

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА
« ____ » _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

**«Дослідження маніпулятора на основі
паралельних кінематичних структур зі
збільшеним поворотом руки»**

Виконав здобувач вищої освіти II-го
курсу групи ГМ-22М-З,
ОПП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133
«Машинобудування, мехатроніка і
робототехніка»

_____ Андрій КОТЛЯР

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

Рецензент:

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-наукова програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ММіР

_____ Андрій ГРЕЧКА

«____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Андрія КОТЛЯРА

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки
2. Керівник роботи: к.т.н., доцент Андрій ГРЕЧКА
3. Строк подання роботи до захисту 10 червня 2024 р.
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи

Мета роботи: дослідження маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки для забезпечення функціонування вихідного органу у заданому робочому просторі при мінімальних габаритах механізму.

Завдання:

- огляд існуючих типів промислових роботів;
- аналіз тенденцій розвитку промислових роботів;
- вибір прототипів для пропонованої конструкції маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур;
- розробка схеми конструкції маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур;
- визначення конструктивних залежностей маніпулятора для мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.
- розрахунок економічної ефективності від впровадження результатів роботи.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Дослідно- конструкторський	Андрій ГРЕЧКА		
Організаційно- економічний	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Патентний огляд.	12.03	вик.
2.	Огляд літературних джерел.	27.03	вик.
3.	Розробка схеми механізму і опис конструкції.	07.04	вик.
4.	Розробка схеми до синтезу приводу лінійних переміщень.	12.04	вик.
5.	Визначення конструктивних залежностей приводу лінійних переміщень.	19.04	вик.
6.	Розробка схеми до синтезу приводу кутових переміщень.	24.04	вик.
7.	Визначення конструктивних залежностей приводу кутових переміщень.	30.04	вик.
8.	Дослідження конструктивних залежностей.	09.05	вик.
9.	Розрахунок економічної ефективності.	19.05	вик.
10.	Оформлення пояснювальної записки.	29.05	вик.
11.	Оформлення презентації роботи	01.06	
12.	Здача роботи на кафедру та перевірка на антиплагіат.	10.06	вик.

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 20__ р.

Керівник роботи

_____ Андрій ГРЕЧКА
(підпис)

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 20__ р.

Здобувач вищої освіти

_____ Андрій КОТЛЯР
(підпис)

Анотація

Андрій КОТЛЯР. Визначення конструктивних залежностей маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки. Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2024. – 66 с. Матеріали презентації 10 іл.

Запропоновано нову конструкцію маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки. Розроблено розрахункові схеми та отримано конструктивні залежності окремо для кутових переміщень. Проведено дослідження конструктивних параметрів маніпулятора. Результати дослідження представлено у вигляді графіків.

Актуальність: новий прогресивний маніпулятор на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки, що відповідає двом основним тенденціям розвитку робототехніки: застосування замкнених кінематичних ланцюгів та розміщення двигунів приводів на базисному елементі конструкції.

Наукова новизна: встановлено конструктивні залежності маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки для мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у заданому робочому просторі.

Практичне значення: запропоновано нову конструкцію маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур, вивчено конструктивні залежності при забезпеченні заданої рухомості у обумовленому робочому просторі.

Ключові слова: маніпулятор, паралельні кінематичні структури, збільшений поворот руки.

Summary

Andrii KOTLIAR. Study of a manipulator based on parallel kinematic structures with increased arm rotation. Qualification work at the second (master's) level of higher education: CUNTU, 2024.– 66 p. Presentation materials 10 il.

It is proposed a new manipulator design based on parallel kinematic structures with increased hand rotation. Calculation schemes were developed and structural dependencies were obtained separately for angular movements. It was carried out a study of the design parameters of the manipulator. The results of calculations are presented in the form of graphs.

Keywords: manipulator, parallel kinematic structures, minimization of overall dimensions.

ЗМІСТ

	сторінка
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ І ОГЛЯД ПРОТОТИПІВ	
1.1 Класифікація промислових робіт	10
1.2 Огляд прототипів на основі паралельних кінематичних структур	15
1.3 Поняття Overdriving та його використання в паралельних структурах	27
РОЗДІЛ 2 ЗАДАЧА СИНТЕЗУ РОЗТАШУВАННЯ ПОВЗУНІВ ПРИВОДУ ПЕРЕМІЩЕННЯ РУХОМОЇ ПЛАТФОРМИ МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ	
2.1 Опис пропонованої конструкції робота	30
2.2 Розрахунок довжини штанги приводу переміщення рухомої платформи	33
2.3 Зворотна задача приводу повороту кисті руки	43
2.4 Дослідження приводу повороту кисті руки	45
РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	
3.1 Загальні вихідні дані	50
3.2 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості операції сорткування)	52
3.3 Розрахунок показників економічної ефективності маніпулятора	58
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

ВСТУП

Актуальність роботи. Промислова робототехніка як складова галузевого машинобудування є областю, яка потужно розвивається на протязі вже досить тривалого часу. Активне впровадження роботів у багатьох сферах промисловості сприяло виникненню великої різноманітності їх конструкцій. Зрозуміло, що значна номенклатура виробів повинна забезпечити потреби споживачів, які часто мають протилежні вимоги. Поряд з тим наявний досвід у конструюванні, виробництві і експлуатації промислових роботів дозволяє встановити основні тенденції розвитку даної сфери промисловості. Можна зазначити, що вони є півнобіжні тенденціям розвитку більш глобальної області виробництва та експлуатації технологічного обладнання широкого спектру застосування. Зокрема, покращення динамічних характеристик напряму позначається на зростанні продуктивності роботи маніпуляторів, а подекуди призводить і до збільшення точності виконуваних операцій. Підвищення енергоефективності, окрім однозначних вигод у вигляді економії енергоресурсів, опосередковано також позначається на покращенні динамічних якостей обладнання.

Практика останніх років показує, що одним із шляхів забезпечення зазначених тенденцій розвитку робототехніки є використання маніпуляторів з замкненими кінематичними ланцюгами та розміщення двигунів приводів на елементах базису робота. Зазначеним вимогам повною мірою задовольняє технологічне обладнання, побудоване на основі паралельних кінематичних структур. Широке впровадження даного принципу і для технологічного обладнання, призначеного для здійснення транспортно-логістичних операцій технологічного процесу, відкриває перспективи застосування модульного підходу до виробництва і експлуатації технологічного обладнання. Тому подальший розвиток такого типу обладнання з гнучкими можливостями функціонування, розробка його нових конструкцій та вивчення

конструктивних залежностей є актуальним науково-технічним завданням, що становить науковий інтерес та практичну цінність.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є дослідження маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки для забезпечення функціонування вихідного органу у заданому робочому просторі при мінімальних габаритах механізму. Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- огляд існуючих типів промислових роботів;
- аналіз тенденцій розвитку промислових роботів;
- вибір прототипів для пропонованої конструкції маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур;
- розробка схеми конструкції маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур;
- визначення конструктивних залежностей маніпулятора для мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.

Додатково до поставленої мети розраховано економічну ефективність від впровадження робота пропонованої конструкції.

Об'єкт дослідження – маніпулятор на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки.

Предмет дослідження – залежності конструктивних параметрів маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки.

Практичне значення – запропоновано нову конструкцію маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки

та вивчено його конструктивні залежності для мінімізації габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у заданому робочому просторі.

Наукова новизна - встановлено конструктивні залежності маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки для мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у заданому робочому просторі

Особистий внесок – розроблено схему та визначено конструктивні залежності маніпулятора на основі паралельних кінематичних структур зі збільшеним поворотом руки для мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у заданому робочому просторі.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ І ОГЛЯД ПРОТОТИПІВ

1.1 Класифікація промислових роботів

Дельта-робот є паралельним роботом, що означає наявність більше одного кінематичного ланцюга від основи до виконавчого пристрою робота. Робота можна розглядати як просторове узагальнення пантографа.



Рис. 1.1 Пантограф

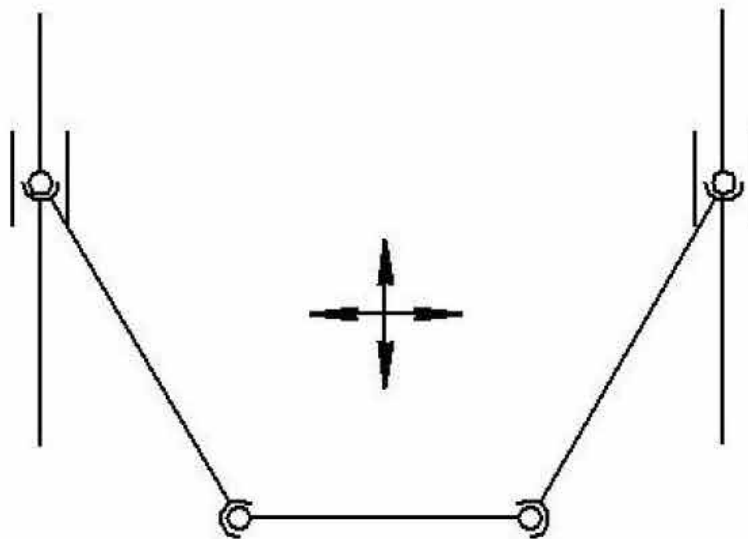
Основна ідея – це використання паралелограма (рис. 1.1). Ці паралелограми обмежують рух кінцевої платформи для точного відпрацювання переміщення (переміщення тільки по осях X , Y і Z). Заснування робота монтується над робочою зоною. Усі силові приводи змонтовані на цій підставі. З цієї основи виходять три важелі з шарнірами посередині. Важелі виготовлені з легких композитних матеріалів. Кінці важелів прикріплені до невеликої трикутної основи. Приведення в рух вхідних зв'язків переміщує трикутну платформу в напрямку X , Y або Z . Привід може

бути здійснений лінійним двигуном або обертовим. Четвертий важіль, з центру основи до центру трикутної платформи, дає їй четвертий - обертальний, ступінь свободи. У зв'язку з тим, що привід знаходиться в основі робота, а важелі зроблені з легких композитних матеріалів, частини дельта-робота, що рухаються, мають дуже малу інерцію. Це дозволяє досягти значних прискорень до 30 g і швидкостей до 10 м/с.

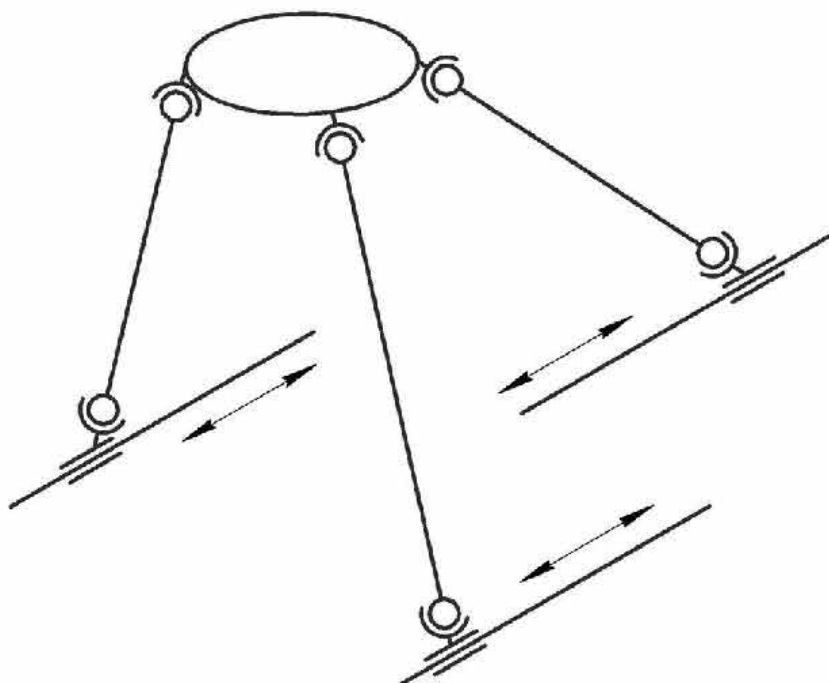
[1] Підвищення ефективності механічного обладнання потребує пошуку шляхів і методів вдосконалення механізмів. Одним із перспективних напрямків розвитку машинобудування є розробка механізмів нетрадиційної компоновки з використанням елементів паралельної кінематики. Всі кінематичні ланки працюють одночасно, що виконавчій ланці рухатись в просторі та забезпечувати необхідний закон руху. Розроблено багато різноманітних схем машин які базуються на застосуванні механізмів паралельної структури. Розроблено і виготовлено значну кількість ефективних механізмів з використанням паралельних кінематичних зв'язків з штангами постійної довжини, наприклад «біглайди», «триглайди», «гексаглайди», «лінаподи» та штангами змінної довжини, наприклад «триподи» «гексаподи» (рис. 1.2).

[2] Для прикладу розглянемо шестикоординатний просторовий механізм паралельної структури типу «гексапод» на основі платформи Гауфа-Стюарта, у якому робочий орган – рухома платформа 1 з'єднується з основою 4 шістьма ланками змінної довжини 3 за допомогою сферичних опор 2 та карданних парнірів 5. З основою зв'язана система координат $Oxyz$, з робочим органом – $O_1x_1y_1z_1$. Для опису орієнтації рухомої платформи використаємо повороти навколо кожної із трьох координатних осей, що характеризуються кутами Крилова. На відміну від кутів Ейлера, кути Крилова симетричні, і малому відхиленню від початкового положення завжди відповідають малі значення кутів. Нехай система координат $OXYZ$, жорстко зв'язана з робочим органом, у початковому положенні співпадає своїми осями з осями нерухомої системи $Oxyz$. Тоді кути Крилова визначаються наступним чином: кут ψ – кут між

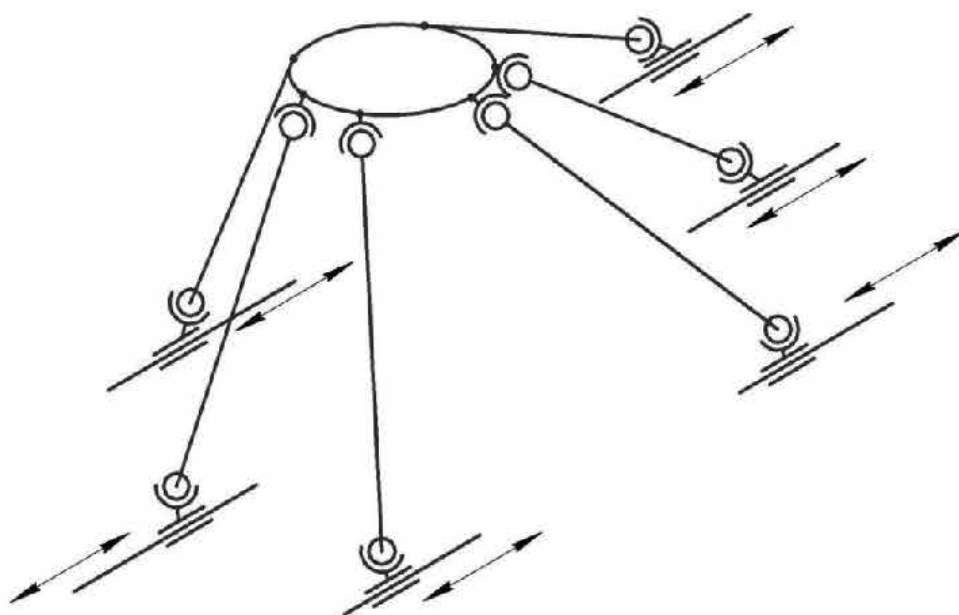
віссю Ox та лінією OK перетину координатних площин Oxz та OXY ; кут φ – кут між лінією OK та віссю Ox ; кут ϑ – кут між віссю Oz та лінією OM перетину площин Oxz та OZy .



