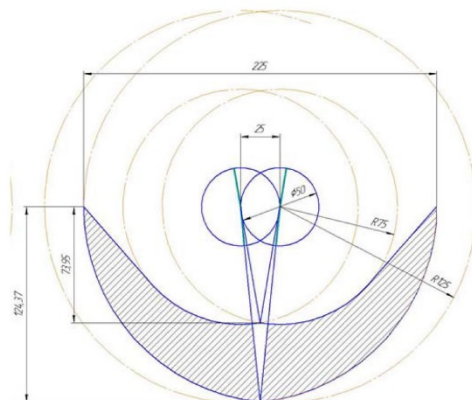
    # Відправка команд на Arduino
    ser.write(f'X{steps_motor_x}\n')
    ser.write(f'Y{steps_motor_y}\n')
    time.sleep(2) # Затримка для виконання руху

```

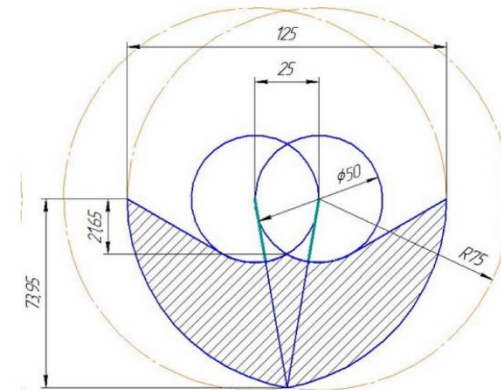
№	Дата	Відомості	Відомості	Відомості	Відомості
11					
Програми керування					
паралельним 2D робитом					
БР.ПМ-66.00 005					
ПМ-20-1					
ЮрТУч					
ПМ-20-1					



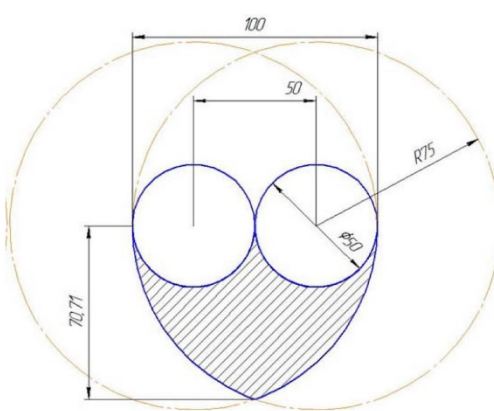
Робоча зона робота 1-1-4-4-2



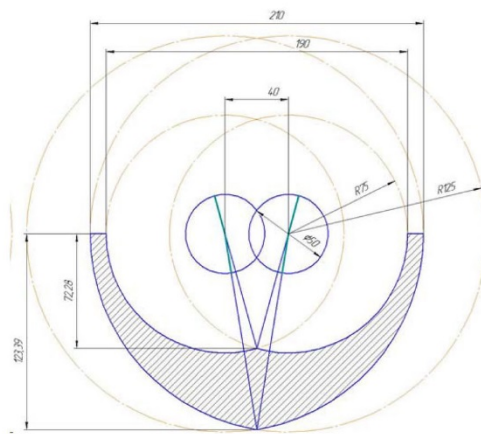
Робоча зона робота 1-1-4-4-1



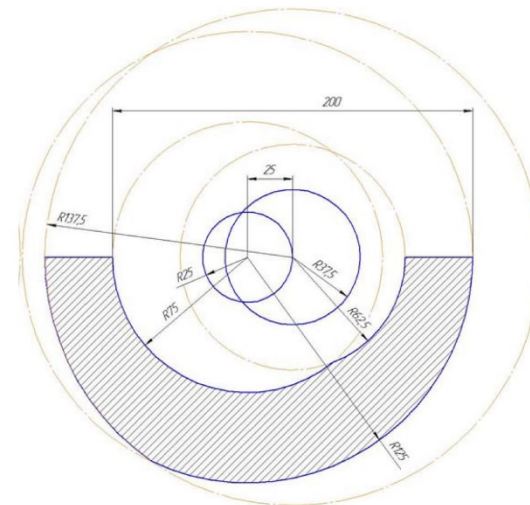
Робоча зона робота 1-1-2-2-1



Робоча зона робота 1-1-2-2-2

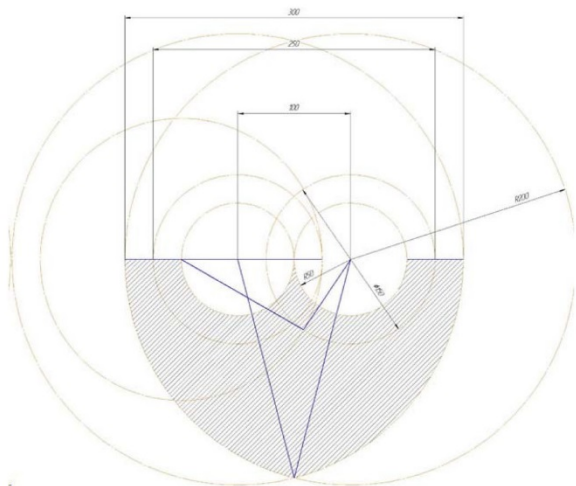


Робоча зона робота 1-1-4-4-1.6

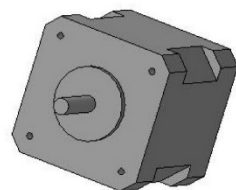


Робоча зона робота 1-1,5-4-4-1

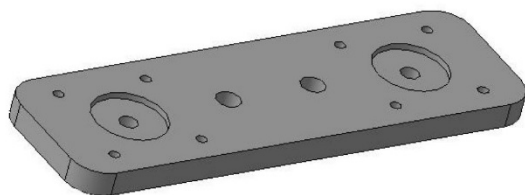
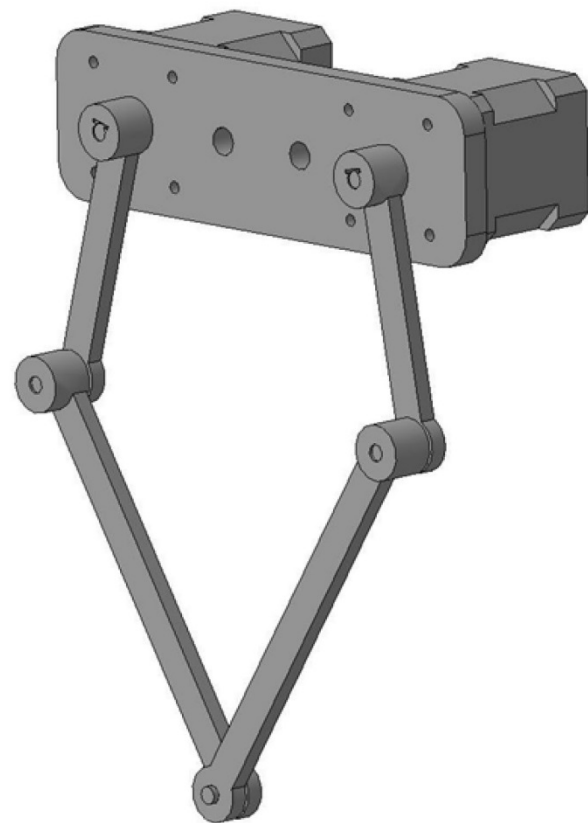
БР.ПМ-66.00 002				Лист		Кількість	
Дослідження робочої зони паралельного 2D робота				11			
Ім'я	П.І.М.	Місце	Дата	Лист	Кількість		
Виконав	Спеціаліст	Проєктувальник	Проєктувальник	1	1		
Перевірив	Спеціаліст	Проєктувальник	Проєктувальник				
Узгодив	Спеціаліст	Проєктувальник	Проєктувальник				
Місце	Місце						



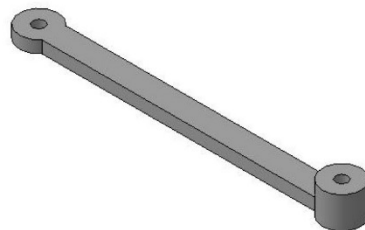
Робоча зона робота 1-1-5/3-5/3-4/3



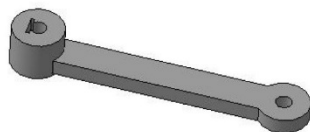
Кроковий двигун



Кріпильна плита

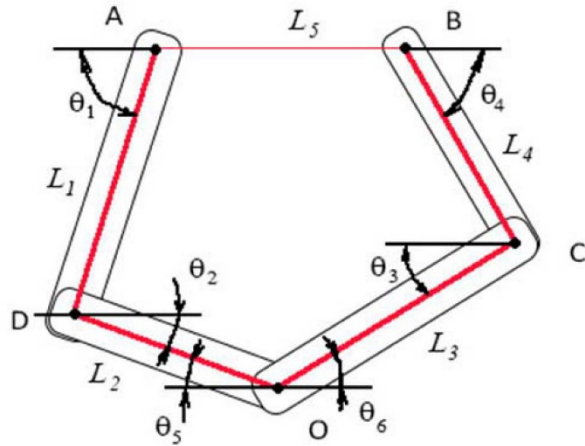


Ведена ланка



Ведуча ланка

