

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

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«_____» _____ 2022 р.

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

**«Визначення конструктивних залежностей
п'ятикоординатного робота на основі
паралельних кінематичних структур»**

Виконав здобувач вищої освіти II-го
курсу групи ПМ(ТМ)-21М1,4
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності 131 «Прикладна
механіка»

_____ Максим БОВК

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА

Рецензент:

Анотація

BOBK Максим. Визначення конструктивних залежностей п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур. Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2022. – 72 с. Матеріали презентації 10 іл.

Запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур. Розроблено розрахункові схеми та отримано конструктивні залежності окремо для приводів лінійних та кутових переміщень. Проведено дослідження конструктивних параметрів п'ятикоординатного робота. Результати дослідження представлено у вигляді графіків.

Очікуваний економічний ефект у виробника продукції в складає 19840 грн, у споживача – 8900 грн.

Актуальність: запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур, що забезпечують його відповідність двом основним тенденціям розвитку робототехніки: застосування замкнених кінематичних ланцюгів та розміщення двигунів приводів на базисному елементі конструкції; отримано конструктивні залежності, що забезпечують задану рухомість механізму при мінімальних його габаритах.

Практичне значення: запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур та вивчено його конструктивні залежності для мінімізації габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у заданому робочому просторі.

Ключові слова: робот, паралельні кінематичні структури, мінімізація габаритних розмірів.

Summary

VOVK Maksim. Determination of structural dependencies of a five-coordinate robot based on parallel kinematic structures. Qualification work at the second (master's) level of higher education: CUNTU, 2022.– 72 p. Presentation materials 10 il.

It is proposed a new construction of a five-coordinate robot based on parallel kinematic structures. Calculation schemes were developed and structural dependencies were obtained separately for linear and angular movements drives. The design parameters of a five-coordinate robot were studied. The results of calculations are presented in the form of graphs.

The expected economic effect for the producer of products is UAH 19,840, for the consumer – UAH 8,900.

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

ЗМІСТ

	сторінка
ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ І	
ОГЛЯД ПРОТОТИПІВ	6
1.1 Класифікація промислових роботів	6
1.2 Функціональні властивості, структура та основні визначення	
характеристик промислових роботів	8
1.3 Огляд прототипів на основі механізмів паралельної кінематики	22
1.4 Мета і задачі досліджень	26
РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА НА ОСНОВІ	
МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ	29
2.1 Опис пропонованої конструкції робота	29
2.2 Синтез приводу переміщення рухомої платформи	32
2.3 Синтез приводу повороту руки та орієнтації захватного	
пристрою	39
2.4 Дослідження конструктивних залежностей робота	43
РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ	
П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА	54
3.1 Загальні вихідні дані	54
3.2 Визначення витрат на підготовку виробництва	55
3.3 Визначення повної собівартості та оптової ціни проектного	
робота	56
3.4 Визначення експлуатаційних витрат при застосуванні роботів	61
3.5 Розрахунок показників економічної ефективності	66
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71

ВСТУП

Актуальність роботи. Промислова робототехніка є галуззю, що активно розвивається вже на протязі тривалого часу. Широке впровадження роботів у промисловість призвело до виникнення великої кількості їх конструкцій. Значна номенклатура виробів покликана забезпечити потреби споживачів, часто з протилежними вимогами. Поряд з тим накопичений досвід у конструюванні, виробництві і експлуатації цього виду продукції дозволяє виокремити основні тенденції розвитку даної сфери промисловості. Очікувано вони співпадають з тенденціями розвитку більш глобальної області виробництва і експлуатації технологічного обладнання широкого спектру застосування. Покращення динамічних характеристик неодмінно позначається на зростанні продуктивності роботи маніпуляторів, місцями призводить і до збільшення точності виконуваних операцій. Підвищення енергоефективності, окрім прямих вигод у вигляді економії енергоресурсів, опосередковано також позначається на покращенні динамічних якостей обладнання.

Примітно, що одним із шляхів забезпечення зазначених тенденцій розвитку робототехніки є використання маніпуляторів з замкненими кінематичними ланцюгами та розміщення двигунів приводів на елементах основи робота. Подібним тенденціям у повній мірі задовольняє технологічне обладнання, побудоване на основі паралельних кінематичних структур. Широке впровадження даного принципу і для технологічного обладнання, призначеного для здійснення технологічних операцій з обробки матеріалів різанням, відкриває перспективи застосування модульного підходу до виробництва і експлуатації технологічного обладнання. Використання базового елемента поряд з додатковим оснащенням змінними модулями дозволить використовувати обладнання як для здійснення транспортних операцій, так і операцій для обробки матеріалів різанням, в залежності від потреб і вимог споживачів. 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 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. Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- огляд існуючих типів промислових роботів;
- аналіз тенденцій розвитку промислових роботів;
- вибір прототипів для пропонованої конструкції п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розробка схеми конструкції п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- визначення конструктивних залежностей п'ятикоординатного робота 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 – п'ятикоординатний робот на основі паралельних кінематичних структур.

Предмет дослідження – залежності конструктивних параметрів п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур.

Практичне значення – запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур та

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

Особистий внесок – розроблено схему та визначено конструктивні залежності п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур 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

На сьогоднішній день загальноприйнятою є наступна різниця між поняттями «промисловий робот» і «маніпулятор». Промисловий робот – це машина, що працює в автоматичному режимі, і складається з маніпулятора і пристрою програмного управління його рухами, та призначена для вивільнення людини при виконанні різнопланових операцій у виробничих процесах. Маніпулятор – це сукупність просторового (іноді плоского) важільного механізму та системи приводів, що під керуванням запрограмованого пристрою або за командами людини-оператора здійснює необхідні дії (маніпуляції), які за своєю суттю аналогічні діям руки людини. Таким чином, «маніпулятор» є менш загальним поняттям, що включає механічну частину пристрою та його приводні двигуни. «Промисловий робот» є більш загальним поняттям, оскільки додатково включає і систему управління.

В якості класифікації промислових роботів наведемо взятий з джерела [1] наступний перелік ознак.

За характером виконуваних технологічних операцій:

- о основні;
- о допоміжні;
- о універсальні.

За видом промислового виробництва:

- о ливарні;
- о зварювальні;
- о кувально-штампувальні;
- о для механічної обробки;

- о складальні;
- о фарбувальні;
- о транспортно-складські.

За системою координат руки маніпулятора:

- о прямокутна;
- о циліндрична;
- о сферична;
- о сферична кутова (ангулярна);
- о інші комбінації.

За числом рухомостей маніпулятора.

За вантажопідйомністю:

- о надлегкі (до 10 Н);
- о легкі (до 100 Н);
- о середні (до 2000 Н);
- о важкі (до 10000 Н);
- о надважкі (понад 10000 Н).

За типом силового приводу:

- о електромеханічний;
- о пневматичний;
- о гідравлічний;
- о комбінований.

За рухомістю основи:

- о мобільні;
- о стаціонарні.

За видом програми керування:

- о з жорсткою програмою;
- о перепрограмовані;
- о адаптивні;
- о з елементами штучного інтелекту.

За характером програмування:

- о позиційне;
- о контурне;
- о комбіноване.

Можна зазначити, що даний перелік ознак не є вичерпним, та розширюється в залежності від специфіки застосування промислових роботів.

1.2 Функціональні властивості, структура та основні визначення характеристик промислових роботів

Основним функціональним призначенням маніпулятора промислового робота є забезпечення руху вихідної ланки та закріпленого в ній об'єкта маніпулювання, причому за заданою траєкторією і з заданою орієнтацією у просторі. Для повного виконання цих вимог важільний механізм маніпулятора повинен мати не менше шести рухомостей, причому рух за кожною з цих рухомостей повинен бути керованим. Такий промисловий робот з шістьма рухомостями є складною автоматичною системою, складною як у виготовленні, так і в експлуатації. Все це буде відображатися на вартості як робота, так і кінцевої продукції, у виробництві якої він задіяний. Тому в реальних конструкціях промислових роботів часто використовуються конструкції механізмів з числом рухомостей менше шести. Найбільш прості маніпулятори мають три, а іноді і дві, рухомості. Звісно, що такі маніпулятори значно простіші і дешевші у виготовленні, проте їх технологічна функціональність буде обмеженою. Це висуває додаткові вимоги до організації робочого простору маніпулятора. Найчастіше такі прості конструкції застосовуються у складі робото-технологічних комплексів, де жорстко задається орієнтація об'єктів маніпулювання, так і самих елементів маніпулятора у складі технологічної машини вищого рівня.