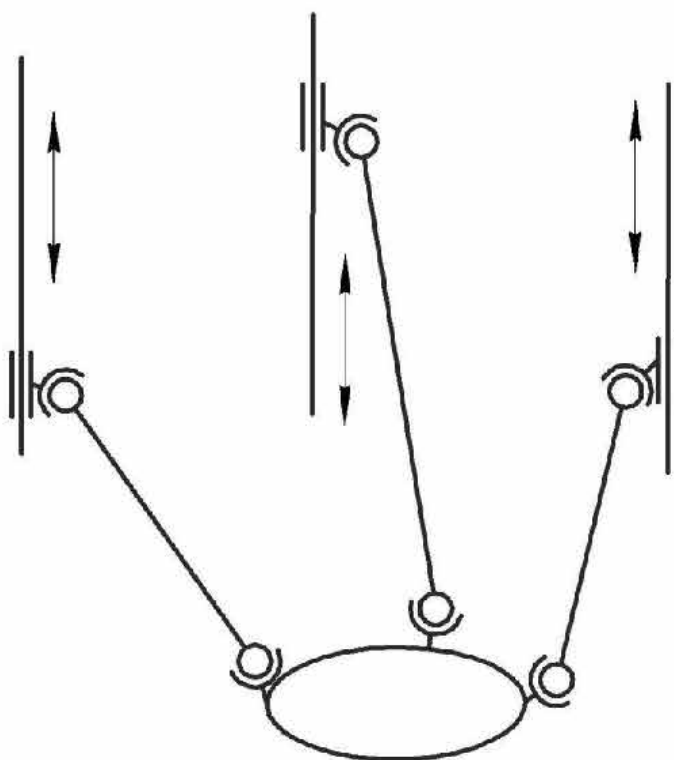
Біглайд



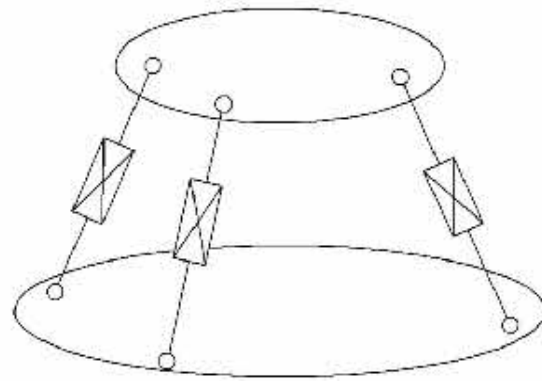
Триглайд



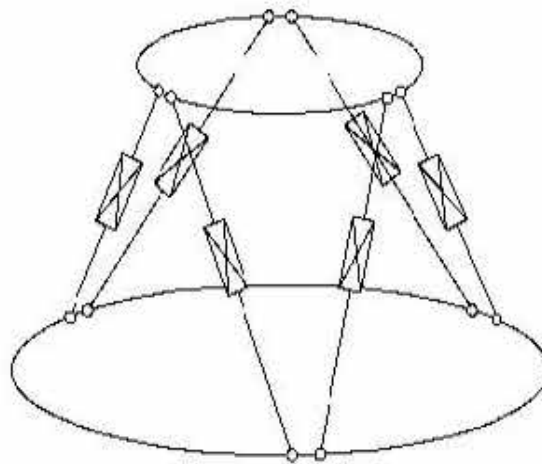
Гексаглайд



Лінапод



Трипод



Гексапод

Рис. 1.2 Класифікація механізмів з паралельною кінематикою

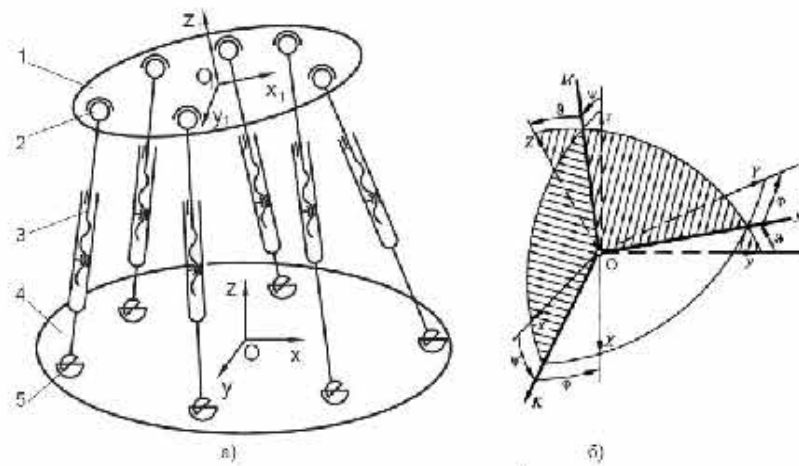


Рис. 1.3 Шестикординатний механізм паралельної структури з ланками змінної довжини

1.2 Огляд прототипів на основі паралельних кінематичних структур

[3] Сучасні верстатні комплекси можна розглядати як сукупність систем верстата (або верстатів), засобів керування та технологічного забезпечення. Кожна з них відповідає своєму функціональному призначенню, має свою структуру. Структура цих систем може бути подана у вигляді відповідної класифікації за відомими ознаками. Система верстата розглядається за ознаками «технологічне призначення та клас точності», «ступінь автоматизації» та «ступінь спеціалізації». В класифікації пропонується розширення змістовних ознак ступеня автоматизації за рахунок додаткового поняття «мехатронні». Детальний розгляд цих ознак відомий, тому їх складові наведені блоками. Що стосується ознаки «ступінь спеціалізації», то її складову - «широкого призначення» пропонується розглядати більш детально за складовими «агрегатні верстати – оброблювальні центри - багатокоординатні верстати». Це, в першу чергу, викликано тим, що складова відповідає напрямку досліджень – розширенню функціональних можливостей верстатних комплексів, а багатокоординатні верстати є найбільш сучасним обладнанням.

В складову ознаку «багатокоординатні» верстати запропоновано ввести верстати «з паралельною кінематикою» поряд з «фрезерними» та «токарно-фрезерними», або інтегрованими. Верстати з паралельною кінематикою доцільно розглядати за конструктивними ознаками, до яких віднесені типи несучих ланок у вигляді важільних механізмів «штанг», «V-подібних механізмів (ножиць)» і просторових механізмів «з чотиригранними рамами (тетраформів)». Важільні механізми типу штанг поділяються за ознаками їх довжини (постійної та змінної довжини).

За допомогою штанг постійної довжини утворюються верстати з вертикальними рухомими (Linapod) та нерухомими (Eclipse) напрямними та горизонтальними напрямними типу глайд (біглайди, триглайди, гексаглайди).

Верстати паралельної кінематики зі штангами змінної довжини підрозділяються за числом штанг (біглайди, триподи, пентаподи, октаподи).

Функціонування багатокоординатних верстатів підтримує система технологічного забезпечення, що в класифікації відображено підсистемами технологічної підготовки, конструкторської підготовки, інструментального забезпечення, видалення відходів, контролю точності, заміни, транспортування, резервної підсистеми, що формується на вимогу виробника. Серед верстатів широкого призначення відмічено застосування саме цих систем технологічної підготовки. Найбільше прикладів застосування припадає на багатокоординатні верстати, за допомогою яких розширюються функціональні можливості верстатних комплексів. Невід'ємною складовою верстатних комплексів є системи керування. На сучасних верстатах використовують програмовані системи керування (NC, SNC, CNC, DNC, HNC).

За ступенем автоматизації ці верстати фактично є «мехатронними системами». В сучасних процесах механічної обробки використовуються верстати широкого призначення, які після розширення, на початку 70-х років XX століття, функціональних можливостей верстатів з ЧПК, набули вигляду сучасних верстатних комплексів.

Слід зазначити, що найширше застосовуються верстатні комплекси на основі п'яти координатних верстатів, свердлильно-фрезерно-розточувальних для обробки будь-яких поверхонь, комбінації яких дозволяють утворювати складні за конфігурацією і обробкою корпусні деталі.

Підвищення ефективності механічного обладнання потребує пошуку шляхів і методів вдосконалення механізмів. Одним із перспективних напрямків розвитку машинобудування є розробка механізмів нетрадиційної компоновки із паралельними кінематичними зв'язками. Для розширення функціональних можливостей верстатних комплексів в останні роки застосовують верстати з паралельною кінематикою, наприклад, триподи, гексаподи, гексаглайди.

Удосконалені сучасні верстатні комплекси із традиційною та паралельною кінематикою широко застосовуються в авіакосмічній, автомобільній, кораблебудівній та інших машинобудівних галузях промисловості.

[4] Сучасний стан промисловості та економіки України в значній мірі вимагає прискореного розвитку й переобладнання виробничих систем машинобудівних виробництв, які є базою і джерелом розвитку всіх галузей, за рахунок впровадження прогресивних технологій, високопродуктивного механообробного обладнання, технологічних комплексів, виробничих модулів і систем керування. Як показує світовий досвід, основною тенденцією розвитку машинобудівних виробництв є створення й впровадження верстатних комплексів у вигляді гнучких виробничих модулів з автоматизованою системою керування та гнучких виробничих осередків.

Запропонована класифікація цих сучасних верстатних комплексів з якісно новим рівнем технічного оснащення та організації виробничих процесів, які визначаються використанням не тільки високоавтоматизованого основного технологічного обладнання, але і таких складових, як автоматизовані транспортно-накопичувальні підсистеми, контрольно-вимірювальна і діагностична апаратура, засобів обчислювальної техніки, що безпосередньо беруть участь у виробничому процесі і забезпечують автоматизацію функцій технологічного, організаційно-технічного та організаційно-економічного керування процесами виготовлення продукції, створені гнучкі виробничі системи. Сучасний верстатний комплекс, введений у ці системи, - це переналагоджувальна на задану номенклатуру виробів одиниця основного технологічного обладнання, оснащена пристроями програмного керування, заміни інструменту, виробів (автооператором або роботом), накопичувачами початкового матеріалу та напівфабрикатів, пристроями видалення відходів, контролю та підналагодження технологічного процесу, а також корекції якості виробу. Він може працювати в

автоматизованому режимі і бути вмонтованим в систему більш високого рангу.

Ефективність використання верстатних комплексів значною мірою визначається функціональним призначенням системи керування обладнанням, яка приймається як базова для основного технологічного обладнання. Слід зазначити, що область раціонального використання верстатних комплексів розповсюджується як на одиничне виробництво, так і на масове, що є результатом розширення функціональних можливостей сучасних верстатних комплексів. Однак одні й ті самі верстатні комплекси не можуть ефективно використовуватися в різних умовах виробництва, тому й технічні рішення для одиничного, серійного та масового виробництва відмінні. Але в будь-яких випадках зберігаються характерні особливості верстатних комплексів, а саме: гнучкість та використання систем керування.

До сьогоднішнього часу особлива увага приділялась питанням технічного забезпечення верстатних комплексів при їх розробці, але вже перший досвід експлуатації довів, що розкрити потенціальні можливості систем і забезпечити їх максимальну ефективність стає можливим, якщо технологічному проектуванню верстатних комплексів передують досконалі технологічна розробка. Основними напрямками роботи є дослідження високотехнологічного обладнання, розробка наукових основ теорії проектування обладнання, а також визначення його характеристик. В обладнанні використовуються системи приводів, високошвидкісні шпиндельні вузли, складні інтелектуальні системи керування. Теоретичне узагальнення роботи обладнання в комплексі є основним напрямком наукової діяльності. Розробка наукових проблем даного напрямку потребує нових підходів. По суті, необхідно створити глибокі теоретичні основи для опису характеристик складних механічних систем. Основним методом дослідження є математичне моделювання, що проводиться з застосуванням сучасних інформаційних технологій. За самою природою методу математичного моделювання необхідно узгоджувати моделі, які працюють у режимі

реального часу, із моделями, реалізованими в режимі віртуального часу. Це і є основною задачею роботи, де розглядається взаємодія різномасштабних процесів.

У машинобудуванні 80% об'єму продукції, що випускається, виробляється в умовах багатомасштабного дрібносерійного і серійного виробництва, яке характеризується великим числом і різноманітністю типів технологічного та допоміжного обладнання, розгалуженою і багато зв'язковою структурою систем локальної та глобальної системи автоматизованого керування, значним об'ємом і широкою номенклатурою продукції.

- Рівень автоматизації виробничих процесів визначається рядом чинників: станом розвитку техніки, технології та засобів виробництва;
- Кваліфікацією трудових ресурсів;
- Рівнем культури виробництва з урахуванням звільнення працюючих від монотонної й важкої праці;
- Ступенем дотримання вимог техніки безпеки та промислової санітарії;
- Ефективністю використання обладнання;
- Інтервалом тривалості підготовки виробництва при переході на виготовлення нових видів продукції тощо.

Важливими показниками функціональних можливостей верстатних комплексів є гнучкість, надійність і злагодженість роботи всіх складових елементів, що забезпечується автоматизованою системою керування. Поняття гнучкості розглядалося з позиції забезпечення гнучкості виробничого потенціалу, приділяючи основну увагу технічній та технологічній гнучкості, залишаючи слабо освітленою проблему розробки нової продукції. Структурна гнучкість виробничого потенціалу означає здатність його елементів змінювати свою внутрішню структуру і властивості компонентів, які входять до них, тобто можливість їх самовдосконалення без зміни його потенціалу загальної структури. Всі питання, пов'язані з розширенням функціональних

можливостей верстатних комплексів підрозділяють на групи: аналізу, розробки, пілот-проекту, проектування, моделювання, діагностування та контролю. Аналіз вищезазначених питань дозволяє розглядати системи на таких рівнях: концептуальному рівні створення методології прийняття рішення, розробки методики розв'язання окремих задач в рамках систем, розробки моделі та точного алгоритму розрахунку й розв'язання конкретної задачі проектування, узагальнення експериментальних і розрахункових параметрів.