БР.ПМ-66.00 003				Контрукція та деталі паралельного 20 робота		Лист 11	
Ім'я	П.П.П.	Місце	Місце	Лист	Кількість	1	11
Виробник	Специфікація	Вид	Специфікація	Лист	Кількість	1	11
І.І.І.	Специфікація	Вид	Специфікація	Лист	Кількість	1	11
І.І.І.	Специфікація	Вид	Специфікація	Лист	Кількість	1	11
І.І.І.	Специфікація	Вид	Специфікація	Лист	Кількість	1	11
І.І.І.	Специфікація	Вид	Специфікація	Лист	Кількість	1	11



Пряма кінематика

$$T_x = -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2$$

$$T_y = -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2$$

$$\begin{cases} -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 - L_5 - L_4 \cos \theta_4 + L_3 \cos \theta_3 = 0 \\ -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 + L_4 \sin \theta_4 = 0 \end{cases}$$

$$A = -L_1 \cos \theta_1 - L_5 - L_4 \cos \theta_4$$

$$B = -L_1 \sin \theta_1 + L_4 \sin \theta_4$$

$$\begin{cases} A + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 = 0 \\ B - L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 = 0 \end{cases}$$

$$C = \frac{L_2^2 - A^2 - B^2 - L_3^2}{2L_3}$$

$$\theta_3 = 2\pi k + 2 \arctg \left(\frac{B}{C+A} \pm \frac{\sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{C+A} \right)$$

$$\theta_2 = \arcsin \left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2} \right)$$

$$T_x = -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 = -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \left(\arcsin \left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2} \right) \right)$$