Розглянемо для прикладу структурну і функціональну схему маніпулятора з трьома рухомостями. Основний механізм такого маніпулятора складається з нерухомої ланки 0 і трьох рухомих ланок 1, 2 і 3, як показано на рис. 1.1.

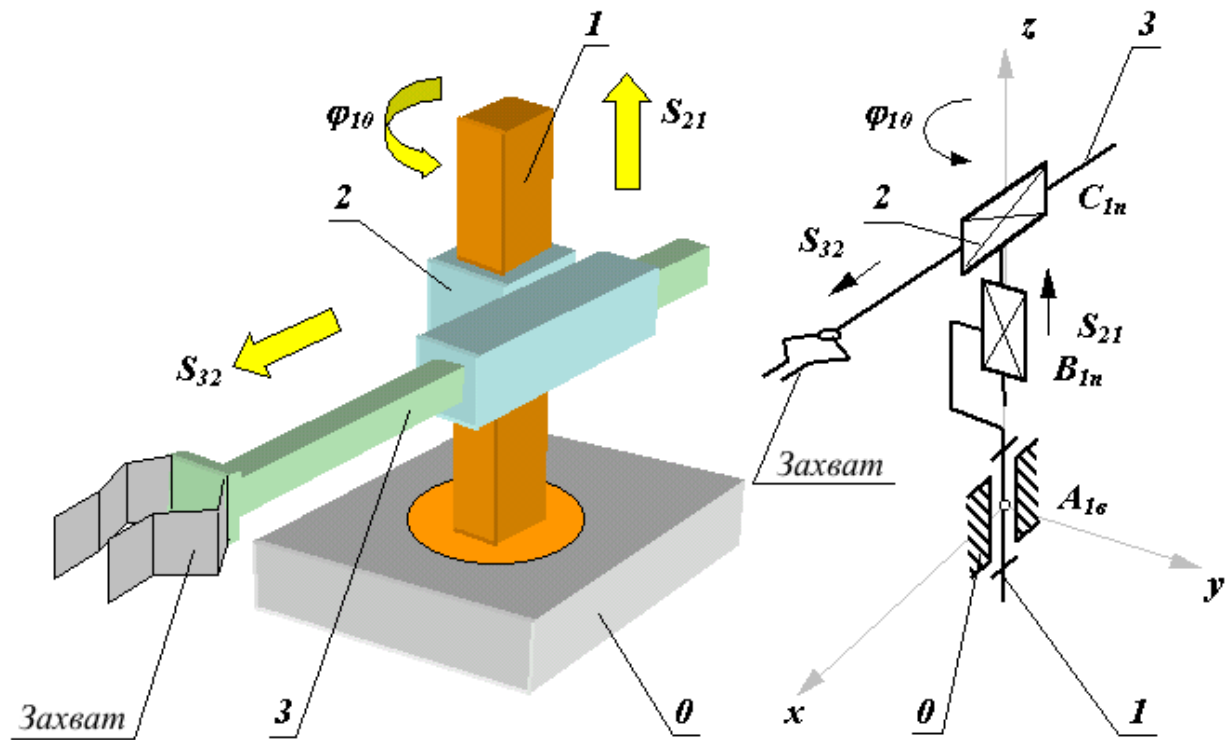


Рис. 1.1 – Структурна схема маніпулятора з трьома рухомостями

Механізм цього маніпулятора відповідає циліндричній системі координат. У цій системі ланка 1 може обертатися щодо ланки 0 (відносне кутове переміщення φ_{10}), ланка 2 переміщається по вертикалі щодо ланки 1 (відносне лінійне переміщення S_{21}) і ланка 3 переміщається в горизонтальній площині щодо ланки 2 (відносне лінійне переміщення S_{32}). На кінці ланки 3 кріпиться захватний пристрій або захват, призначений для захвату й утримання об'єкта маніпулювання при роботі маніпулятора. Ланки основного важільного механізму маніпулятора утворюють між собою три однорухомі кінематичні пари (одну обертальну А і дві поступальні В і С) та можуть забезпечити переміщення об'єкта в просторі без керування його орієнтацією. Для виконання кожного із трьох відносних рухів маніпулятор

повинен бути оснащений приводами, що складаються з редукторних двигунів і системи датчиків зворотного зв'язку. Оскільки рух об'єкта здійснюється за заданим законом руху, то в системі керування повинні бути пристрої, що задають і зберігають програму руху, які назовемо програмоносіями. При керуванні від ЕОМ такими пристроями можуть бути флешки, картки пам'яті, диски й ін. Перетворення заданої програми руху в сигнали керування двигунами здійснюється системою керування. Ця система включає ЕОМ, з відповідним програмним забезпеченням, цифроаналогові перетворювачі й підсилювачі. Система керування, відповідно до заданої програми, формує й видає на виконавчі пристрої приводів (двигуни) керуючі впливи u_i . При необхідності вона коректує ці впливи по сигналах Δx_i , які надходять до неї з датчиків зворотного зв'язку. Функціональна схема промислового робота наведена на рис. 1.2.

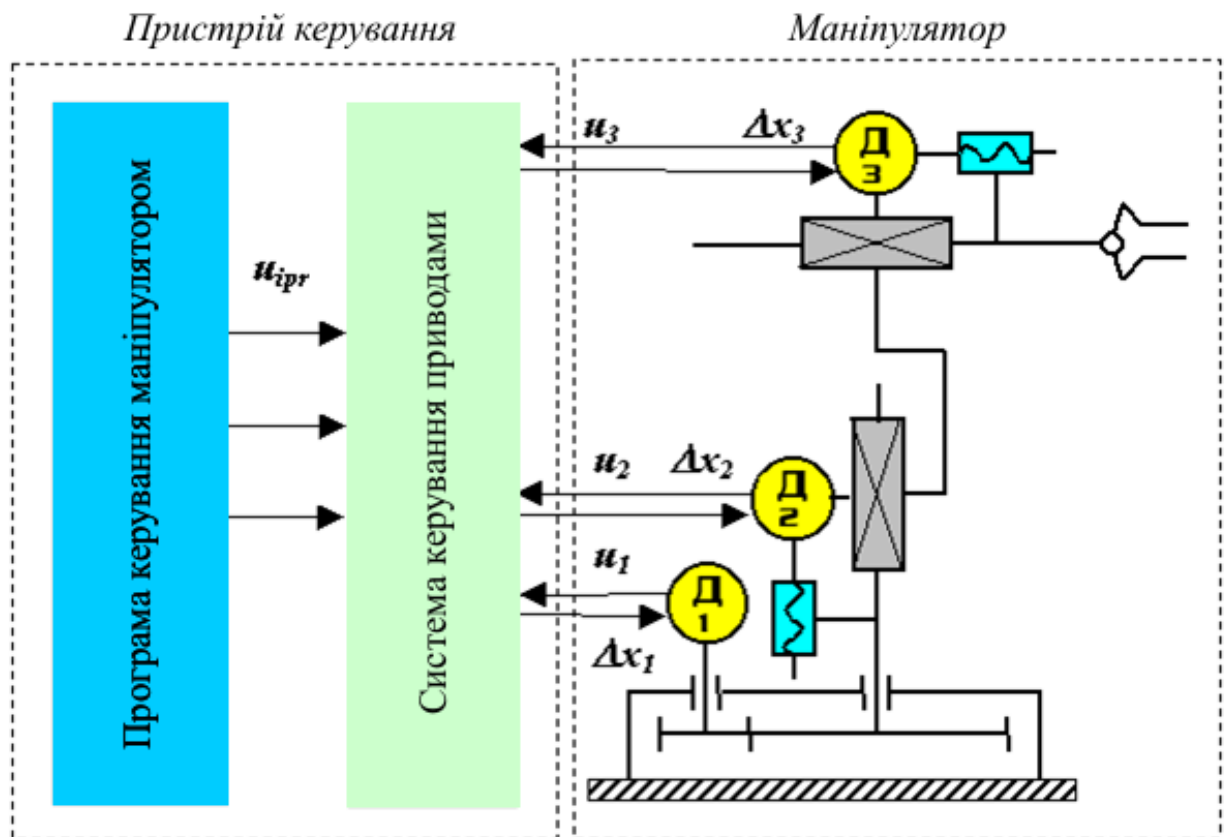


Рис. 1.2 – Функціональна схема промислового робота з трьома рухомостями

Для опису структури маніпуляторів часто використовують формули їх будови. Формула будови маніпулятора – це математичний запис структурної схеми маніпулятора, що містить інформацію про число його рухомостей, види кінематичних пар і їх орієнтацію відносно осей базової системи координат (системи, що пов'язана з нерухомою ланкою).