На підставі дослідження діючих верстатних систем та аналізу різних літературних джерел і чинних стандартів сформульовані загальні вимоги до системи керування процесами механічної обробки, виконання яких забезпечує надійну роботу системи керування:

Технологічне обладнання повинно швидко переналагоджуватися практично за рівних витрат часу і засобів на випуск серійних, дрібносерійних і одиничних виробів;

Виробничий процес повинен протікати в умовах практично «безлюдної» технології і може бути неперервним протягом доби, що різко підвищує корисне завантаження технологічного обладнання;

Складні програми керування, розроблені для випуску нового виробу, практично без додаткових витрат ресурсів повинні тиражуватися та впроваджуватися на аналогічному технологічному обладнанні, що істотно спрощує процес підготовки виробництва.

Важливим напрямком підвищення продуктивності обробки є значне скорочення основного та допоміжного часу за рахунок інтенсифікації режимів реалізації процесів, що пов'язано зі значним підвищенням величини прискорень (обробка складних фасонних поверхонь фрезеруванням) і частою зміною напрямку руху виконавчого органу, реалізується з аналогічною кількістю гальмувань і прискорень, що вимагає значного поліпшення динамічних характеристик технологічного обладнання. Такі режими значно підвищують навантаження на рухомі елементи, тому їх маси необхідно

зменшувати до мінімально можливої величини. Але прагнення підвищення динамічних характеристик за рахунок виготовлення рухомих елементів з надлегких матеріалів цю проблему не вирішує. Необхідна кількість однофункціональних механізмів та систем технологічного обладнання зумовлює значну номенклатуру вузлів і деталей, які необхідно виготовити з високою точністю, а також витрати значного часу на технологічну підготовку та виробництво продукції.

Традиційне технологічне обладнання, в основному, створювалось для конкретного методу обробки або процесу (токарне, свердлувальне, фрезерне). Технологічні можливості верстатних комплексів визначаються кінематичною структурою, компонуванням, конструктивним виконанням, рівнем автоматизації та технічною характеристикою.

Технологічне обладнання з паралельною кінематикою має більш широкий спектр технологічних можливостей, ніж традиційні верстати внаслідок забезпечення виконавчому органу до шести ступенів свободи, що дозволяє йому здійснювати переміщення у просторі відносно всіх осей координатної системи та реалізувати майже всі схеми формоутворення поверхонь деталей з усіх сторін, крім базових, а також інші процеси виготовлення продукції за одне встановлення деталі.

Практична реалізація всіх схем формоутворення поверхонь деталей зумовлює основну властивість подібного обладнання - суміщення методів обробки та процесів з різним за фізичною природою технологічним впливом: абразивну, електрофізикохімічну обробки, пластичне деформування та зварювання, а також процеси складання машин, фарбування, випробування та вимірювання, що визначає значно більший рівень інтеграції операції у порівнянні з іншим технологічним обладнанням.

Механізми паралельної структури отримали широке поширення в роботах різного призначення. Найпопулярнішим поступально-напрямним механізмом паралельної структури є дельта-робот, причому застосування

знаходить як його оригінальна конструкція, розроблена Р. Клавелем у 80-х роках минулого століття, так і її модифікації.

У сучасній робототехніці дельта-робот використовують у різних галузях. Фірма Kawasaki випустила Y-серію роботів різною вантажопідйомності, найбільша тайванська компанія HIWIN також виробляє дельта-роботи. В оригінальному виконанні у дельта робота є три кінематичні ланцюги з обертальними приводами та проміжними паралелограмами, внаслідок чого вихідна ланка має три поступальні ступені свободи.

Ось кілька прикладів систем з використанням дельта-структур паралельної кінематики:

- ABB FlexPicker - це лінія промислових дельта-роботів від шведського виробника ABB. Вони використовуються для високошвидкісного пакування, сортування та інших завдань виробництва. ABB FlexPicker є лінією промислових дельта-роботів, розроблених і вироблених шведською компанією ABB. Ці роботи призначені для високошвидкісного використання у виробничих лініях, де важливі швидкість, точність та гнучкість в роботі з продуктами різних форм та розмірів.

Основні характеристики ABB FlexPicker включають:

Трипроменева конфігурація: FlexPicker використовує три паралельні промені, що дозволяють йому ефективно та швидко переміщати кінцевий ефектор в просторі (рис. 1.4).

Швидкість та точність: Ці роботи мають високу швидкість та точність, що робить їх ідеальними для завдань у виробництві, де потрібно швидко та точно обробляти продукцію.

Гнучкість в застосуванні: ABB FlexPicker може використовуватися для різноманітних завдань, включаючи пакування, сортування, вибіркове розміщення та інші операції у виробництві.

Легка налаштуваність: Системи керування та програмування FlexPicker розроблені з урахуванням легкості використання, що полегшує налаштування та програмування робота для конкретних завдань.

Застосування в харчовій та фармацевтичній промисловості: ABB FlexPicker використовується у виробництві харчових продуктів та фармацевтичних виробів завдяки їхній здатності до роботи з різними упаковками та матеріалами.

Ці роботи допомагають автоматизувати виробничі процеси, знижуючи час виробництва та забезпечуючи високу якість продукції.



Рис. 1.4 Система ABB FlexPicker з використанням дельта-структури паралельної кінематики

Японська компанія FANUC виробляє дельта-роботи, такі як модель M-1iA. Ці роботи використовуються для робіт з високою швидкістю та точністю, таких як збирання електронних компонентів (рис. 1.5).

Основні особливості і характеристики цього робота включають:

Паралельна кінематика: M-1iA використовує паралельну кінематику, що дозволяє йому виконувати швидкі та точні рухи.

Компактний дизайн: Робот має компактний дизайн, що робить його ефективним у вузьких просторах та обмежених умовах.

Висока швидкість та точність: M-liA призначений для використання в виробничих лініях, де важлива висока швидкість та точність роботи.

Застосування в сферах збирання та пакування: Цей робот часто використовується для завдань збирання, пакування та сортування у виробничих процесах.

Легкість програмування: M-liA оснащений інтерфейсами програмування, які роблять його досить легким у використанні та програмуванні для конкретних завдань.

Гнучкість в застосуванні: Завдяки своєму дизайну та функціональності, M-liA може використовуватися в різних галузях та виробничих сценаріях.



Рис. 1.5 Система M-liA з використанням дельта-структури паралельної кінематики

До прикладів таких нововведень варто віднести найменшого на сьогоднішній день представника цієї архітектури, розробленого дослідниками з Гарвардського університету. Робот «milliDelta» (рис. 1.6) має розміри всього $15 \times 15 \times 20$ мм і здатний переміщатися замкнутими траєкторіями з частотою 75 Гц., розвиваючи швидкість до 0,45 м/с з прискоренням до 215 м/с^2 . Сам робот важить всього 430 мг, але здатний переміщати об'єкти з масою 1,31 г. Таке відношення корисного навантаження до маси самого робота недосяжне для його старших побратимів і є наслідком тих технічних рішень, які використовувалися під час його конструювання. Найдокладніше, як сама конструкція, так і методика проведення експериментів описані в роботі. При побудові робота широко використовувалася технологія виробництва друкованих плат та MEMS технології, як приводи джерел руху були обрані п'єзoeлектричні приводи. У конструкції використані лише одні рухливі кінематичні пари, виконані у вигляді гнучких полімерів. Конструкцію продемонстровано на малюнку нижче.

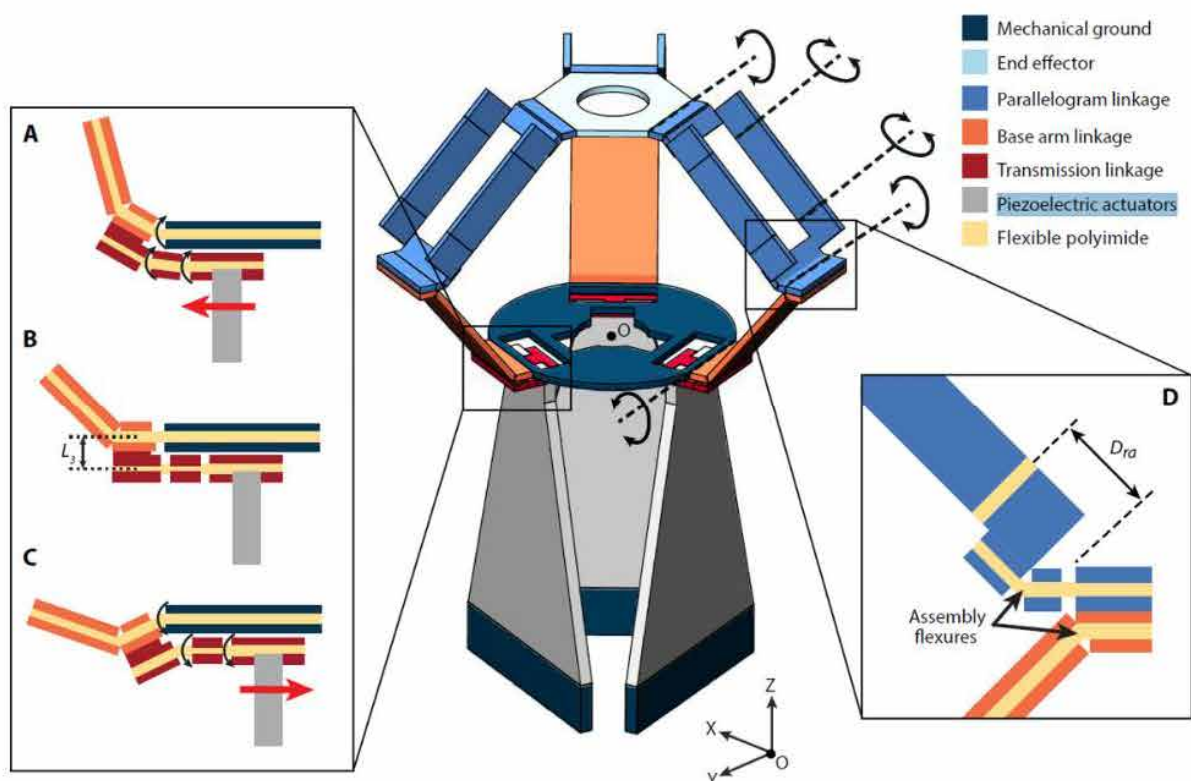


Рис. 1.6 Конструкція робота milliDelta з використанням дельта-структури паралельної кінематики

Точність і швидкість цього робота вдалося виміряти завдяки використанню двох високошвидкісних відеокамер, які знімають робота з різних ракурсів. Вдалося отримати точність близько 5 мкм в робочому просторі об'ємом близько 7 мм³. У дослідженні робиться висновок про перспективність використання цього робота в таких областях, як мікрохірургія, мікро складальні операції та просто в переміщенні об'єктів у міліметровому діапазоні.

1.3 Поняття Overdriving та його використання в паралельних структурах.

Overdriving (або "перегонка") в паралельних структурах відноситься до ситуації, коли паралельна кінематична система виводиться за межі своїх обмежень або дозволених параметрів руху. Це може статися внаслідок неправильного керування, програмування або введення команд, що призводить до надмірного виконання рухів.

В паралельних роботах, де використовуються паралельні механізми, перегонка може мати наступні наслідки:

Перевищення обмежень: Робот може рухатися або обертатися за межі фізичних обмежень своїх сегментів або зон руху.

Перевищення моментів: Завдяки зайвим навантаженням, що виникає внаслідок перегонки, може виникнути перевищення обмежень моментів на рухливих частинах робота.

Деформація або поломка: Якщо робот надто перевантажений або виходить за межі своєї конструкції, це може призвести до деформацій або поломок елементів механізму.

Існує значна кількість зарубіжних досліджень, що досліджують надлишкові механізми паралельних структур. Відомо, що наявність надлишковості спрощує розв'язання прямої задачі кінематики і дозволяє контролювати форму еліпсоїдів статичної та динамічної маніпульованості. Якщо розглядати надлишковий механізм паралельної структури як сукупність повністю паралельних механізмів, отриманих шляхом видалення надлишкових зв'язків, то всі такі механізми можуть перебувати у спеціальних положеннях. Таким чином, надлишковість дозволяє ефективно уникнути спеціальних положень у робочому просторі паралельних маніпуляторів.

Прості плоскі надлишкові механізми були досить добре досліджені. Зокрема, для механізму 3RPR (рис. 1.7) встановлено, що використання

надлишкової ланки дозволяє значно покращити маніпульованість у робочому просторі порівняно з двохланковим механізмом.

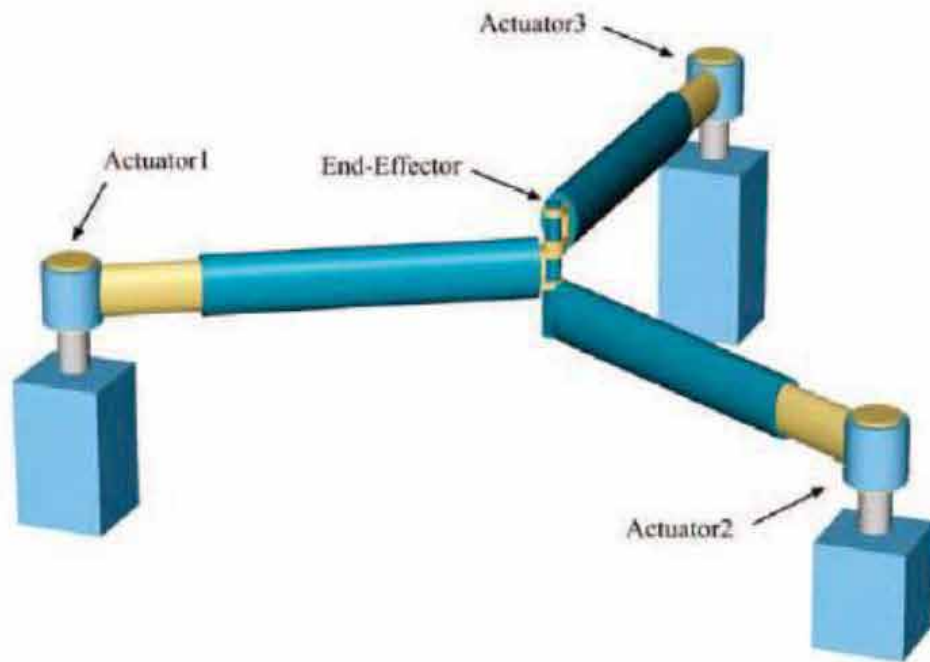


Рис. 1.7 – Плоский надлишковий механізм

Одним із найпоширеніших застосувань для надлишкових механізмів є їх використання у кабельних маніпуляторах (рис. 1.8). Наприклад, для таких маніпуляторів надлишковість приводів дозволяє підвищити жорсткість системи та забезпечити більш ефективне використання робочого простору.