$$T_y = -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin \theta_2 = -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \left(\frac{B + L_3 \sin \theta_3}{L_2} \right)$$

Зворотна кінематика

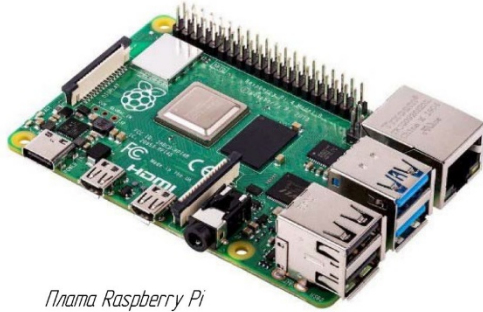
$$\theta_1 = 2\pi n - 2 \arctg \left(\frac{2L_1 T_y}{T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2} \pm \right.$$

$$\left. \sqrt{\frac{4L_1^2 T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2)^2} - \frac{T_x^2 + T_y^2 - 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2}{T_x^2 + T_y^2 + 2L_1 T_x + L_1^2 - L_2^2}} \right)$$

$$\theta_4 = 2\pi n - 2 \arctg \left(-\frac{2L_4 T_y}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4 L_5 + 2L_4 T_x - 2L_5 T_x} \pm \right.$$

$$\left. \sqrt{\frac{4L_4^2 T_y^2}{(T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4 L_5 + 2L_4 T_x - 2L_5 T_x)^2} - \frac{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 + 2L_5 L_4 - 2L_4 T_x - 2L_5 T_x}{T_x^2 + T_y^2 + L_5^2 + L_4^2 - L_3^2 - 2L_4 L_5 + 2L_4 T_x - 2L_5 T_x}} \right)$$

БР.ПМ-66.00.004				11	
Пряма та зворотна задачі				1	
Курс				1	
Семестр				1	
І семестр				1	
ІІ семестр				1	
ІІІ семестр				1	
ІV семестр				1	
V семестр				1	
VI семестр				1	
VII семестр				1	
VIII семестр				1	
IX семестр				1	
X семестр				1	
XI семестр				1	
XII семестр				1	



Плата Raspberry Pi