Рухи, які забезпечуються маніпулятором, діляться на:

- *глобальні* (для роботів з рухомою основою) – рухи стійки маніпулятора, котрі суттєво перевищують розміри механізму;
- *регіональні* (транспортні) – рухи, що забезпечуються першими трьома ланками маніпулятора або його «рукою», величина котрих співставна з розмірами механізму;
- *локальні* (орієнтуючі) – рухи, що забезпечуються ланками маніпулятора, котрі утворюють його «кисть», величина яких значно менше розмірів механізму.

У відповідності з цією класифікацією рухів, в маніпуляторі можна виділити дві ділянки кінематичного ланцюга з різними функціями: механізм руки і механізм кисті. Під «рукою» розуміють ту частину маніпулятора, яка забезпечує переміщення центру захвату – точки М (регіональні рухи захвату); під «кистю» – ті ланки і пари, які забезпечують орієнтацію захвату (локальні рухи захвату).

Розглянемо структурну схему антропоморфного маніпулятора, тобто схему, яка в першому наближенні відповідає механізму руки людини (рис.1.3).

Цей механізм складається із трьох рухомих ланок і трьох кінематичних пар: двох трьохрухомих сферичних $A_{3сф}$ і $C_{3сф}$ і однієї однорухомої обертальної $B_{1в}$.

Кінематичні пари маніпулятора характеризуються: іменем або позначенням - заголовна буква латинського алфавіту (А, В, С і т.д.); ланками, які утворюють пари (0/1, 1/2 і т.п.); відносним рухом ланок у парі (для

однорухомих пар - обертальний, поступальний і гвинтовий); рухомістю кінематичної пари (для нижчих пар від 1 до 3, для вищих пар від 4 до 5); віссю орієнтації осі кінематичної пари відносно осей базової або локальної системи координат.

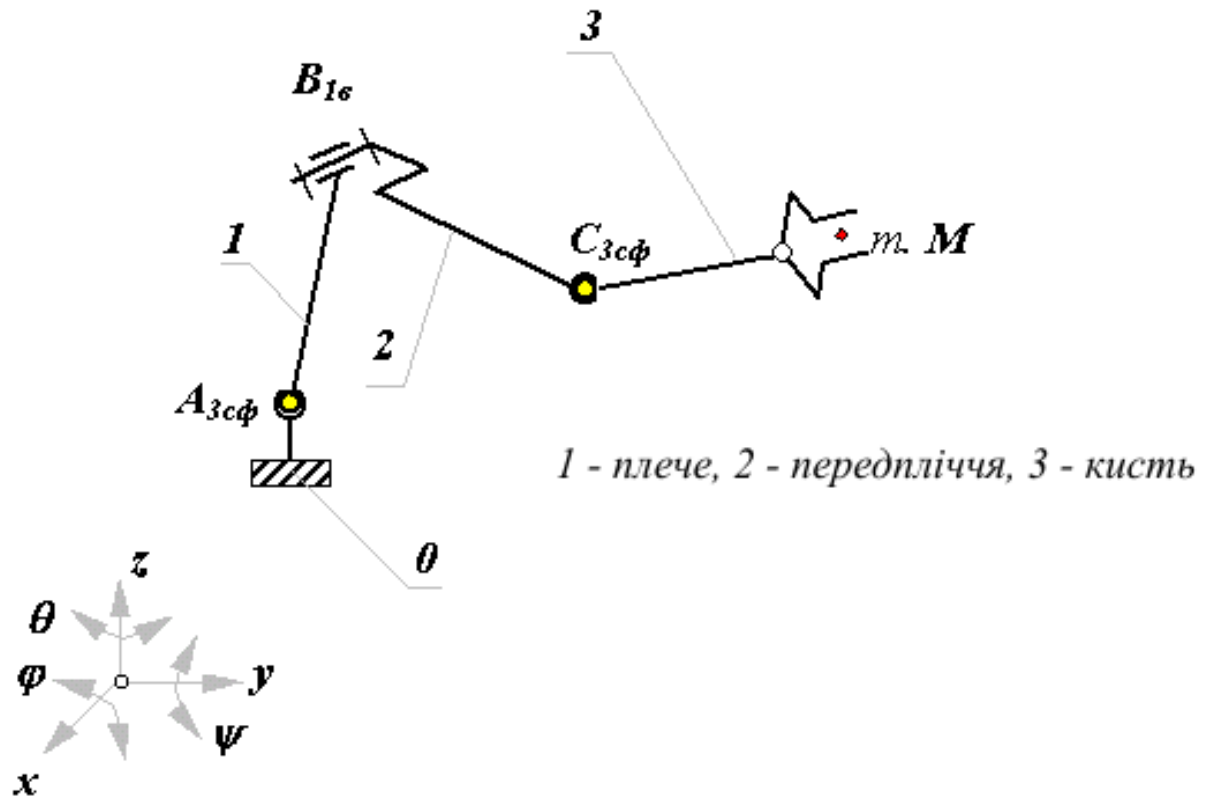


Рис. 1.3 – Схема антропоморфного маніпулятора

Розглянемо наступні вагомні поняття та визначення.

Робочий простір маніпулятора - частина простору, обмежена поверхнями, що обгинають до множини можливих положень його ланок.

Зона обслуговування маніпулятора - частина простору, що відповідає множині можливих положень центру захвату маніпулятора. Зона обслуговування є важливою характеристикою маніпулятора. Вона визначається структурою й системою координат руки маніпулятора, а також конструктивними обмеженнями, накладеними відносними переміщеннями ланок у кінематичних парах.

Рухомість маніпулятора W – це число незалежних узагальнених координат, що однозначно визначають розташування захвату в просторі. Визначається за формулою:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 (6 - i)p_i$$

Або у випадку незамкнених кінематичних ланцюгів:

$$W = \sum_{i=1}^5 i \cdot p_i$$

Маневровість маніпулятора M – це рухомість маніпулятора при зафіксованому (нерухомому) захваті:

$$M = W - 6$$

Можливість зміни орієнтації захвату при розміщенні його центра в заданій точці зони обслуговування характеризується кутом сервісу ψ , що його може описати остання ланка маніпулятора (ланка, на якій закріплено захват) при фіксації центра захвата в заданій точці зони обслуговування. Визначається за формулою:

$$\psi = f_C / l_{CM}^3,$$

де f_C – площа сферичної поверхні, що описується точкою C ланки 3, l_{CM} – довжина ланки 3.

Відносна величина $k_\psi = \psi / (4\pi)$ називається коефіцієнтом сервіса.

Таким чином, для антропоморфного маніпулятора його рухомість становить

$$W = 6 \cdot 3 - (3 \cdot 2 + 5 \cdot 1) = 18 - 11 = 7,$$

маневровість

$$M = 7 - 6 = 1,$$

формула побудови

$$W = [\Theta_{10} + \Phi_{10} + \Psi_{10}] + \Phi_{11} + [\Theta_{32} + \Phi_{32} + \Psi_{32}].$$

Структура кінематичного ланцюга маніпулятора повинна забезпечувати необхідне переміщення об'єкту в просторі з заданою орієнтацією. Для цього необхідно, щоб захват маніпулятора мав можливість виконувати рухи мінімум по шести координатам: трьом лінійним і трьом кутовим. Розглянемо на об'єкті маніпулювання точку M , яка співпадає з центром захвата. Розташування об'єкта в нерухомій (базовій) системі координат $Ox_0y_0z_0$ визначається радіус-вектором точки M і орієнтацією одиничного вектора $\bar{A}$ з початком у цій точці. В математиці розташування точки у просторі задається в одній з трьох систем координат:

- прямокутній декартовій з координатами x_M, y_M, z_M ;
- циліндричній з координатами r_{sM}, φ_M, z_M ;
- сферичній з координатами r_M, φ_M, θ_M .