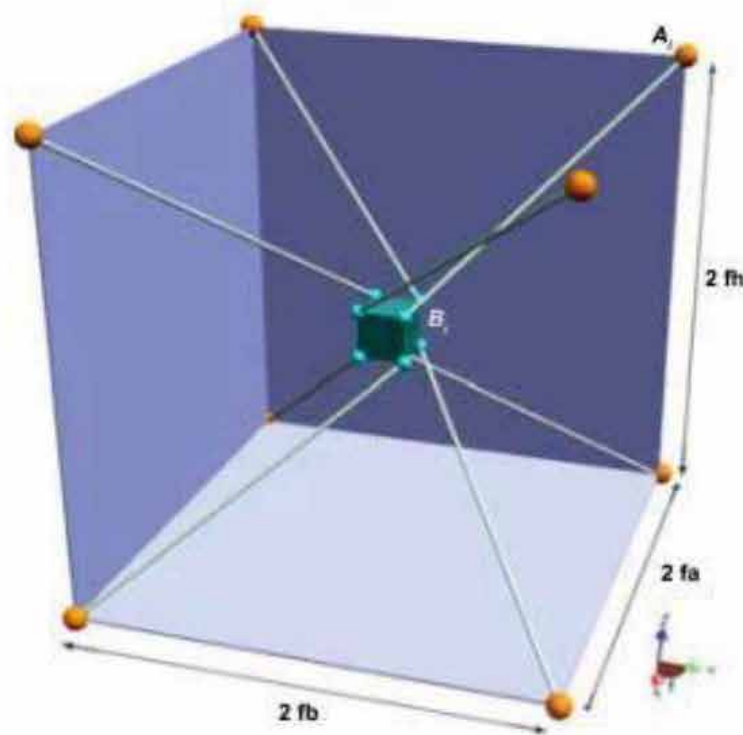


Рис. 1.8 – Кабельний маніпулятор

У відміну від повно паралельних механізмів, управління надлишковими маніпуляторами зазвичай здійснюється за допомогою регуляторів, що працюють з моментами приводів ланок та використовують доповнені пропорційно-диференціальні алгоритми. При цьому важливо враховувати неточності виготовлення, які можуть призвести до виникнення значних напружень у просторовій системі механізму.

Надлишкові механізми паралельних структур також знайшли застосування у верстатобудуванні. Один з небагатьох верстатів, побудованих на основі маніпуляторів паралельної структури з надлишковими приводами, - це Eclipse, розроблений у Сеульському національному університеті.

Для уникнення перегонки важливо правильно програмувати робота, враховуючи його фізичні обмеження та враховуючи динамічні параметри. Також, використання обмежень та безпечних алгоритмів керування може допомогти попередити ситуації перегонки в паралельних кінематичних системах.

РОЗДІЛ 2

ЗАДАЧА СИНТЕЗУ РОЗТАШУВАННЯ ПОВЗУНІВ ПРИВОДУ ПЕРЕМІЩЕННЯ РУХОМОЇ ПЛАТФОРМИ МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

2.1 Опис пропонованої конструкції робота

За основу нашої конструкції оберемо принцип забезпечення лінійних переміщень окремим елементом (в даному випадку – рухомою платформою). Ґрунтуючись на інформації з джерела [1], даний принцип дозволяє розмежувати керування лінійними переміщеннями від кутових в механізмах паралельної структури.

Наступним кроком необхідно визначитися з кутовими переміщеннями руки. Обов'язковим рухом захватного механізму буде поворот навколо власної осі. Поворот захватного механізму робота буде виконуватись у площині, паралельній до площини рухомої платформи. Таким чином, нам потрібні два додаткових приводи для забезпечення кутових переміщень виконавчих елементів робота, окрім трьох приводів, що відповідають за лінійне переміщення рухомої платформи.

У запропонованій моделі робота кутові переміщення будуть реалізовані за принципом що застосований у роботі [2], а саме одночасним керуванням двох координат. Одна з небагатьох проблем яка може виникнути при проектуванні буде суміщення двох пар повзунів приводів штанг на одній напрямній, для усунення невідповідностей рознесемо штанги на певну відстань. Наступним кроком буде більш детальний опис конструкції робота, який представлений на схемі рисунку 2.1.

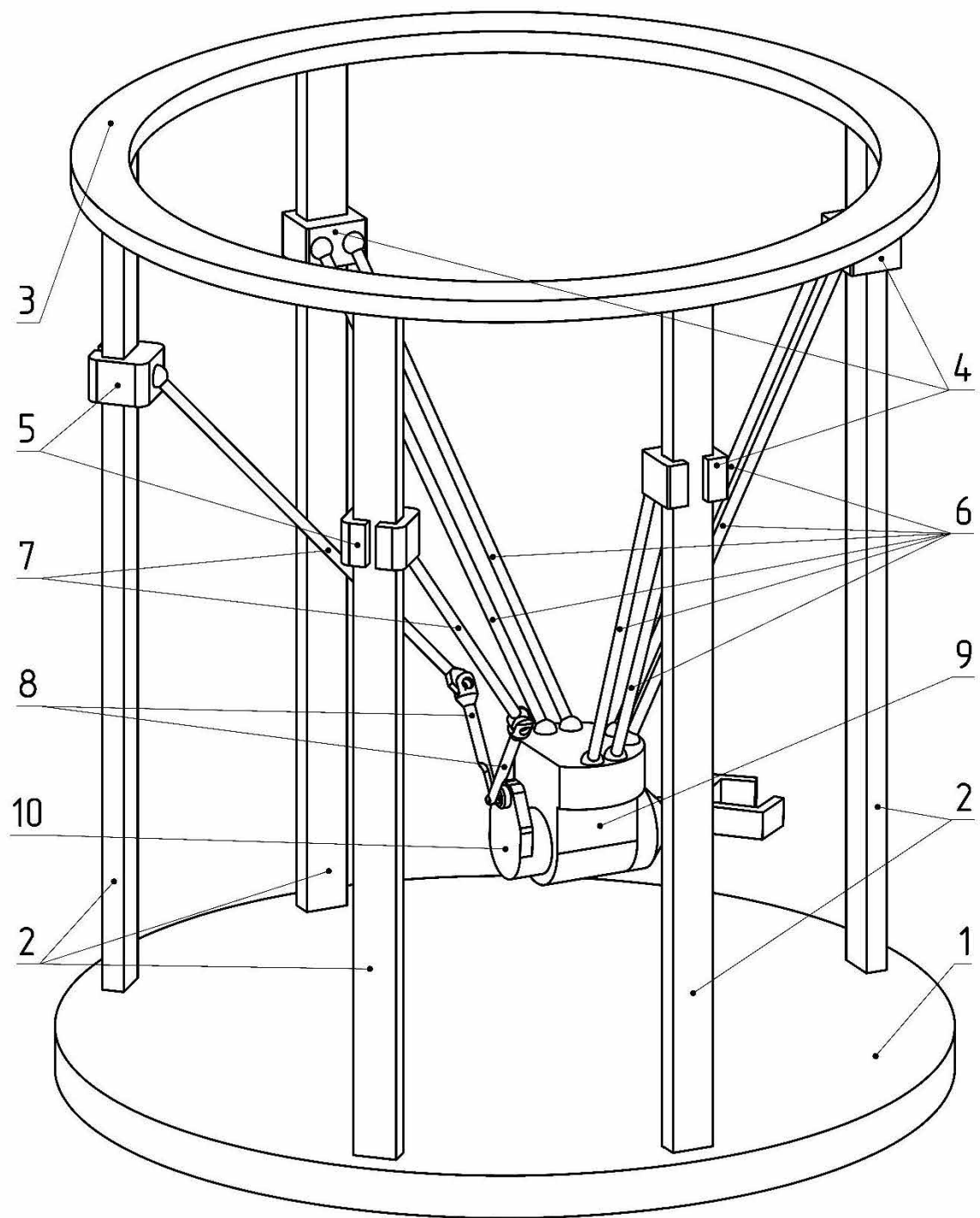


Рис. 2.1 – Схема будови механізму паралельної структури з штангами постійної довжини та напрямними повзунів повороту захватного механізму

Запропонована конструкція маніпулятора побудована на основі 1. До основи 1 приєднані п'ять вертикальних напрямних 2. Верхні кінці вертикальних напрямних 2 поєднані кільцем 3 для кращої жорсткості конструкції яке зображене на схемі.

На трьох із п'яти вертикальних напрямних 2 переміщуються повзуни 4, які керують переміщенням парних штанг постійної довжини 5. На інших двох напрямних 2 розташовані повзуни 5, що переміщують окремі штанги постійної довжини з шарнірним з'єднанням 7 та 8. Пари штанг постійної довжини 6 прикріплені одним кінцем до рухомої платформи 9. Відстані між центрами кріплення штанг довжини 6 на повзунах 4 і на рухомій платформі 9 є однаковими. Довжини цих штанг також однакові, завдяки чому кожна пара формує шарнірний паралелограм. Три таких шарнірних паралелограми забезпечують рух рухомої платформи 9 за лінійними координатами. Цей принцип було взято з роботи [3]. Таким чином, платформа виконує лінійні переміщення за принципом механізму паралельної структури типу «дельта» з лінійними приводами переміщень штанг постійної довжини.

В запропонованій конструкції механізму паралельної структури захватний механізм 10 який розташований в рухомій платформі 9 вісь обертання якого буде паралельна площині основи 1. За поворот будуть відповідати дві штанги постійної довжини 7 та 8 що має поєднаних між собою за допомогою шарніра, які в свою чергу на одному кінці мають сферичне з'єднання з повзуном 5 а на іншому кінці мають з'єднання з кривошипом захватного механізму 10.

Застосування сферичних шарнірних з'єднанням штанг дозволяє чітко розділити приводи лінійних і кутових переміщень виконавчих елементів робота, що сприяє значному розширенню можливостей їх переміщення та спрощенню загальної системи керування роботом.

2.2 Розрахунок довжини штанги приводу переміщення рухомої платформи

Даний розрахунок буде складатися з трьох етапів. Перший етап полягатиме в знаходженні довжин штанг переміщення рухомої платформи. Другий представлятиме задачу синтезу розташування напрямних повзунів переміщення рухомої платформи та третій етап для визначення довжини штанг що забезпечують поворот захватного механізму.

Етап перший. Порівнюючи зі звичайним механізмом паралельної структури типу «дельта» з лінійними приводами для переміщення повзунів штанг постійної довжини, в запропонованому механізмі паралельної структури необхідно врахувати граничні положення робочого органу.

Робочий простір в якому буде забезпечуватись переміщення рухомої платформи приймемо за циліндр діаметром D . У запропонованій конструкції механізму паралельної структури при паралельному розташуванні напрямних переміщення повзунів штанг постійної довжини вагомий вплив на розташування напрямних матиме діаметр робочого простору. На довжину напрямних впливатиме тільки висота робочого простору та запобіжний кут. Знаходження довжини штанг переміщення рухомої платформи та розташування напрямних переміщення повзунів зазначених штанг є взаємопов'язаними задачами.

Почнемо з розрахунку довжини штанг приводу переміщення рухомої платформи, будемо застосовувати принцип забезпечення вільного переміщення робочого органу механізму в обумовленому просторі. Завдання полягатиме в тому, щоб забезпечити положення захватного механізму в будь-якому положенні рухомої платформи. Для кращого сприйняття схеми розглянемо штанги в яких вісі між центрами розташовані паралельно до вісі захватного механізму. Через те що пасивну кінематичну функцію яка полягає у забезпеченні паралельного положення рухомої платформи відносно основи, виконує пара паралельних штанг для розрахунку довжини штанг буде

достатнім розглянути відрізок що поєднує сферичний шарнір повзуна та точку на рухомій платформі захватного механізму.

Першочергово необхідно визначити довжину штанги що поєднує рухому платформу та повзун, через пряму, початок якої виходить з центру сферичного шарніру повзуна та приходить в аналогічний центр вісі сферичного шарніру рухомої платформи. Для уникнення руйнівних зусиль у шарнірах еквівалентні штанги повинні розміщатися крайніх положеннях з певним запобіжним кутом c та b до горизонтальної та вертикальної осей зображених на схемі.

Відтак положення напрямної повзуна переміщення еквівалентної штанги 1 визначатиметься відрізком U_1 , що є проекцією довжини еквівалентної штанги L_{s1} на горизонтальну вісь схеми, у крайньому положенні захватного механізму робота у найближчому до згаданої напрямної розташуванні розрахункової точки захватного пристрою робота у робочому просторі, що зображено на схемі рис. 2.1.