```
import math
import RPi.GPIO as GPIO
from time import sleep

# Налаштування GPIO для керування кроковими двигунами
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)
# Пини для керування кроковими двигунами
STEP_PIN_1 = 17
DIR_PIN_1 = 27
STEP_PIN_2 = 22
DIR_PIN_2 = 23

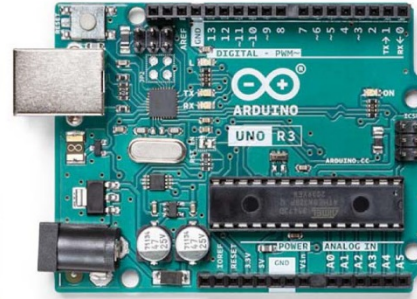
GPIO.setup(STEP_PIN_1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(DIR_PIN_1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(STEP_PIN_2, GPIO.OUT)
GPIO.setup(DIR_PIN_2, GPIO.OUT)
# Функції для керування кроковими двигунами
def step_motor(step_pin, dir_pin, steps, direction):
    GPIO.output(dir_pin, direction)
    for i in range(steps):
        GPIO.output(step_pin, GPIO.HIGH)
        sleep(0.01) # Налаштування швидкості кроків
        GPIO.output(step_pin, GPIO.LOW)
        sleep(0.01)

# Функція для обчислення прямих кінематичних залежностей L2=L3 L1=L4
def forward_kinematics(theta1, theta4):
    L1 = 75 # Задаєм значення для L1
    L2 = 125 # Задаєм значення для L2
    L5 = 100 # Задаєм значення для L5
    # Залежності для Tx, Ty
    .....
    return Tx, Ty

# Функція для обчислення зворотних кінематичних залежностей
def inverse_kinematics(Tx, Ty):
    # Залежності для u1, u4
    theta1 = ...
    theta4 = ...
    return theta1, theta4

# Основна функція для керування роботом
def move_to(Tx, Ty):
    theta1, theta2 = inverse_kinematics(Tx, Ty)
    steps1 = int(theta1 * 200 / (2 * math.pi)) # Перетворення кутів у кроки
    steps2 = int(theta2 * 200 / (2 * math.pi))
    direction1 = GPIO.HIGH if steps1 > 0 else GPIO.LOW
    direction2 = GPIO.HIGH if steps2 > 0 else GPIO.LOW
    step_motor(STEP_PIN_1, DIR_PIN_1, abs(steps1), direction1)
    step_motor(STEP_PIN_2, DIR_PIN_2, abs(steps2), direction2)

# Приклад виклику функції для переміщення у точку (Tx, Ty)
move_to(1.0, 1.0)
# Очищення GPIO
GPIO.cleanup()
```



Плата Arduino

```
// Arduino Sketch
#include <AccelStepper.h>

#define MOTOR_X_STEP_PIN 2
#define MOTOR_X_DIR_PIN 5
#define MOTOR_Y_STEP_PIN 3
#define MOTOR_Y_DIR_PIN 6

AccelStepper motorX(AccelStepper::DRIVER, MOTOR_X_STEP_PIN, MOTOR_X_DIR_PIN);
AccelStepper motorY(AccelStepper::DRIVER, MOTOR_Y_STEP_PIN, MOTOR_Y_DIR_PIN);

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    motorX.setMaxSpeed(1000);
    motorX.setAcceleration(500);
    motorY.setMaxSpeed(1000);
    motorY.setAcceleration(500);
}

void loop() {
    if (Serial.available() > 0) {
        String input = Serial.readStringUntil("\n");
        char command = input.charAt(0);
        float value = input.substring(1).toFloat();
        if (command == 'X') {
            motorX.moveTo(value);
        } else if (command == 'Y') {
            motorY.moveTo(value);
        }
        motorX.run();
        motorY.run();
    }
}