Орієнтація об'єкта у просторі задається кутами α, β і γ , що їх вектор орієнтації $\bar{A}$ утворює з осями базової системи координат. На рис. 1.4 наведено схему шести рухомого маніпулятора з обертальними кінематичними парами з координатами об'єкта маніпулювання.

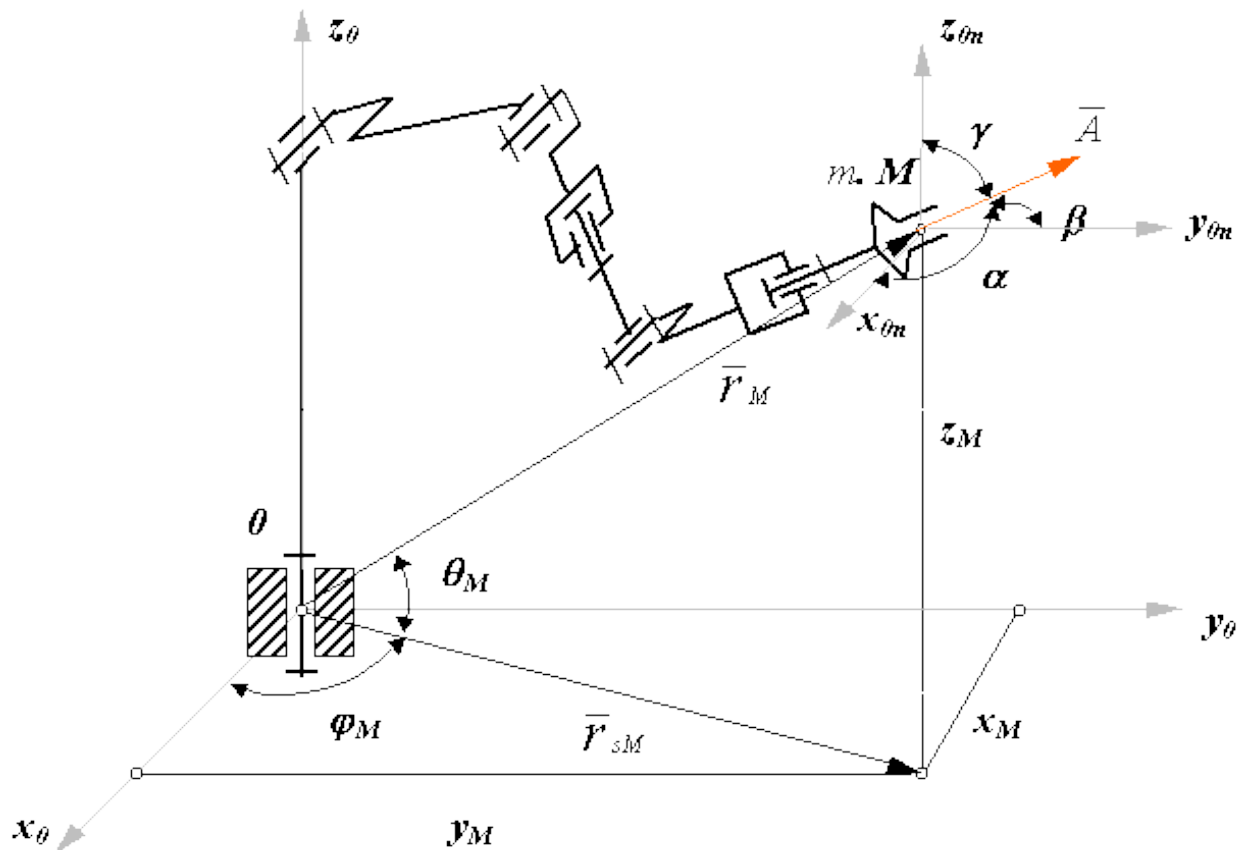
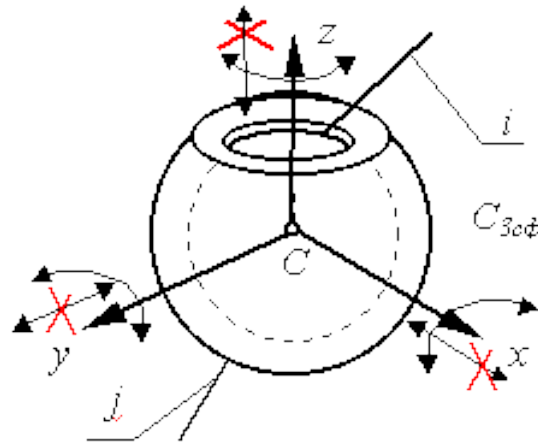


Рис. 1.4 – Умовне позначення координат об'єкта маніпулювання

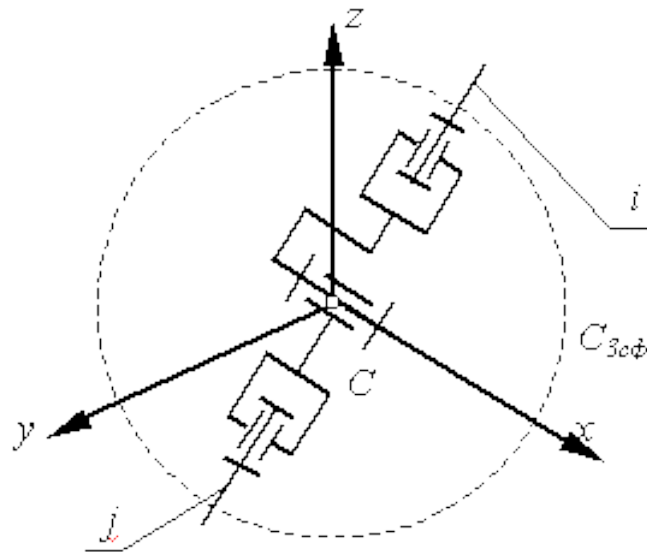
При структурному синтезі механізму маніпулятора необхідно враховувати наступне:

- кінематичні пари маніпуляторів забезпечуються приводами, що включають двигуни і пристрої гальмування, тому в схемах маніпуляторів зазвичай використовуються однорухомі кінематичні пари: обертальні або поступальні;
- необхідно забезпечити не тільки задану рухомість захвату маніпулятора, але й таку орієнтацію осей кінематичних пар, яка б забезпечувала необхідну форму зони обслуговування, а також простоту й зручність програмування його рухів;
- при виборі орієнтації кінематичних пар необхідно враховувати розташування приводів (на основі або на рухомих ланках), а також спосіб врівноваження сил ваги ланок.

При виконанні першої умови кінематичні пари з декількома рухомостями замінюють еквівалентними кінематичними з'єднаннями. Приклад такого з'єднання для сферичної пари наведено на рис. 1.5.