Можна записати, що

$$U_1 = L_{s1} \times \sin(C)$$

При розташуванні рухомої платформи на найбільшій відстані від напрямної переміщення повзуна, що відповідатиме крайньому розташуванні розрахункової точки штанги 1 захватного пристрою робота у робочому просторі, можна записати наступну залежність:

$$L_{s1} \times \cos(d) = U_1 + P + D - P$$

Враховуючи попередню залежність:

$$L_{s1} \times \cos(d) = L_{s1} \times \sin(c) + P + D$$

$$L_{s1} \times \cos(d) - L_{s1} \times \sin(c) = P + D,$$

$$L_{s1}(\cos(d) - \sin(c)) = P + D,$$

$$L_{s1} = \frac{D + P}{\cos(d) - \sin(c)}$$

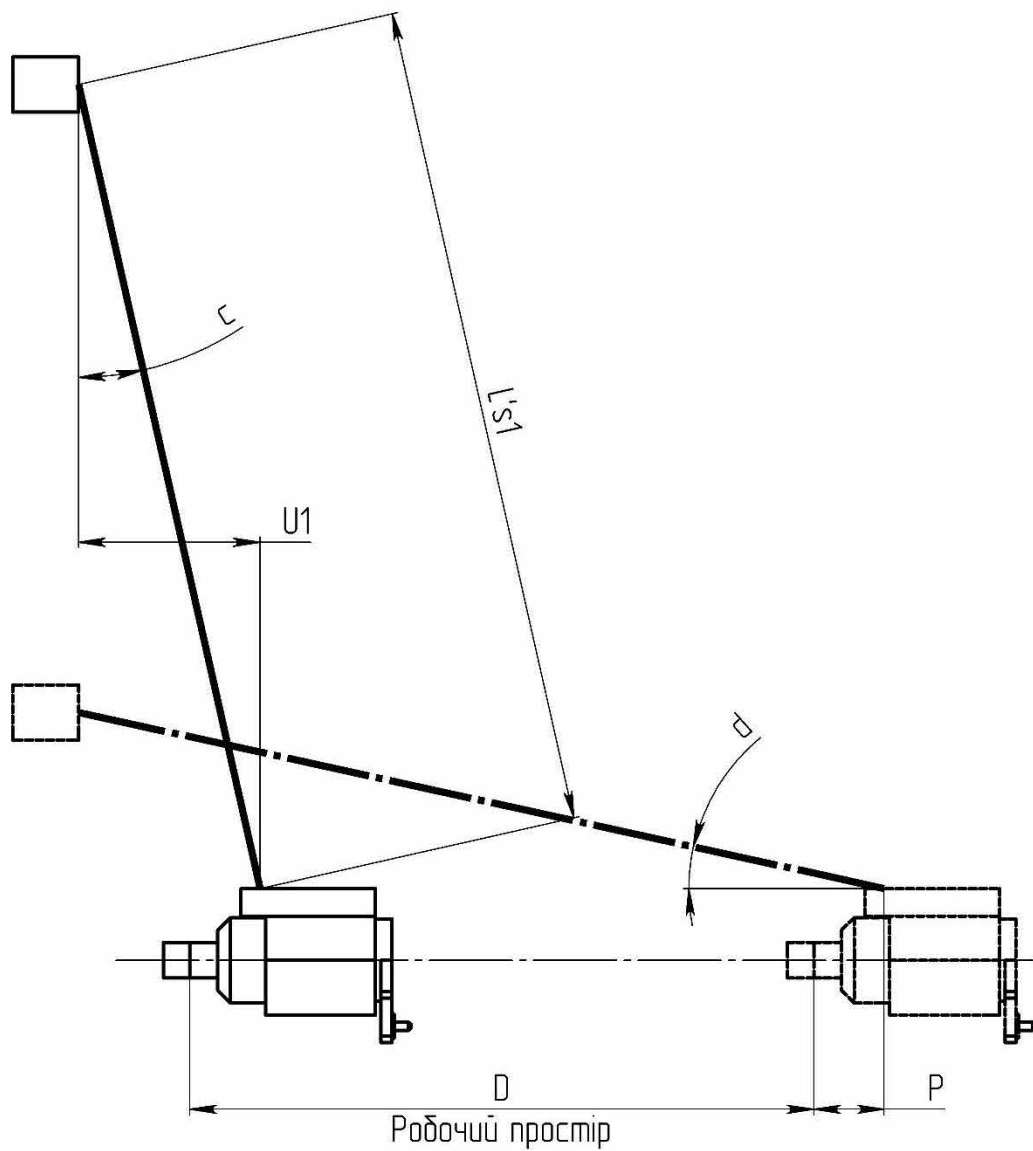


Рис. 2.2 – Схема до визначення довжини штанги у розрахунковій площині

Етап другий. Синтезу розташування напрямних повзунів переміщення рухомої платформи. При вирішенні задачі синтезу розташування повзунів приводу переміщення рухомої платформи за основу взяті дослідження наведені в роботі [4], надалі буде представлений фрагмент роботи з визначення габаритних розмірів розташування паралельних напрямних переміщення повзунів.

Знаючи довжини всіх трьох штанг та величину кута δ , розрахуємо діаметр D_S кола, що проходить через характерні точки повзунів, розташованих у серединах відрізків, що поєднують центри шарнірів даних повзунів. Схема розрахунку представлена на рис. 2.3.

Трикутник, що поєднує характерні точки повзунів, є рівнобічним. Центр кола, що проходить через дані точки, повинен лежати на перетині перпендикулярів, проведених із середин сторін даного трикутника. Однак відповідно до схеми на рис. 2.8, центр шуканого кола лежить на перетині положення штанг, що відповідають їх максимальному можливому віддаленні від повзунів (для штанг 2 і 3 – одного з двох можливих положень). Подібна обставина дозволяє полегшити розв'язок поставленої задачі.

Знайдемо кут ψ нахилу проекції штанги 2 на площину основи до відрізка, що поєднує характерні точки другого та третього повзунів.. Раніше встановлено, що довжина штанги 2 в залежності від величини кута γ знаходиться за двома залежностями. Очевидно, це матиме вплив і на встановлення величини шуканого кута ψ . За умови $\gamma > \gamma_{\text{гр}}$ маємо:

$$\psi = \arctan \frac{T}{D \cos\left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2}\right) + \left(D \sin\left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2}\right) + T\right) \tan\left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2}\right)},$$

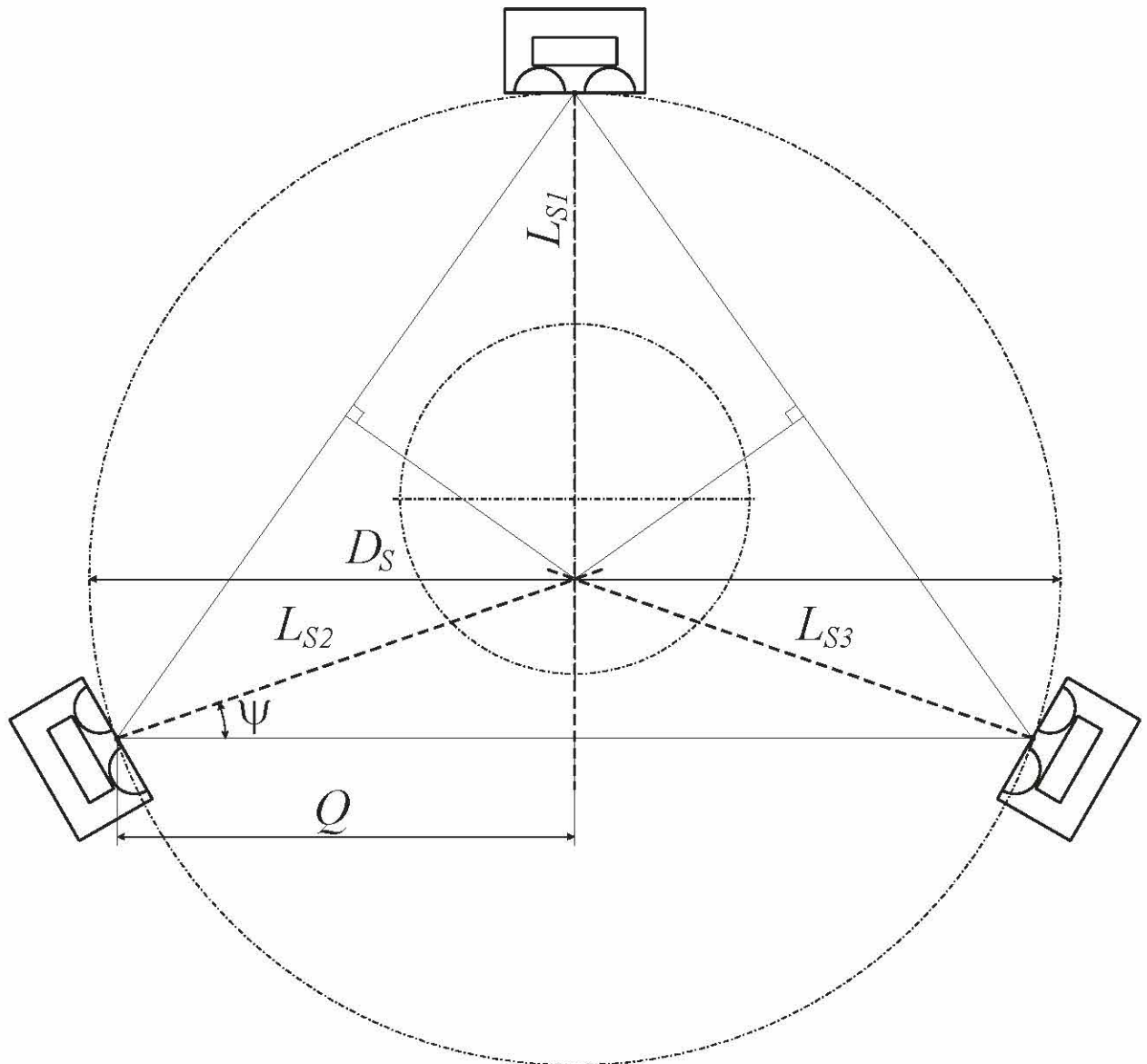


Рис. 2.3. Схема розрахунку діаметру D_S , що визначає положення повзунів штанг та їх напрямних

За умови $\gamma < \gamma_{\text{гр}}$ маємо:

$$\psi = \arctan\left(\frac{T}{2} / \left(\frac{D}{2} - V \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{D_P}{2} \cos\left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2}\right) + \right.\right.$$

$$+ \left(\frac{D_p}{2} \sin \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{T}{2} - V \sin \left(\gamma - \frac{\pi}{2} \right) \right) \tan \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right)$$

Отже, кути γ і ψ – це різні кути. Знайдемо тепер довжину проекції Q .

За умови $\gamma > \gamma_{\text{гр}}$ маємо:

$$Q = V \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{D}{2} \cos \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) + \left(\frac{D}{2} \sin \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{T}{2} \right) \tan \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right),$$

а за умови $\gamma < \gamma_{\text{гр}}$ маємо:

$$Q = \frac{D}{2} + \frac{D_p}{2} \cos \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) + \\ + \left(\frac{D_p}{2} \sin \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{T}{2} - V \sin \left(\gamma - \frac{\pi}{2} \right) \right) \tan \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right).$$

Таким чином, діаметр шуканого кола у випадку $\gamma > \gamma_{\text{гр}}$ становить:

$$D_s = \frac{2V \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{2} \right) + D \cos \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) + \left(D \sin \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) + T \right) \tan \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right)}{\cos \psi},$$

а у випадку $\gamma < \gamma_{\text{гр}}$ маємо:

$$D_s = \left(D + D_p \cos \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) + \right. \\ \left. + \left(D_p \sin \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) + T - 2V \sin \left(\gamma - \frac{\pi}{2} \right) \right) \tan \left(\gamma + \delta - \frac{\pi}{2} \right) \right) / \cos \psi.$$

При розгляді запропонованої конструкції механізму зображену на рис. 2.4, для кращого розуміння та зручності розрахунків оперуватимемо не розташуванням напрямної, а траєкторією руху точки повзуна. Для повзуна механізму паралельної структури, що забезпечує лінійні рухи рухомої платформи, дана точка буде знаходитись на середині відрізка, що поєднує центри його сферичних шарнірів. Траєкторія переміщень цієї точки являє собою пряму, паралельну напрямній, по якій рухається повзун, точка якого розглядається. Оскільки прийнято рівномірне положення проєкцій напрямних відносно центру робочого простору на площину основи, то кут між відрізками, що поєднують цей центр і проєкції траєкторій руху точок повзунів на площину основи, становитиме 90° . Для забезпечення рівномірних характеристик жорсткості та оптимізації конструкції дані відрізки представлятимуть собою радіус кола, проведеного через три точки проєкцій траєкторій руху точок повзунів на площину основи. Враховуючи утворену симетричність механізму, достатньо розглядати лише геометричні співвідношення для одного з трьох повзунів. Відтак довжини штанг в трьох парах будуть однаковими.

Схему для розрахунку довжини штанг, що поєднують повзун її переміщення та рухому платформу, і радіусу на площині основи кола розташування характерної точки повзуна, в проєкції на площину основи, наведено на рис. 2.4. Для полегшення сприйняття інформації з даного рисунку доповнимо його проєкційною схемою даного розташування вузлів механізму на площину, перпендикулярну до площини основи та яка проходить через вісь циліндру робочого простору та пряму переміщення характерної точки повзуна при його русі вздовж напрямної. На схемах, окрім вищезазначеного, позначено:

D – діаметр робочого простору переміщення рухомої платформи;

D_s – діаметр розташування напрямних переміщення повзунів;

N_2 – радіус розташування напрямних переміщення повзунів;

R – радіус кола, проведеного через середини відрізків, що поєднують центри шарнірів пар штанг на рухомій платформі;

φ – кут максимально можливого положення рухомої платформи від осі, що проходить через центр шарніру кріплення захватного механізму, мінімальне значення даного кута обмежується з міркувань запобігання самогальмування штанги та іншим небезпечним факторам.

Як було зазначено вище, довжини шести даних штанг однакові, тому позначимо їх індексами 1, 2 і 3, а довжині надамо спільне позначення $N2$. З представлених схем можна записати:

Етап третій. Задача полягає у визначенні довжини штанг що забезпечують поворот захватного механізму. Розглянемо схему на рис. 2.5.

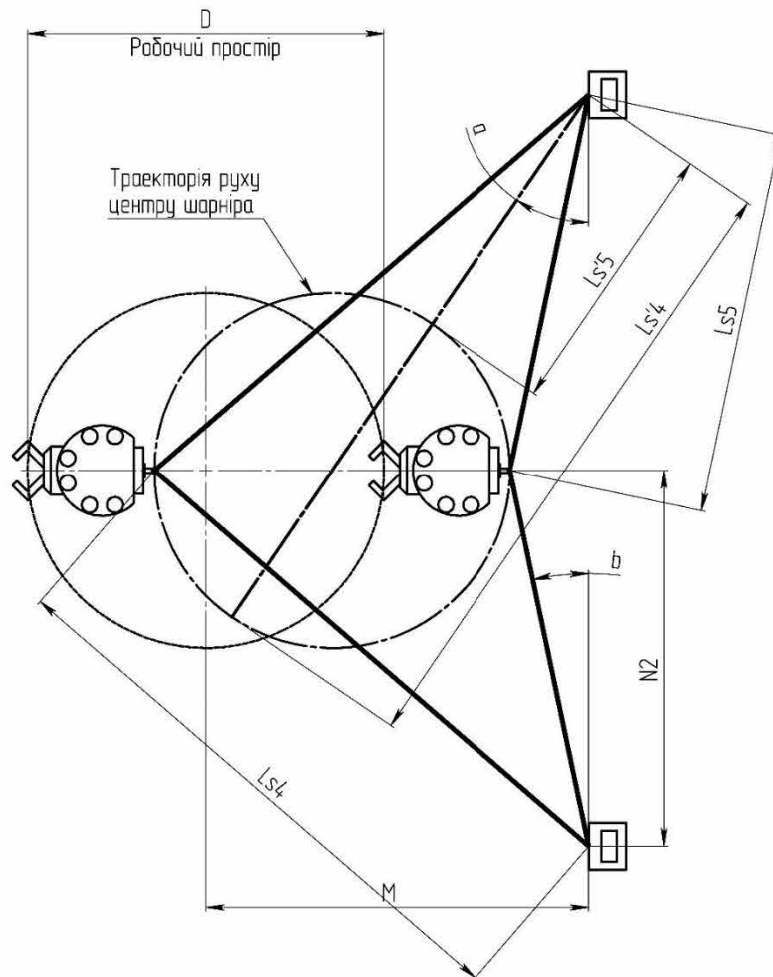


Рис. 2.5 – Схема розташування площини для визначення довжини штанги приводу повороту руки