Python Script
import serial
import time
import math

# Встановлення параметрів послідовного порту
ser = serial.Serial('COM3', 9600) # Треба змінити 'COM3' на відповідний порт

def move_to_position(Tx, Ty):
    # Визначення кутів для двигунів через зворотну кінематику
    theta1 = inverse_kinematics_theta1(Tx, Ty)
    theta4 = inverse_kinematics_theta4(Tx, Ty)

    # Конвертація кутів у кроки (припускаємо 1 крок = 1 градус)
    steps_motor_x = theta1_to_steps(theta1)
    steps_motor_y = theta4_to_steps(theta4)

    # Відправка команд на Arduino
    ser.write(f'X{steps_motor_x}\n'.encode())
    ser.write(f'Y{steps_motor_y}\n'.encode())
    time.sleep(2) # Затримка для виконання руху
```

```
def inverse_kinematics_theta1(Tx, Ty):
    # Тут розміщуємо формули для зворотної кінематики
    # Повертає значення theta1
    pass # замість pass вставити код формули

def inverse_kinematics_theta4(Tx, Ty):
    # Тут розміщуємо формули для зворотної кінематики
    # Повертає значення theta4
    pass # замість pass вставити код формули

def theta1_to_steps(theta1):
    # Конвертація кутів в кроки для лівого двигуна
    steps = theta1 # Варіант конвертації 1 до 1
    return steps

def theta4_to_steps(theta4):
    # Конвертація кутів в кроки для правого двигуна
    steps = theta4 # Варіант конвертації 1 до 1
    # Для конвертації кутів в кроки двигунів потрібно знати співвідношення між
    # кутами обертання і кроками двигуна. Це можна зробити за допомогою
    # коефіцієнта, який залежить від двигуна та передавального механізму
    return steps

# Приклад виклику функції для руху до заданої точки (Tx, Ty)
move_to_position(100, 150)
```

БР.ПМІ-66.00.005				Програми керування паралельним 2D роботом	
Ім'я	Пілотаж	Місце	Дата	Ім'я	Місце
Ім'я	Пілотаж	Місце	Дата	Ім'я	Місце
Ім'я	Пілотаж	Місце	Дата	Ім'я	Місце
Ім'я	Пілотаж	Місце	Дата	Ім'я	Місце
Ім'я	Пілотаж	Місце	Дата	Ім'я	Місце
Ім'я	Пілотаж	Місце	Дата	Ім'я	Місце
Ім'я	Пілотаж	Місце	Дата	Ім'я	Місце
Ім'я	Пілотаж	Місце	Дата	Ім'я	Місце
Ім'я	Пілотаж	Місце	Дата	Ім'я	Місце

Висновки

Бакалаврська робота складається із пояснювальної записки, графічної частини та виконана згідно із завданням. Було спроектовано конструкцію двокоординатного паралельного робота. Також був проведений огляд сучасних розробок паралельних роботів, їх переваги та області застосування.

В конструкторській частині проведено аналіз впливу геометричних параметрів ланок двокоординатного робота на форму та розміри його робочої зони. Для вибраних співвідношень геометричних параметрів ланок робота розроблено конструкції ланок, створено їх креслення. В середовищі графічного 3D редактора створено тривимірні моделі деталей робота. На основі 3D моделей створено тривимірну збірку двокоординатного паралельного робота.

В технологічній частині проведено аналіз прямої та зворотної кінематик двокоординатного паралельного робота, отримано математичні залежності координат ефектора від кутів повороту ведучих ланок на валах крокових двигунів робота для задачі прямої кінематики та залежності кутів повороту ланок на валах крокових двигунів для забезпечення заданих координат ефектора для задачі зворотної кінематики. Також розроблено шаблони програм для керування роботом через плати RaspberryPi та Arduino.

Графічна частина оформлена на 5 аркушах ф.А1

Результати роботи можуть бути використані в навчальному процесі та в машинобудівній галузі.