Сферична кінематична пара



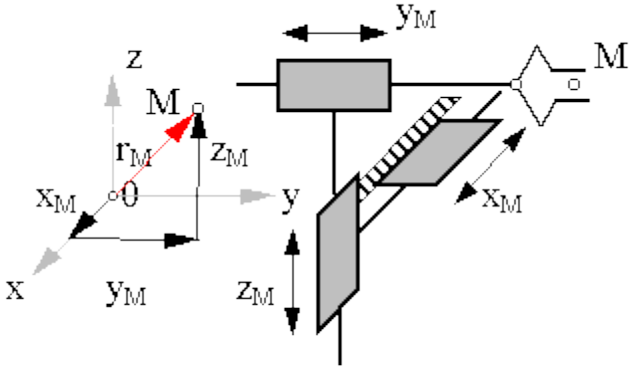
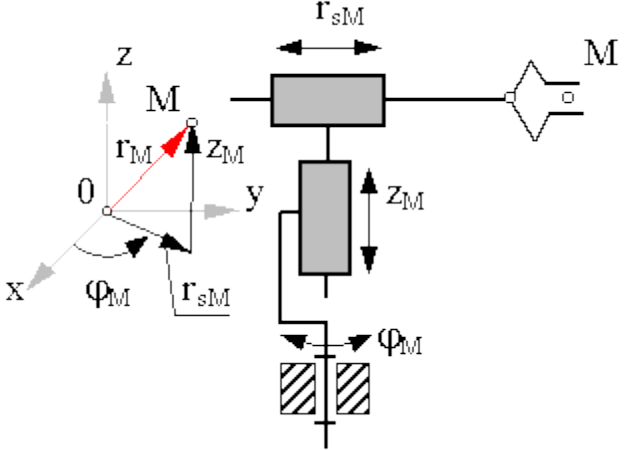
Еквівалентне кінематичне з'єднання

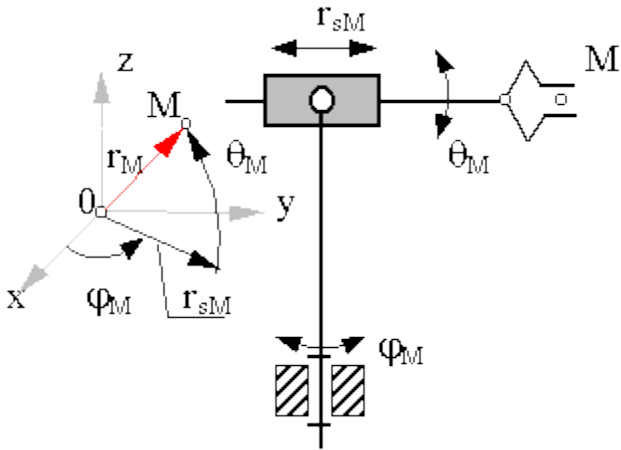
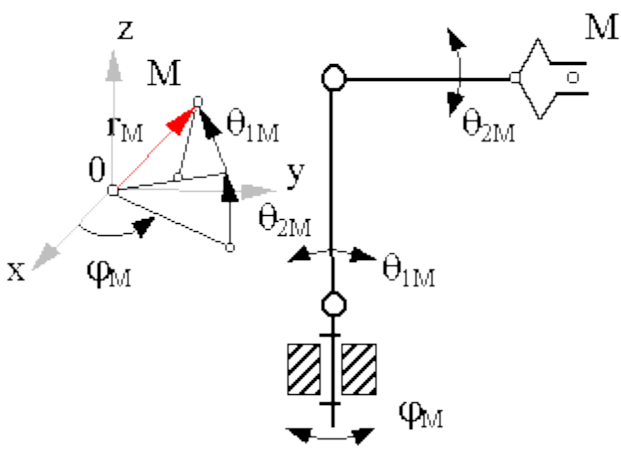
Рис. 1.5 – Заміна багаторухомої кінематичної пари еквівалентним кінематичним з'єднанням з трьома однорухомими кінематичними парами

Переміщення захвату в просторі можна забезпечити, якщо орієнтувати осі перших трьох кінематичних пар по осях однієї з осей координат. При цьому вибір системи координат визначає тип руки маніпулятора й вид його

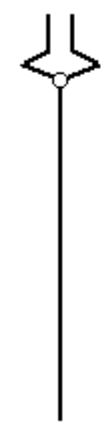
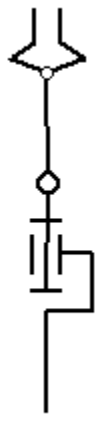
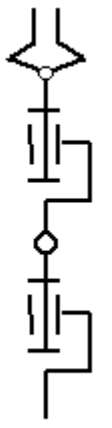
зони обслуговування. В таблиці 1.1 наведені види систем координат для руки маніпулятора. В ній подано приклади структурних схем механізмів, що відповідають системам координат. Структурні схеми механізмів кисті, застосовувані в маніпуляторах, подано в таблиці 1.2. Приєднуючи до вихідної ланки руки той чи інший механізм кисті, можна отримати більшість відомих структурних схем маніпуляторів, які застосовуються в реальних промислових роботах.

Таблиця 1.1 – Системи координат «руки» маніпулятора

 Прямокутна (декартова)	 Циліндрична
---	---

 Сферична
 Кутова (ангулярна)

Таблиця 1.2 – Структурні схеми кисті маніпулятора

				
---	---	---	---	---

Структура маніпулятора також визначається і місцем розташування приводів. Якщо приводи розташовуються безпосередньо в кінематичних парах, то до мас рухомих ланок маніпулятора додаються маси приводів. Сумарне навантаження на приводи і їх потужність збільшуються, а відношення маси маніпулятора до корисного навантаження (максимальній масі об'єкта маніпулювання) – зменшується. Тому при проектуванні роботів приводи ланок руки, як найбільш потужні і такі, що володіють більшою масою, прагнуть розташувати ближче до основи робота. Для передачі руху від привода до ланки використовуються додаткові кінематичні ланцюги. Розглянемо схему руки маніпулятора промислового робота фірми ASEA (рис. 1.6). До трьохланкового механізму з ангулярною системою координат додані:

- для привода ланки 2 – найпростіший кулісний механізм, утворений ланками 4, 5 і 2;
- для привода ланки 3 – ланцюг, що складається з кулісного механізму (ланки 6, 7 і 8) і шарнірного чотирьохланкового механізму (ланки 8, 9, 2 і 3).

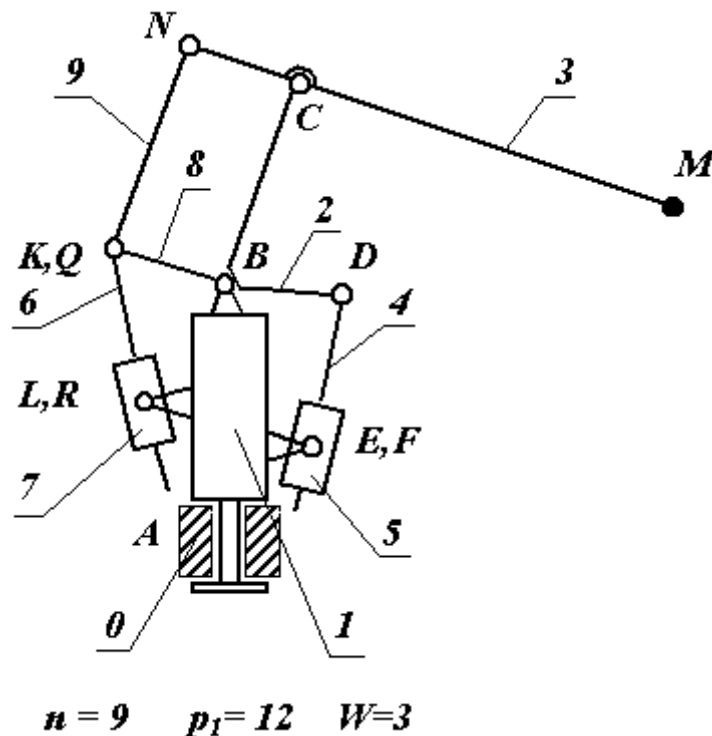


Рис. 1.6 – Схема руки маніпулятора ASEA

Таким чином, у важільному механізмі можна виділити кінематичний ланцюг руки (ланки 1, 2 і 3) і кінематичні ланцюги приводів. Маніпулятори, що використовують принцип розміщення приводів на основі, мають більш складні механізми. Однак збільшення числа ланок і кінематичних пар компенсується зменшенням мас і моментів інерції рухомих ланок маніпулятора. Крім того, замкнені кінематичні ланцюги підвищують точність і жорсткість механізму. В цілому маніпулятори, що використовують принципи комбінованого розміщення приводів (частина приводів на основі, частина на рухомих ланках), мають кращі енергетичні й динамічні характеристики, а також більш високу точність.