Приймаємо, що координати розташування центрів шарнірів кріплення штанг постійної довжини приводу повороту руки та орієнтації захватного пристрою на згаданій руці робота визначаються віддаленням M від таких центрів шарнірів вздовж осі руки до точки перетину даної осі з віссю поворотних шарнірів на кривошипі захватного механізму, а також віддаленням N цих центрів шарнірів від самої осі руки робота. Внаслідок симетричності конструкції робота розглядати будемо конструктивні залежності тільки для однієї штанги. На відміну від попереднього етапу синтезу приводу переміщення рухомої платформи в приводі повороту руки та орієнтації захватного пристрою всі штанги в розгляді будуть реальними. Координати розташування напрямних переміщення повзунів даного приводу визначаються з обмежень, які виникають при вертикальному розташуванні руки робота. Повна довжина штанги 4 визначатиметься у нижньому положенні центру шарніру кріплення даної штанги до вилки при горизонтальному розташуванні руки робота. Як і для еквівалентних штанг приводу переміщення рухомої платформи, необхідно забезпечити мінімальний кут нахилу штанги.

$$(L_{s4} - \frac{D}{2})^2 = N^2 + (N \times \tan(b) + \frac{D}{2})^2$$

Перенісши вирази з L_{s4} у ліву частину рівняння та виділивши безпосередньо величину еквівалентної штанги $L_{s'4}$ максимально наближеному до напрямної, знаходимо вираз для її розрахунку:

$$L_{s4}^2 - L_{s4} \times D + \frac{D^2}{2} - N^2 - N^2 \times \tan^2(b) - N \times D \times \tan(b) - \frac{D^2}{2} = 0,$$

$$L_{s4}^2 - L_{s4} \times D - (N^2 + N^2 \times \tan^2(b) - N \times D \times \tan(b)) = 0,$$

Розв'язуючи дане рівняння відносно L_{s1} , отримуємо:

$$L_{s'4} = \frac{D + \sqrt{D^2 + 4(N^2 + N^2 \times \tan^2(b) + N \times D \times \tan(b))}}{2}$$

Для знаходження повної довжин штанги приводу повороту руки робота по аналогії з довжиною штанги приводу переміщення рухомої платформи запровадимо запобіжний кут d . Відтак повна довжина штанги приводу повороту руки буде дорівнювати:

$$L_{s4} = \frac{L_{s'4}}{\cos(\delta)}$$

2.3 Зворотна задача приводу повороту кисті руки

Метою етапу є визначення залежностей в запропонованій конструкції робота, а саме розташування координат повзунів що відповідають за поворот захватного механізму. Зворотна задача кінематики розраховується по заданим лінійним координатам розташування робочого органу та кути його повороту.

Після синтезу механізму нам відомий діаметр D_S , що проходить через три точки проєкцій на площину основи геометричного місця точок послідовних положень середин відрізків, що сполучають центри шарнірів повзунів приводу штанг, які забезпечують лінійні переміщення рухомої платформи. Тепер необхідно розв'язати обернену задачу: по заданим координатам точки N_0 на рухомій платформі визначити положення повзунів на напрямних. Для цього спочатку розрахуємо відстані між проєкціями точки N_0 та сліду руху характерних точок повзунів при їх переміщенні вздовж напрямних для механізмів приводу штанг з індексами 1, 2 і 3 на площину основи:

$$S^2 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}$$

Розраховані відстані є не чим іншим, як проєкцією відповідної штанги на площину основи. Приймаючи їх як один з катетів прямокутного трикутника, та знаючи гіпотенузи, якими являються довжини штанг L_{S1} , L_{S2} і L_{S3} , можна розрахувати величину іншого катета. Даний катет і буде шуканою висотою z_i розташування розрахункової точки повзуна приводу штанги на напрямній:

$$Z^2 = \sqrt{L^2 - (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

Для розв'язку зворотної задачі визначення координат розташування повзунів на напрямних при забезпеченні необхідного кутового положення захватного механізму відносно рухомої платформи розрахуємо координати точки за заданих величин кутів:

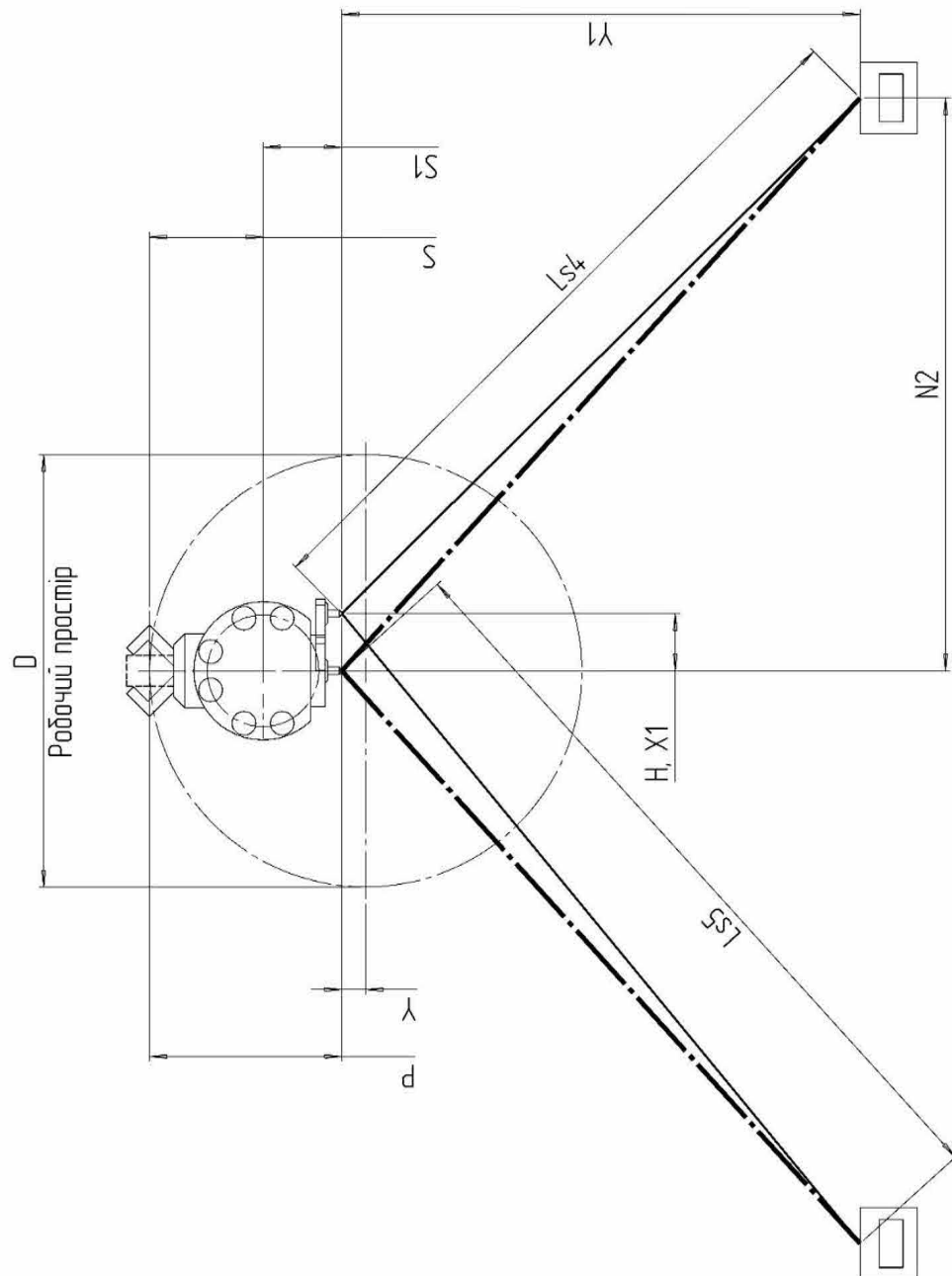


Рис. 2.6 – Схема розташування площини для визначення довжини штанги приводу повороту руки

2.4 Дослідження приводу повороту кисті руки

В даному розділі будуть наведені графіки залежностей впливу запобіжних кутів, , залежність зміни координат Z при повороті руки захватного механізму та залежність координат Z відносно руху захватного механізму по осям X та Y . Розрахунки проводимо в середовищі MathCAD.

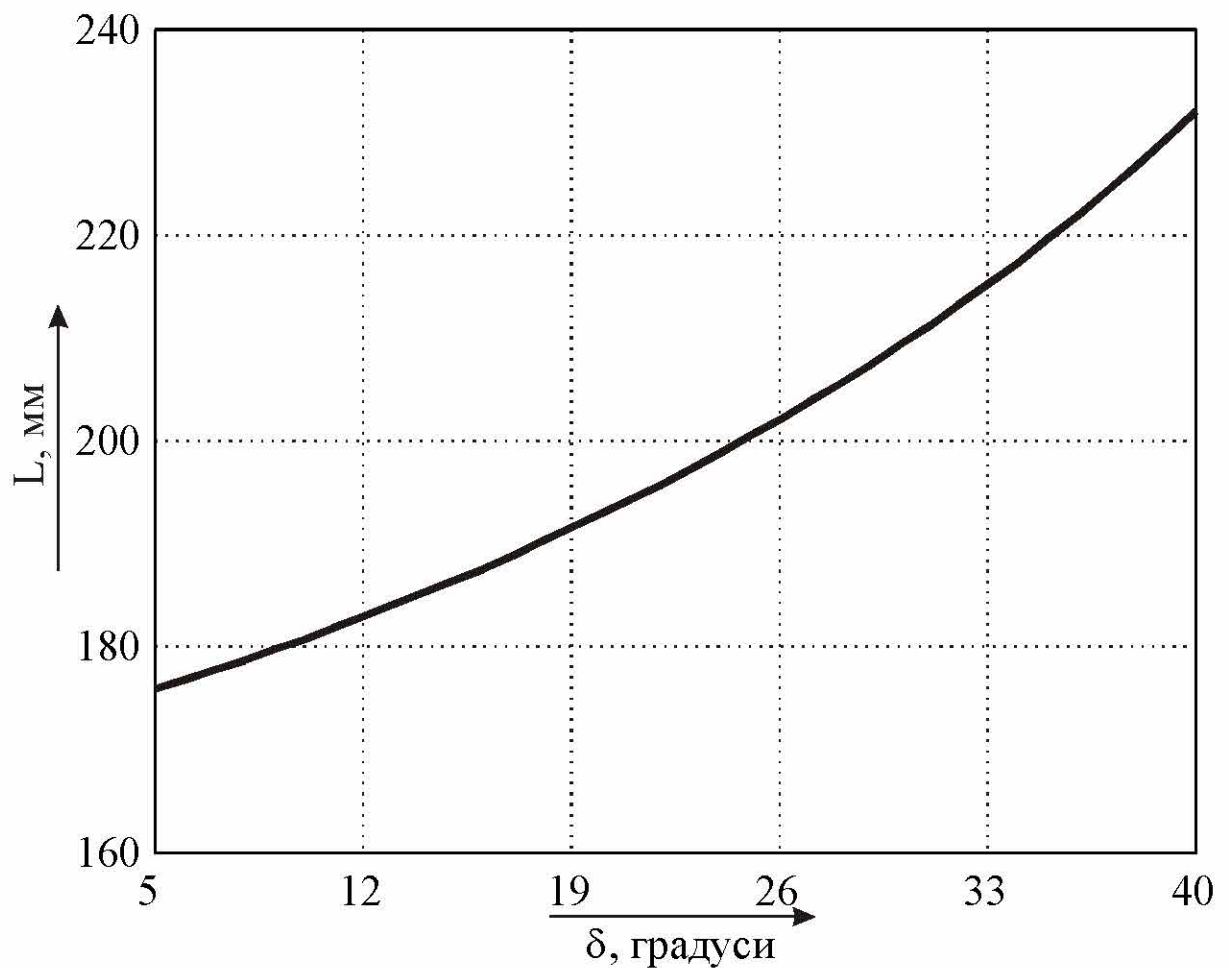


Рис. 2.7 – Залежність довжини еквівалентної штанги 4 від запобіжного кута δ

Представлений графік демонструє залежність довжини штанги повороту кисті захватного механізму L , мм. від запобіжного кута δ , градуси. На вертикальній осі наведені величини довжини штанги, в свою чергу горизонтальна вісь демонструє величини запобіжного кута δ , значення якого варіюється від 5 до 40 градусів.

Графік демонструє рівномірне зростання величини довжини штанги L при збільшенні кута δ . Зростання є нелінійним і нагадує квадратичну залежність, спочатку відбувається повільна зміна величини L , потім збільшенням кута δ темп зростання довжини штанги L суттєво прискорюється. На графіку наведено основні точки значень δ , що позначені на горизонтальній осі: 5, 12, 19, 26, 33, 40 градусів, та відповідні значення довжини штанги на вертикальній осі.