В кінематичних схемах розглянутих маніпуляторів ваги ланок викликають додаткове навантаження на приводи. Фірма SKILAM розробила робот SANCIO (рис. 1.7), у якому ваги приводів і ланок сприймаються кінематичними парами, а на момент двигунів впливають тільки через сили тертя. Така структурна схема механізму зажадала збільшення розмірів кінематичних пар, однак в цілому був отриманий істотний виграш по енергетичних і динамічних показниках.

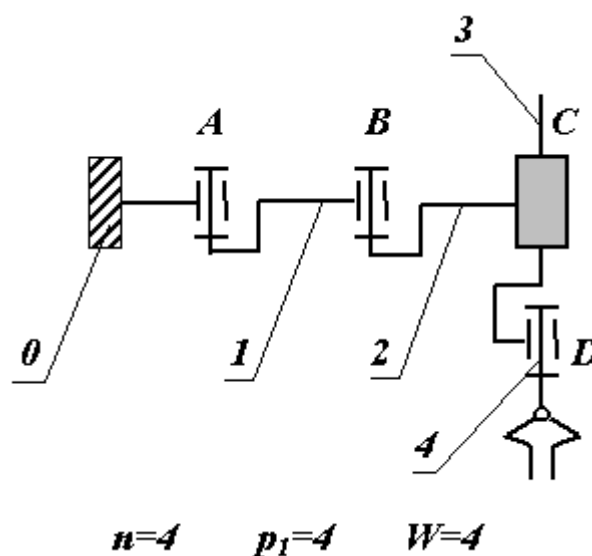


Рис. 1.7 – Схема руки маніпулятора SANCIO

Дані приклади не охоплюють усіх можливих ситуацій раціонального вибору структури маніпуляторів. Вони тільки демонструють найбільш відомі із вдалих структурних схем.

Важливою особливістю маніпуляторів є зміна структури механізму в процесі роботи. Відповідно до програми роботи робота, у деяких кінематичних парах додаються пристрої гальмування. При цьому дві ланки механізму жорстко з'єднуються одна з одною, утворюючи одна ланку. Зі структурної схеми механізму виключається одна кінематична пара і одна ланка, число рухомостей захвата механізму зменшується (на одиницю). Змінюється структура механізму і у тих випадках, коли в процесі виконання робочих операцій, наприклад, при складанні або зварюванні, захват з об'єктом маніпулювання стикається з навколишніми предметами, утворюючи з ними кінематичні пари. Кінематичний ланцюг механізму замикається, а число рухомостей зменшується. У цьому випадку в ланцюзі можуть виникати надлишкові зв'язки. Ці структурні особливості маніпуляторів необхідно враховувати при програмуванні роботи промислового робота.

Швидкодія промислового робота визначається максимальною швидкістю лінійних переміщень центру захвата маніпулятора. Розрізняють промислові роботи із малою ($V_M < 0.5$ м/с), середньою ($0.5 < V_M < 1.0$ м/с) і високою ($V_M > 1.0$ м/с) швидкістю. Сучасні промислові роботи мають в основному середню швидкість і тільки близько 20% – високу.

Точність маніпулятора промислового робота характеризується абсолютною лінійною погрішністю позиціонування центру захвата. Промислові роботи діляться на групи з малою ($\Delta r_m > 1$ мм), середньою (0.1 мм $< \Delta r_m < 1$ мм) і високою ($\Delta r_m < 0.1$ мм) точністю позиціонування.

1.3 Огляд прототипів на основі механізмів паралельної кінематики

Як було зазначено в попередньому пункті, промислові роботи з розміщенням приводів на основі та замкненими кінематичними ланцюгами володіють більш високими характеристиками жорсткості. Використання для побудови маніпуляторів механізмів на основі паралельних кінематичних структур дозволить уникнути нагромадження мас рухомих ланок маніпуляторів. Наведемо приклади механізмів з паралельною кінематикою, що можуть бути використані у якості прототипу для нової конструкції промислового робота.

У роботі [2] показано верстат з комбінованою кінематикою. Метою даного виходу є підвищення рухомості вихідного органа зі шпинделем з приводом його переміщень на основі паралельних кінематичних структур з чотирма штангами шляхом розділення штанг на функціональні групи та забезпечення довільного взаємного просторового розташування шпинделя відносно заготовки.

Вказана мета досягається тим, що у пропонованому рішенні вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром, причому три штанги приєднується до однієї частини вихідного органу і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органу по трьом лінійним координатам без зміни кутової орієнтації відносно станини, а інша одна штанга приєднана до другої частини вихідного органу, причому ця частина містить шпиндель, вісь обертання якого в одному з кутових положень співпадає з віссю обертання заготовки.

Схема верстата з комбінованою кінематичною структурою приведена на рис 1.8.

На станині 1 розміщено три приводи подач 2 штанг 3 та один привод подачі 4 штанги 5. Всі штанги пов'язані шарнірно з вихідним органом, що складається з двох частин 6 і 7, причому частина 7 містить шпиндель 8, поєднаних між собою шарніром 9. Штанги 3 пов'язані з однією частиною 6

вихідного органа, а штанга 5 – з іншою частиною 7 вихідного органа. Конструкція штанг 3 та їхніх шарнірів така, що забезпечує переміщення частини 6 вихідного органу по трьом лінійним координатам без зміни кутової орієнтації відносно станини. На станині також встановлено привід 10, що забезпечує обертання заготовки 11.

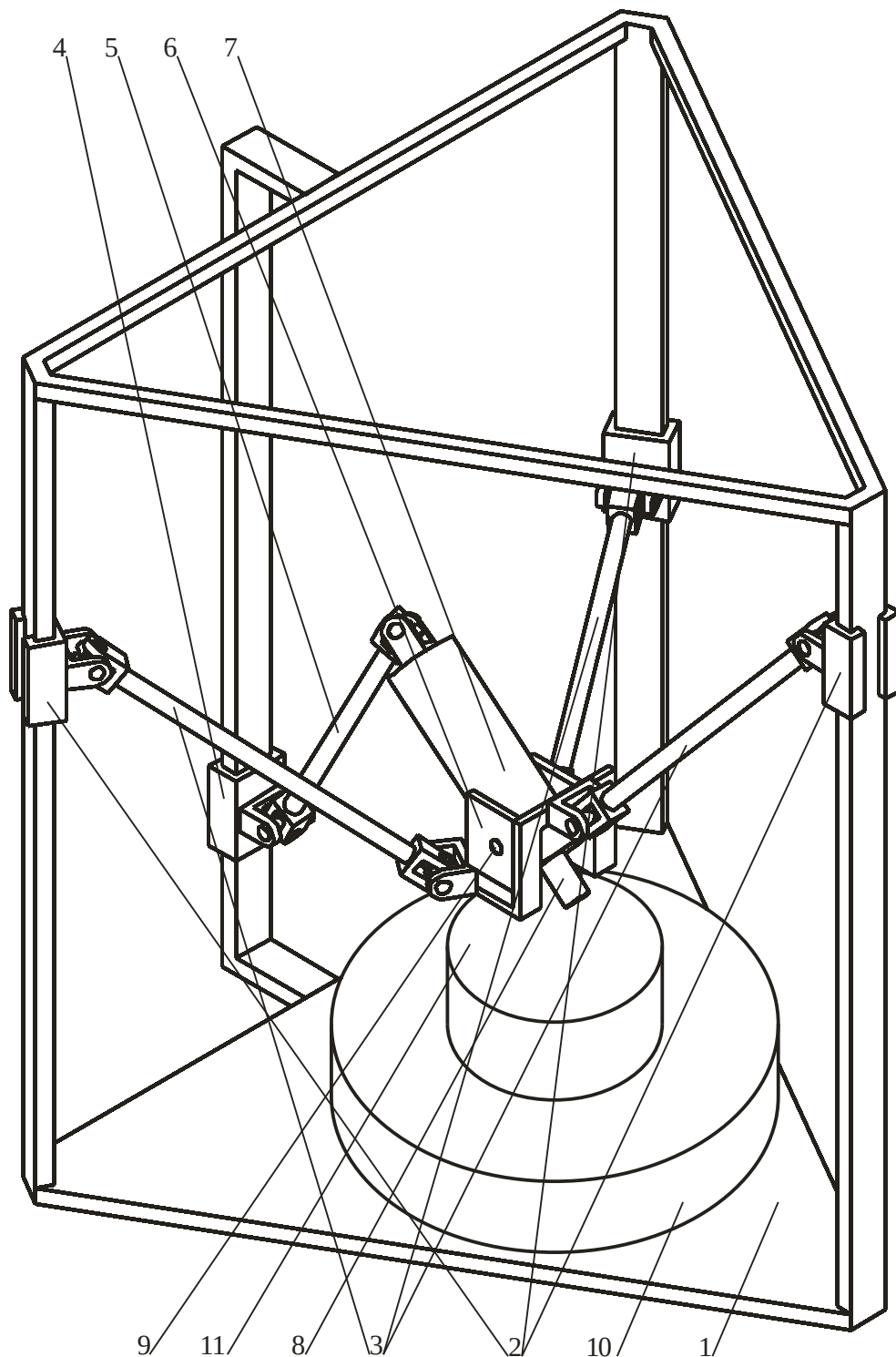


Рис. 1.8 – Схема верстата з комбінованою кінематикою

Переміщення штанги 5 визначатиме взаємне кутове положення частин 6 і 7 вихідного органа. Наявність шарніру 9 дозволяє здійснювати необхідний поворот частини 7 вихідного органа без зміни просторового положення його частини 6. Таким чином досягається функціональне розділення штанг на групи: штанги 3 визначають положення вихідного органа по лінійним координатам, а штанга 5 – по кутовій координаті.

Поєднання повороту шпинделя 8 та можливість його лінійних переміщень у просторі в поєднанні з обертальним рухом заготовки 11 у пропонованому рішенні забезпечує довільне взаємне просторове розташування шпинделя відносно заготовки.

У роботі [3] показано п'ятикоординатний механізм паралельної структури з трьома напрямними. Метою даного виходу є забезпечення рівномірного розташування напрямних навколо зони обробки для уникнення перетину штанг при збереженні необхідної рухомості вихідного органа шляхом скорочення кількості напрямних.

Вказана мета досягається тим, що у пропонованому рішенні кількість напрямних переміщень повзунів становить три, причому на двох з них розміщується по два повзуни, один з яких входить до складу приводу лінійних переміщень однієї з частин вихідного органа, а другий – до приводу повороту тієї його частини, що містить в собі шпиндель.

Схема п'ятикоординатного механізму паралельної структури з трьома напрямними приведена на рис. 1.9.

До станини 1 прикріпленні три напрямні 2 рівномірно навколо зони обробки 3. На даних напрямних розміщено три повзуни 4, які через штанги 5 пов'язані з однією з частин 6 вихідного органа. За допомогою шарніра 7 з двома степенями свободи інша частина 8 вихідного органа, що містить в собі шпиндель 9, пов'язується з частиною 6. На торці частини 8 вихідного органа, що протилежна передньому кінцеві шпинделя 9, розташовано здвоєний

шарнір 10, що за допомогою штанг 11 і 12 пов'язаний з двома повзунами 13. Повзуни 13 розміщуються на напрямних 2.

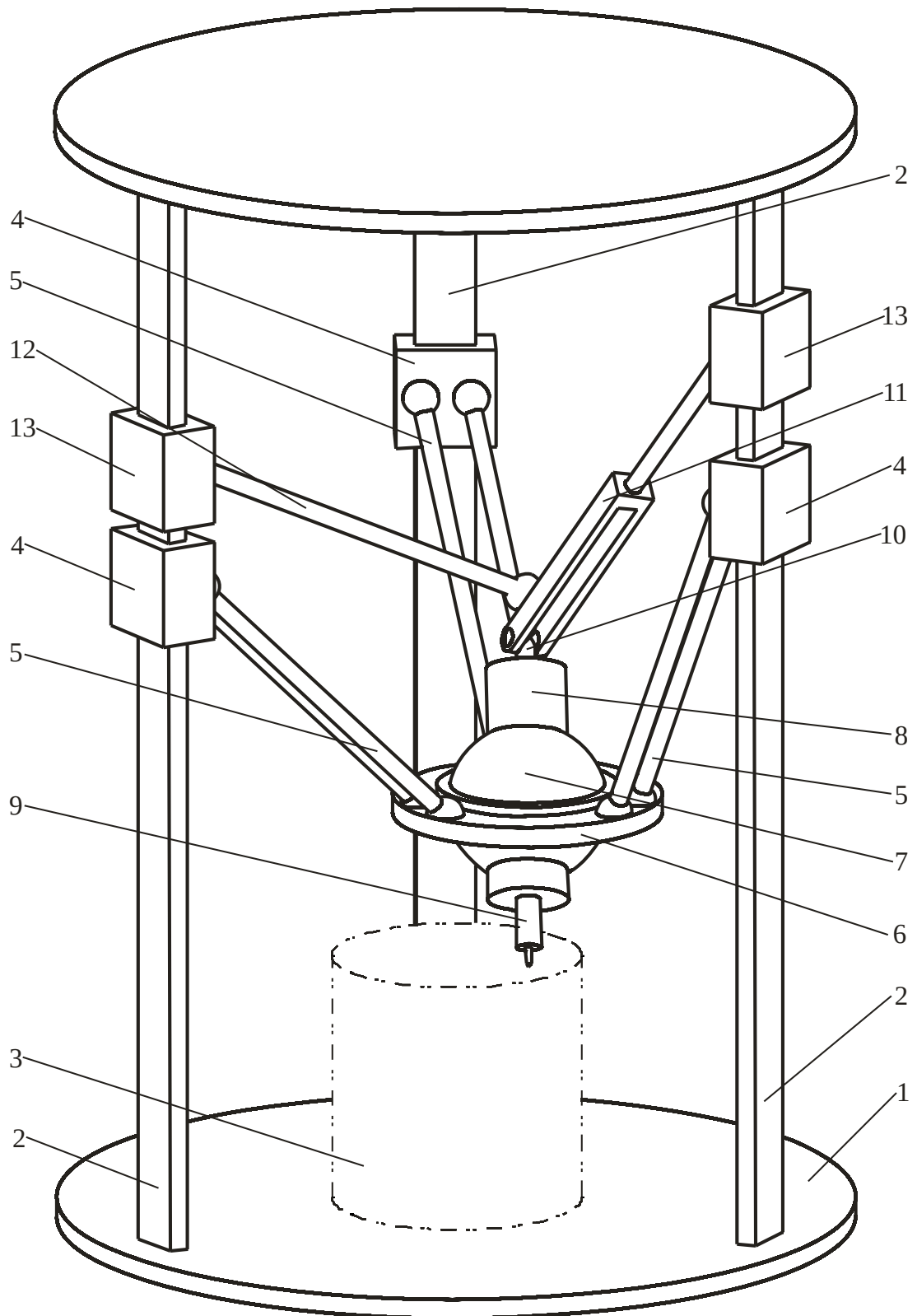


Рис. 1.9 – Схема п'ятикоординатного механізму паралельної структури з трьома напрямними

Переміщення повзунів 4 забезпечують лінійні переміщення однієї з частин 6 вихідного органа без зміни її кутової орієнтації відносно станини 1. Переміщення повзунів 13 забезпечують поворот іншої частини 8 вихідного органа, що містить в собі шпindel 9, у дозволених шарніром 10 напрямках. Наявністю шарніра 10 досягається функціональне розділення управління переміщеннями вихідного органа. Система керування не повинна дозволяти стикання повзунів 4 і 13, розміщених на одній напрямній 2. Конструкція шарніру 10 дозволяє взаємний поворот штанг 11 і 12 відносно одна одної та відносно осі шпинделя 9 на необхідний кут.

Наведені патенти показують можливість розробки нової конструкції маніпулятора з переміщенням його руки по трьом лінійним координатам, поворотом в одній площині та навколо своєї повздовжньої осі, що забезпечуватиме поворот кисті.