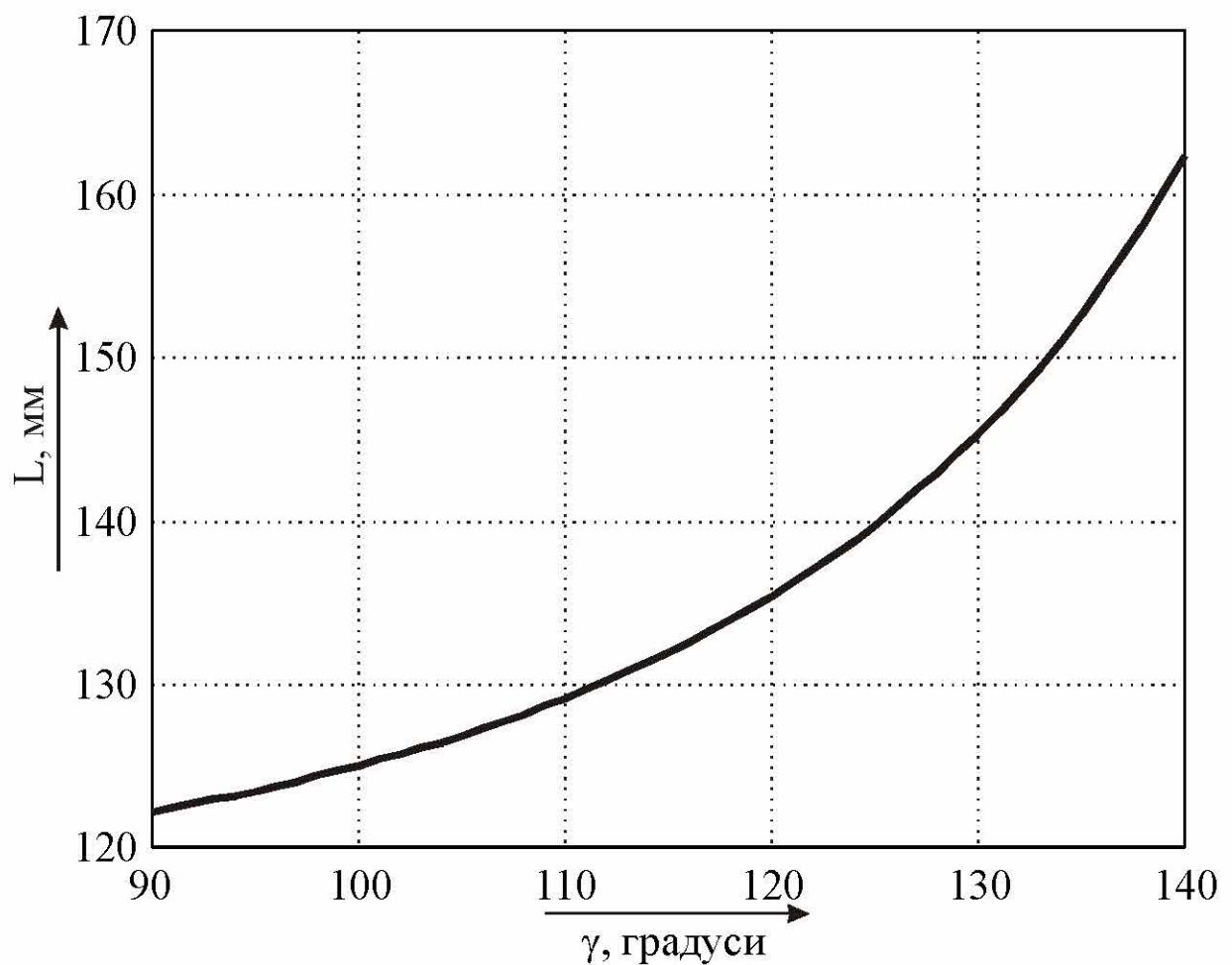


Рис. 2.8 Залежність координат Z від повороту руки на 360° при розташуванні в робочому просторі в точках $X_0 Y_0$

Представлений графік демонструє залежність координат Z від повороту руки на 360° при розташуванні в робочому просторі в точках $X_0 Y_0$, мм. від кута розміщення центрів шарнірів γ , градуси. На вертикальній осі

наведені величини довжини штанги, в свою чергу горизонтальна вісь демонструє величини кутів розміщення центрів шарнірів γ , значення якого варіюється від 90 до 140 градусів.

Графік демонструє рівномірне зростання величини координати Z при збільшенні кута γ . Зростання є нелінійним і нагадує параболічну залежність, спочатку відбувається повільна зміна координати Z , потім збільшенням кута γ темп зростання величини координати Z суттєво збільшується. На графіку наведено основні точки значень γ , що позначені на горизонтальній осі: 90, 100, 110, 120, 130, 140 градусів, та відповідні значення координати Z на вертикальній осі.

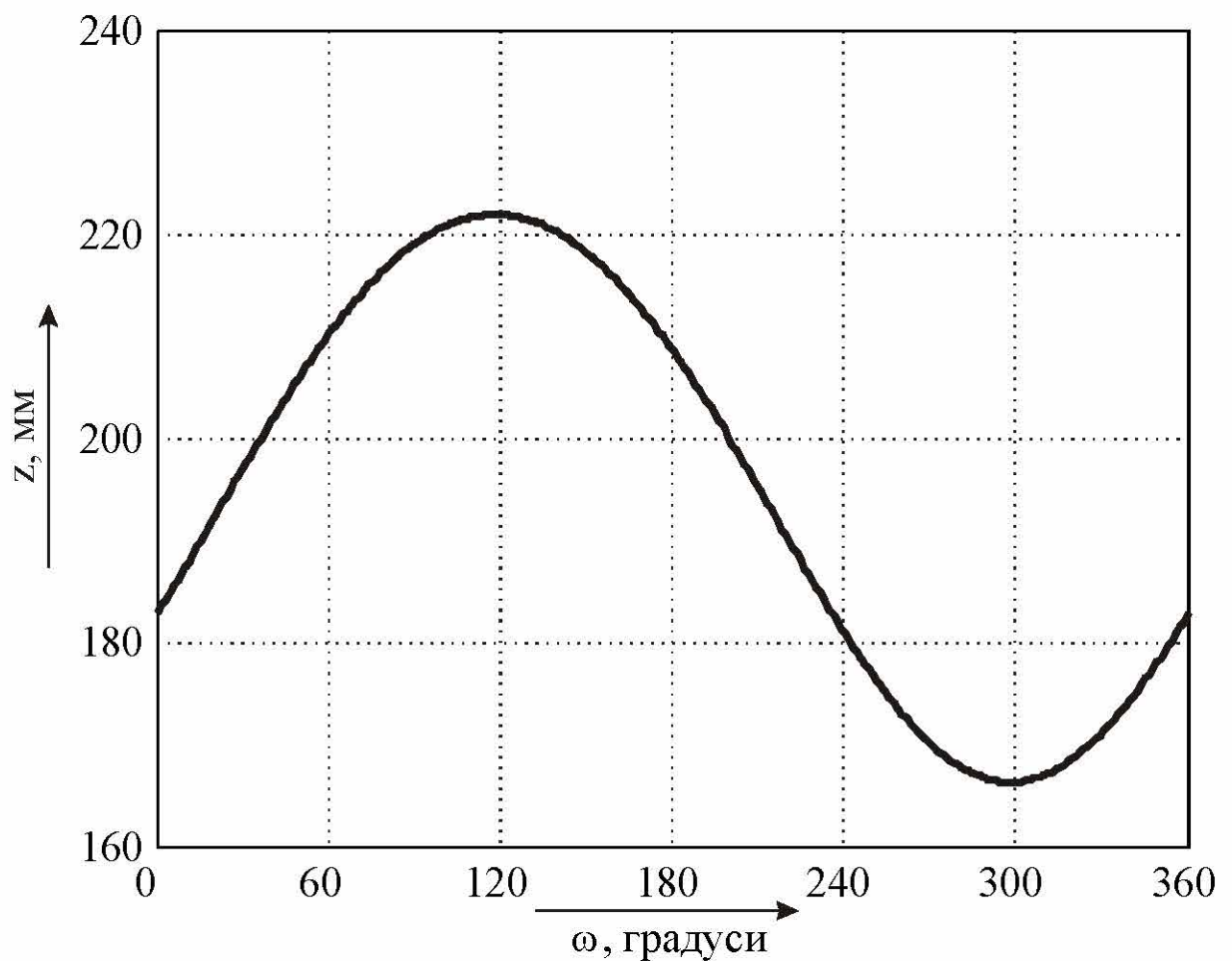


Рис 2.9 Залежність зміни координати Z при повороті захватного механізму при цьому рука захвату займає чотири положення 0° 90° 180° 270°

Представлений графік демонструє залежність зміни координати Z при повороті захватного механізму при цьому рука захвату займає чотири положення. На вертикальній осі наведені величини координати Z , в свою чергу горизонтальна вісь демонструє величини кутів повороту кисті захвату ω , значення якого варіюється від 0 до 270 градусів.

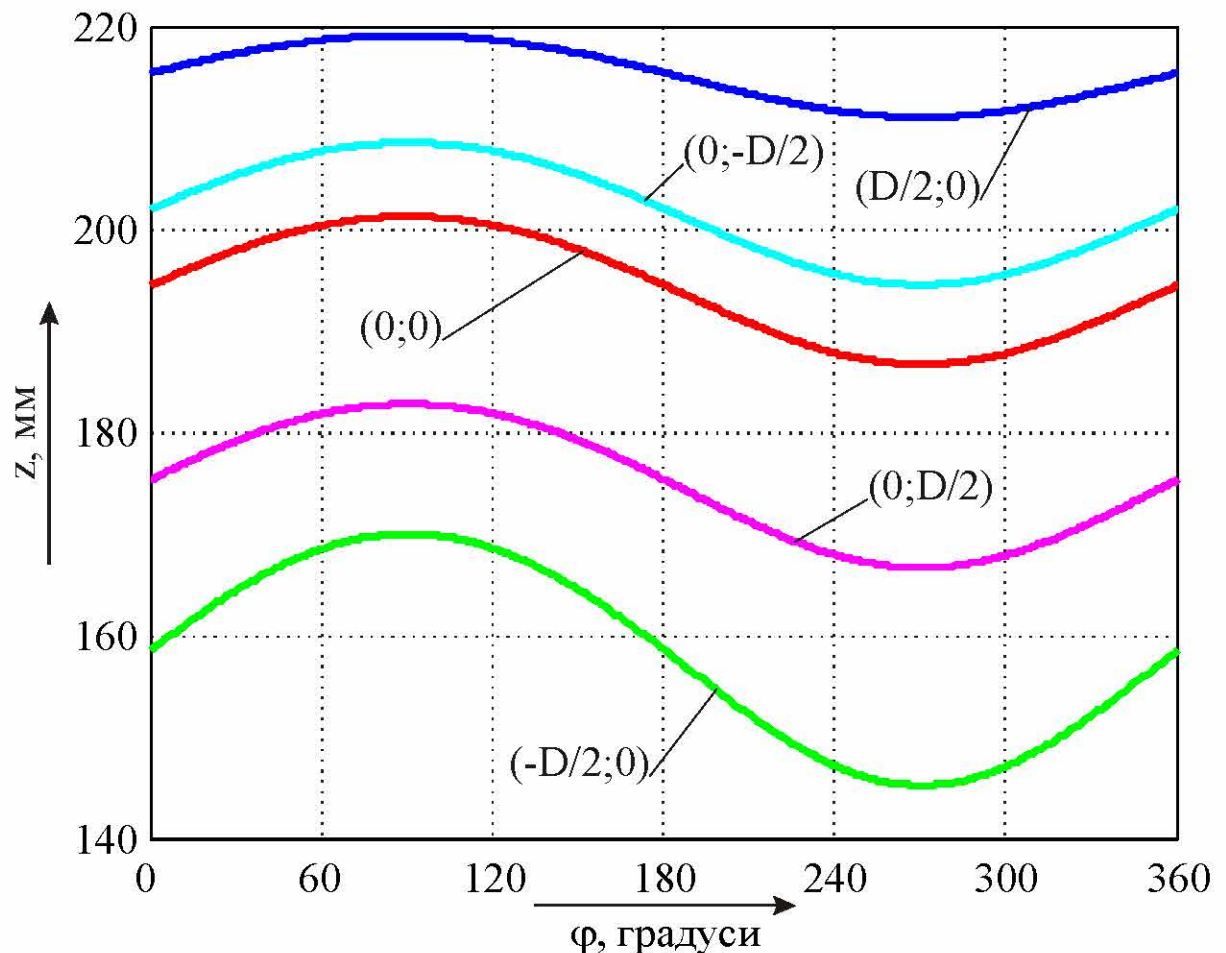


Рис. 2.10 Залежність зміни координати Z при русі робочого органу по осі X та Y при цьому рука захвату займає чотири положення 0° 90° 180° 270°

Представлений графік демонструє залежність зміни координати Z при русі робочого органу по осі X та Y при цьому рука захвату займає чотири положення. На вертикальній осі наведені величини координати Z , в свою чергу горизонтальна вісь демонструє величини кутів повороту кисті захвату ϕ , значення якого варіюється від 0 до 360 градусів.

Графік демонструє зростання амплітуди синусоїди при поступовому віддаленні від напрямної переміщення повзуна. Таким чином в крайньому положенні яке знаходиться на мінімальній відстані до напрямної переміщення повзуна синусоїда матиме мінімальну амплітуду, а при максимальному віддаленні амплітуда синусоїди матиме максимальну амплітуду.

РОЗДІЛ 3

ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

3.1 Загальні вихідні данні

Для вирішення питання про економічну ефективність маніпулятора з паралельною кінематичною структурою і збільшеним поворотом руки необхідно обрати базу для порівняння та виявлення техніко-економічних переваг нового конструкторського рішення і визначення економічного ефекту від впровадження його у виробництво.

В якості такої бази для порівняння приймаємо робот з традиційною кінематикою, також призначений для виконання транспортувальних і сортувальних операцій на стрічковому конвеєрі.

Порівняно з базовою конструкцією використання нового варіанту маніпулятора сприятиме вирішенню трьох завдань:

- покращення умов праці робітників на конвеєрній лінії, зокрема завдяки усуненню ручної монотонної малокваліфікованої праці;
- підвищення продуктивності праці за рахунок можливого збільшення швидкості руху стрічкового конвеєра втричі;
- скорочення потреби в робочій силі (економія чисельності при застосуванні базового варіанту робота становить 1,5 робітника, проектного маніпулятора – 6-8 робітника).

Розрахунок показників економічної ефективності проведемо на прикладі виконання маніпулятором операції сортування продукції в короби на стрічці конвеєра. Для наочності також визначимо витрати при сортуванні продукції робітником вручну.

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 1.

Таблиця 1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базових та проектного
варіантів

№ п/п	Показник	Варіанти		
		сортування вручну	базовий робот	проектний
1.	Програма сортування та пакування продукції, упаковок/рік	1000000	1000000	1000000
2.	Норма часу на сортування, хв/упак.	0,125	0,125	0,042
3.	Площа, яку займає маніпулятор, м ²	-	1,57	3,14
4.	Встановлена потужність електродвигунів маніпулятора, кВт	-	1,8	0,6
5.	Категорія ремонтної складності: механічної/електричної частин, УРО	-	15/12	19/12
6.	Швидкість руху стрічки конвеєра, м/хв	10	10	30
7.	Розряд роботи пакувальника при ручному пакуванні	3	-	-
8.	Оптова ціна маніпулятора, грн	-	200000	385000

3.2 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості операції сортування)

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^m B_i$$

де B_z – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальні потреби пакувальника, грн.;

B_e – витрати на силову електроенергію, грн.;

B_{md} – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

B_n – витрати на утримання приміщення, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.;

B_n – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату пакувальника при ручному сортуванні продукції (основну, додаткову та відрахування на соціальні потреби):

$$B_z = C_T \times \frac{T_{\text{нор}}}{60} \times (1 + K_d) \times (1 + K_c)$$

де $T_{\text{нор}}$ – норма часу на виконання операції сортування, хв;

K_d, K_c – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок) відповідно.

В базовому (ручному) варіанті:

$$B_{з.баз(1)} = 70,181 \times \frac{0,125}{60} \times (1 + 0,1) \times (1 + 0,22) = 0,196 \text{ грн.}$$

При застосуванні базового та проектного робіт ручна операція відсутня.

Витрати на електроенергію силову:

$$B_e = \frac{N_B \times K_O \times K_N \times K_D}{\eta_M \times \eta_C} \times \frac{T_{нор}}{60} \times \Pi_{ел}$$

де N_B – встановлена потужність електродвигунів робота, кВт;

K_O – коефіцієнт одночасної роботи моторів;

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю;

K_D – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за часом;

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів;

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства;

$\Pi_{ел}$ – ціна 1 кВт-год силовій електроенергії, грн.

$$B_{ел.баз.(2)} = \frac{1,8 \times 0,75 \times 0,7 \times 0,5}{0,88 \times 0,95} \times \frac{0,125}{60} \times 7,50 = 0,009 \text{ грн.}$$

$$B_{ел.пр.} = \frac{0,6 \times 0,75 \times 0,7 \times 0,5}{0,88 \times 0,95} \times \frac{0,125}{60} \times 7,50 = 0,003 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \times R_{\text{м}} \times T_{\text{нор}}}{60 \times 10} \times K_{\text{п}}$$

де $M_{\text{гв}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів обладнання, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту механічної частини обладнання, УРО;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для великосерійного $K_{\text{п}} = 1,1$).

$$B_{\text{дм.баз(2)}} = \frac{79,5 \times 15 \times 0,125}{60 \times 100} \times 1,1 = 0,027 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{дм.пр}} = \frac{79,5 \times 19 \times 0,042}{60 \times 100} \times 1,1 = 0,012 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання (роботу):

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \times \Gamma_{\text{вм}} \times R_{\text{е}} \times \Gamma_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \times \frac{T_{\text{нор}}}{60}$$

де $\Gamma_{\text{вм}}, \Gamma_{\text{ве}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин роботи, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи (при двозмінному режимі роботи для великосерійного виробництва – 3950 год.).

$$B_{\text{р.баз(2)}} = \frac{15 \times 880 + 12 \times 720}{3980} \times \frac{0,125}{60} = 0,011 \text{ грн.}$$

$$B_{p.pr} = \frac{19 \times 880 + 12 \times 720}{3980} \times \frac{0,042}{60} = 0,004 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{уп} = \frac{F_o \times K_d \times C}{F_{дрм}} \times \frac{T_{нор}}{60}$$

де F_o – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, m^2 ;

K_d – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення);

C – річні витрати, пов'язані з використанням $1 m^2$ виробничого приміщення, $грн/m^2$.

$$B_{уп.баз(2)} = \frac{1,57 \times 4}{3980 \times 60} \times 780 = 0,021 \text{ грн.}$$

$$B_{уп.pr} = \frac{3,14 \times 4}{3980 \times 60} \times 780 = 0,041 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію робота (маніпулятора):

$$B_a = \frac{\Phi_{бал} \times H_a}{F_{дрм} \times 100} \times \frac{T_{нор}}{60}$$

де H_a – норма амортизації, %;

$\Phi_{бал}$ – балансова вартість робота, грн.

Балансову вартість робота визначаємо за формулою:

$$\Phi_{бал} = Ц_{опт} \times (1 + K_{тр} + K_M)$$

де $C_{\text{опт}}$ – оптова ціна робота, грн.;

$K_{\text{тр}}, K_{\text{м}}$, – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06)

Таким чином, балансова вартість:

- базового робота:

$$\Phi_{\text{бал.баз}} = 200000 \times (1 + 0,08 + 0,06) = 228000 \text{ грн.}$$

- проєктного маніпулятора:

$$\Phi_{\text{бал.пр}} = 385000 \times (1 + 0,08 + 0,06) = 438900 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{а.баз (2)}} = \frac{228000 \times 20 \times 0,125}{3980 \times 60 \times 100} = 0,024 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{а.пр}} = \frac{438900 \times 20 \times 0,042}{3980 \times 60 \times 100} = 0,015 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 2.

Таблиця 2

Експлуатаційні витрати (собівартість виконання сортувальної операції)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позн.	Варіанти		
			базовий (1)	базовий (2)	проект
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні потреби	B_z	0,196	-	-
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	-	0,009	0,003
3.	Допоміжні матеріали	$B_{ом}$	-	0,027	0,012
4.	Ремонт обладнання	B_p	-	0,011	0,004
5.	Утримання приміщення	B_{yn}	-	0,021	0,041
6.	Амортизація обладнання	B_a	-	0,024	0,015
Загальна сума		B_e	0,196	0,092	0,075

3.3 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект від застосування маніпулятора з паралельною кінематичною структурою зі збільшеним поворотом руки розраховуємо за формулою:

$$E_p = (B_{e.баз} - B_{e.пр}) \times N_d - E_n \times K_d$$

де N_d – річна програма сортування та пакування продукції, упак./рік;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень, $E_n = 0,16$;

K_d – додаткові капітальні витрати, грн.

Додаткові капітальні витрати при застосуванні ручного сортування:

- порівняно з ручним сортуванням продукції:

$$K_{д(1)} = \Phi_{бал.пр} \times Q_{пр.}$$

- порівняно з базовим роботом:

$$K_{д(2)} = \Phi_{бал.пр} \times Q_{пр.} - \Phi_{бал.б.} \times Q_{б.}$$

де $\Phi_{бал.пр.}$, $\Phi_{бал.б.}$ – відповідно балансова вартість робота в проектному та базовому варіантах, грн.;

$Q_{р.пр.}$, $Q_{р.баз}$ – потреба в роботах для виконання річної програми сортування та пакування продукції відповідно в проектному і базовому варіантах.

Потребу в роботах визначасмо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_d \times T_{\text{нор.}}}{F_{\text{дрм}} \times 60 \times k_B}$$

де k_B – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Так потреба в базовому варіанті:

$$Q_{p.\text{баз}} = \frac{1000000 \times 0,125}{3980 \times 60 \times 1,01} = 0,518$$

Так потреба в проектному варіанті:

$$Q_{p.\text{пр}} = \frac{1000000 \times 0,042}{3980 \times 60 \times 1,01} = 0,174$$

Капітальні витрати у базовому варіанті:

- порівняно з ручним сортуванням продукції:

$$K_{d(1)} = 438900 \times 1 = 438900 \text{ грн.}$$

- порівняно з базовим роботом:

$$K_{d(2)} = 438900 \times 1 - 228000 \times 1 = 210900 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект:

- від заміни проектним маніпулятором ручного сортування продукції:

$$E_{p(1)} = (0,196 - 0,075) \times 1000000 - 0,16 \times 438900 = 50776 \text{ грн.}$$

- від заміни проєктним маніпулятором робота з традиційною кінематикою:

$$E_{p(2)} = (0,092 - 0,075) \times 1000000 - 0,16 \times 210900 = -16744 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{ок} = \frac{K_d}{(B_{e,баз} - B_{e,пр}) \times N_d}$$

- порівняно з ручним сортуванням продукції:

$$T_{ок(1)} = \frac{438900}{(0,196 - 0,075) \times 1000000} = 3,6 \text{ р.}$$

- порівняно з базовим роботом:

$$T_{ок(2)} = \frac{210900}{(0,092 - 0,075) \times 1000000} = 12,4 \text{ р.}$$

Таблиця 4

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1.	Програма сортування та пакування продукції, упаковок/рік	уп./рік	1000000	1000000	—
2.	Потреба в роботах для виконання річної програми сортування та пакування продукції	шт./рік	1	1	—
	Коефіцієнт завантаження робота		0,52	0,17	-67,3
3.	Норма часу на виконання операції сортування та пакування	хв/уп.	0,125	0,042	-33,6
4.	Оптова ціна маніпулятора	грн	200000	385000	+92,5
5.	Собівартість виконання сортувальної операції	грн.	0,092	0,075	-81,5
6.	Річний економічний ефект:				
	- від заміни проектним маніпулятором ручного сортування продукції (вар. 1);	грн.	—	50776	—
	- від заміни проектним маніпулятором робота з традиційною кінематикою (вар. 2)	грн.	—	-16744	—
7.	Строк окупності додаткових капітальних витрат:				
	- у варіанті 1	років	—	3,6	—
	- у варіанті 2	років	—	12,4	—
8.	Економія чисельності робітників:				
	- при застосуванні робота з традиційною кінематикою;	осіб	—	1,5	—
	- при застосуванні проектного маніпулятора	осіб	—	4	—

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі за другим (магістерським) рівнем вищої освіти розв'язане важливе науково-технічне завдання визначення конструктивних залежностей п'ятикоординатного робота, побудованого на основі паралельних кінематичних структур, для мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- проведено огляд існуючих типів промислових роботів;
- проаналізовані тенденції розвитку промислових роботів;
- обрано прототипи для пропонованої конструкції п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розроблено схему конструкції п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- визначено конструктивні залежності п'ятикоординатного робота для мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.

У результатах аналізу сфери промислових роботів виявлено, що на поточному етапі її розвитку переважають дві тенденції, застосування маніпуляторів з замкненими кінематичними ланцюгами та розміщення двигунів приводів на елементах основи робота. Технологічне обладнання побудоване на основі паралельних кінематичних структур повною мірою задовольняє сучасних тенденціям. У цій роботі було запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур. Перевагою даної конструкції є поєднання двох основних тенденцій розвитку робототехніки а також розмежування кінематичних рухів виконавчого органу робота на лінійні і кутові переміщення. Це повною мірою дозволяє суттєво розширити величини рухів в іншому випадку мінімізувати габарити робота в порівнянні з конструкціями, де такого функціонального розмежування переміщень не відбувається.

На підставі розробленої схеми конструкції робота отримано конструктивні залежності для синтезу приводу лінійних переміщень рухомої платформи та приводу повороту захватного, що дозволяє розрахувати координати розташування напрямних повзунів переміщення штанг та довжини самих штанг при забезпеченні повної свободи рухів руки у межах обраного робочого простору, що має формою циліндра. На основі проведених досліджень конструктивних залежностей, основними висновками якого є рекомендація, щодо вибору значення запобіжного кута δ для мінімізації габаритів механізму не повинні бути більшими, ніж 10 градусів, а також рекомендація порядку розрахунку координат розташування прямої повзуна переміщення штанги приводу повороту руки та повороту захватного пристрою, за якої значення координати N повинно задаватися в першу чергу, до розрахунку значення координати M. Також підтверджено, що мінімізація конструктивних параметрів виконавчого органу робота буде сприяти зменшенню його габаритних розмірів.

Додатково до поставленої мети підтверджено економічну ефективність від впровадження проекту п'ятикоординатного робота. Що надало можливість зменшити норму часу на виконання операції сортування та зменшити коефіцієнт завантаження обладнання дані фактори дають змогу збільшити обсяг програму випуску продукції.

Список використаних джерел:

1. Ю.М. Кузнєцов, д-р техн. наук, Київ, Україна, Еволюційний і генетичний синтез технологічного обладнання нового покоління;
2. Валявський І.А. Модульна побудова технологічного обладнання з паралельною кінематикою. Вісник ЖДТУ №4 (31). - 19 с;
3. Кузнєцов Ю.М. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури: монографія / Ю.М. Кузнєцов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич; під ред. Ю.М. Кузнєцова. – Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с;
4. В. А. Данілов, А. А. Данілов АНАЛІЗ І СИНТЕЗ КІНЕМАТИЧНОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛОРИЗЖИХ ВЕРСТАТИВ / Мінськ БНТУ 2018 р.
5. Gallardo J, Lesso R, Rico JM, et al. The kinematics of modular spatial hyper-redundant manipulators formed from RPS-type limbs. Robot Auton Syst 2011; 59(1): 12–21.
6. Hu B and Yu J. Unified solving inverse dynamics of 6-DOF serial Cparallel manipulators. Appl Math Model 2015; 39(16): 4715–4732.
7. Kelaiaia R, Zaatri A, and Chikh L. Some investigations into the optimal dimensional synthesis of parallel robots. Int J Adv Manuf Technol 2016; 83(9–12): 1525–1538.
8. Пат. на кор. модель 122703 Україна, МПК (2006) B23Q5/00 B23Q5/32 (2006.01). Верстат з комбінованою кінематичною структурою / Гречка А.І., Лимар Я.В.; заявник і патентовласник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u201707219; заявл. 10.07.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.
9. Пат. на кор. модель 131326 Україна, МПК (2006) B23Q5/00. П'ятикоординатний механізм паралельної структури з трьома напрямними / Гречка А.І., Ковальчук А.В., Лесь В.С.; заявник і патентовласник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u201807696; заявл. 09.07.2018; опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1.

10. «Визначення конструктивних залежностей п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур», Максим ВОВК, Андрій ГРЕЧКА.
11. «Синтез механізму паралельної структури з чотирма штангами постійної довжини та похилою напрямною повзуна повороту робочого органа», Руслан ГАЛКА, Андрій ГРЕЧКА.
12. Кириченко А.М. Наукові основи створення мехатронних систем просторового переміщення шпинделя багатокоординатних верстатів [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Кириченко Андрій Миколайович ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - К., 2012. - 39 с.
13. Бушуев В.В., Хольшев И.Г. Механизмы паралельной структуры в машиностроении // СТИН. – 2001. - № 1. С. 3-8.
14. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы паралельной структуры. – М.: Наука, 1991.
15. Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В. Обработка на основе механизмов паралельной структуры / Под общ. ред. В.Л. Афолина. М.: Учебное пособие. Издательство МГТУ СТАНКИН, Янус – К., 2006. – 452 с.
16. Valasek M., Bauma V., Sika Z., Belda K., Pisa P.. Design-by-Optimization and Control of Redundantly Actuated Parallel Kinematics Sliding Star // Multibody System Dynamics (2005) 14: P. 251-267.
17. Tonshoff H., Denkena B., Gynter G., Mohring H.. Modelling of Error Effects on the New Hybrid Kinematic DUMBOStructure. 3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar: Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics. Chemnitz 2002, P. 639-653.
18. Chen J-S., Kuo Y-H., Hsu W-Y.. The influence of friction on contouring accuracy of a Cartesian guided tripod machine tool // Int. J. Adv. Manuf. Technol. (2006) 30: 470-478.
19. Патент Німеччини № DE 1994092/A1. МПК В23С3/04, опубл. 01.03.2001.

20. Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В.. Обработка на основе механизмов параллельной структуры / Под общей редакцией В.Л. Афонова. М.; Учебное пособие. Издательство МГТУ СТАНКИН, Янус – К., 2006. – 452 с.

21. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. /Під. ред. Ю.М. Кузнецова - Кіровоград, 2004. - 449 с.

22. Разновиды механизмов параллельной структуры В.А. Глазунова, А.Ф. Крайнева, А.Ш. Коліскара.

23. Бушуев В.В. Мехатронные системы в станках // СТИН – 1998. - № 9, 10.

24. Кириченко А.М., Козаченко Ю.А. Аналіз компоновок верстатного обладнання з комбінованою кінематикою // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / – вип. 16. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – С. 162-169.

25. Заїка С. М. Точність верстатів із плоскими механізмами паралельної структури / С. М. Заїка, А. М. Кириченко // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки». – Суми : СумДУ, 2010. – № 4. – С. 19-23

26. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ./ Під ред. Ю.М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004.- 449 с.