1.4 Мета і задачі досліджень

Проведений аналіз нинішнього стану розвитку промислового роботобудування показує широку різноманітність конструкцій маніпуляторів, що безпосередньо пов'язана з великим колом питань, які вирішуються за допомогою робототехніки. При цьому сучасні тенденції розвитку обладнання для виконання транспортних операцій зосереджуються навколо мінімізації переміщуваних мас, що виражається в тенденції розташування всіх двигунів приводів на основі маніпулятора, та використанні замкнених кінематичних ланцюгів, що призводить до ще більшого покращення характеристик жорсткості. Можна помітити, що аналогічні тенденції спостерігаються і в наближеній до роботобудування сфері верстатобудування, де вимоги до жорсткості конструкції обладнання для здійснення технологічних операцій обробки деталей ще вищі. Це

призвело до інтенсивного розвитку механізмів на базі паралельних кінематичних структур. І тут можна зазначити одну перспективу, що відкривається перед виробниками і експлуатантами обладнання для здійснення технологічних операцій обробки і транспортних операцій переміщення об'єктів.

Детальний аналіз кінематики обладнання обох типів дозволяє стверджувати, що існує однакове за функціоналом використання всіх координат руху, незалежно від обраної їх системи, окрім однієї. Ця особлива координата – обертання навколо осі шпинделя в обладнанні для здійснення рухів подачі при виконанні технологічних операцій. Відомо, що у даному типі обладнання обертання навколо осі шпинделя – це головний рух, що відбувається на великій швидкості. Якщо такий рух і використовується в якості руху подачі, то тільки для попередньої орієнтації шпинделя при виконанні обмеженого кола технологічних операцій. В переважній більшості як рух подачі він взагалі не використовується. Аналогом такого руху в обладнанні для здійснення транспортних операцій є поворот кисті для орієнтації об'єкта маніпулювання. Цей рух для такого типу обладнання є розповсюдженим. Якщо ж взяти за необхідність принцип швидкого переналагоджування із транспортної машини в технологічну і навпаки, дану особливість необхідно враховувати. На наш погляд, найбільш просто це можна зробити в механізмах з паралельною структурою, що робить таку задачу актуальною та має практичну цінність.

Метою даної роботи є 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. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- огляд існуючих типів промислових роботів;
- аналіз тенденцій розвитку промислових роботів;

- вибір прототипів для пропонованої конструкції п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розробка схеми конструкції п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- визначення конструктивних залежностей п'ятикоординатного робота для мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.

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

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА НА ОСНОВІ МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

2.1 Опис пропонованої конструкції робота

В попередньому розділі обрано в якості прототипів дві конструкції роботів. Спільною конструктивною рисою в них є рухома платформа, що переміщується по трьом лінійним координатам. Візьмемо принцип забезпечення лінійних переміщень окремим елементом (в даному випадку – рухомою платформою) за основу і нашої конструкції. За інформацією джерела [2], даний принцип дозволяє відділити керування лінійними переміщеннями від кутових в механізмах паралельної структури.

Тепер визначимося з необхідними кутовими переміщеннями руки. Обов'язковим рухом буде поворот кисті навколо осі руки. Для розширення функціоналу робота також забезпечимо поворот руки робота у площині, перепендикулярній до площини рухомої платформи. Такий рух відповідатиме наявному кутовому переміщенню вихідного органу в механізмі з роботи [2]. Таким чином, нам необхідно два додаткових приводи для забезпечення кутових переміщень виконавчих елементів робота на додачу до трьох приводів, що забезпечуватимуть лінійне переміщення рухомої платформи.

Кутові переміщення пропонованого робота будемо реалізовувати за принципом, застосованому у роботі [3], тобто одночасним керуванням двох координат. Проте навряд чи вдалим буде суміщення двох пар повзунів приводів штанг на одній напрямній, тому передбачаємо, що кожен з повзунів рухатиметься по своїй штанзі. Приступимо до докладного опису будови пропонованої конструкції робота. Його схема представлена на рис. 2.1.

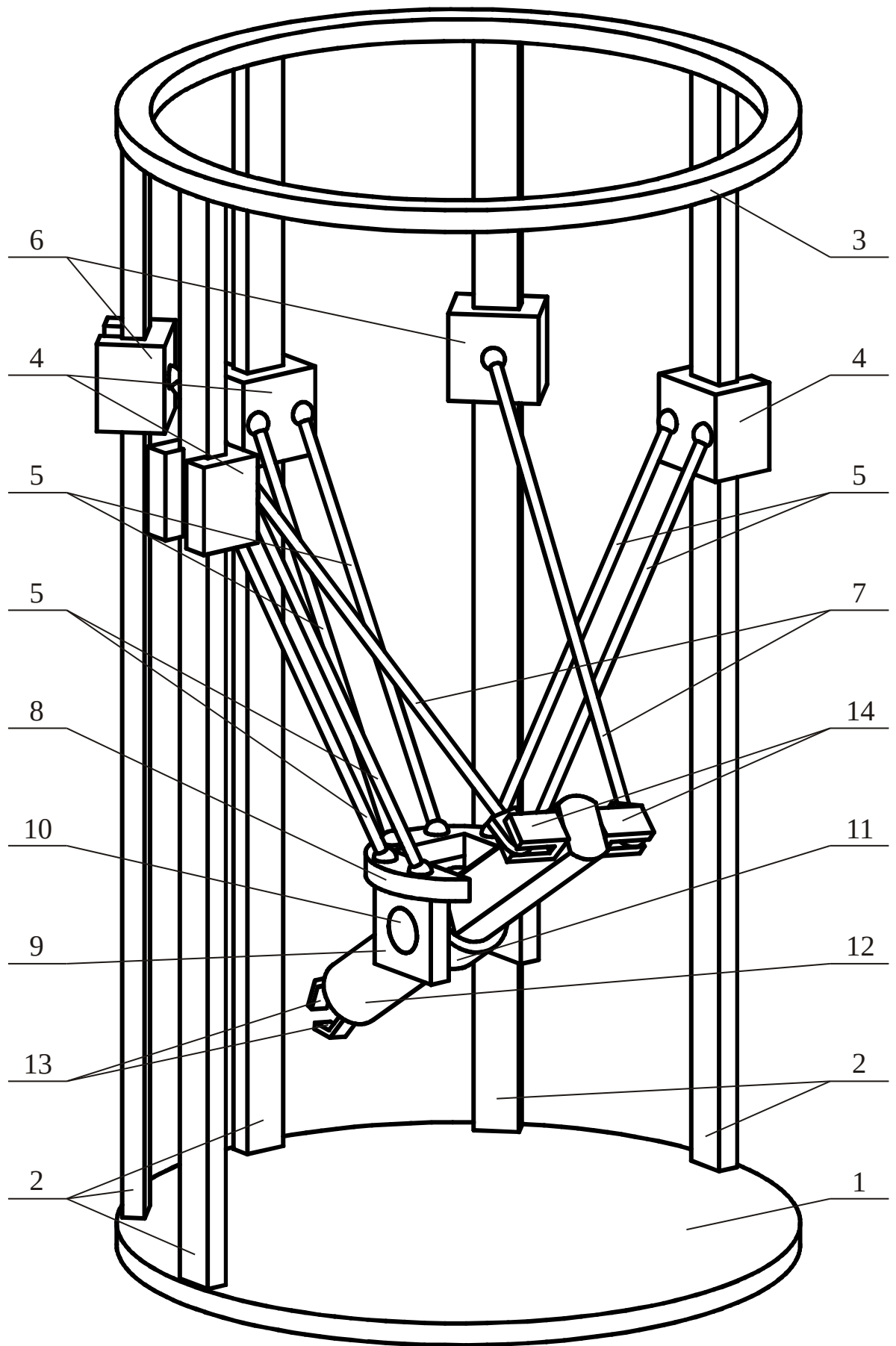


Рис. 2.1 – Схема будови робота запропонованої конструкції

Вся конструкція робота базується на основі 1. До основи 1 приєднуються п'ять вертикальних напрямних 2. Для підвищення жорсткості верхні кінці вертикальних напрямних 2 поєднуються кришкою 3, наприклад, у вигляді обруча, як показано на даній схемі. По трьом з п'яти вертикальних напрямних 2 рухаються позуни 4 переміщення пар штанг постійної довжини 5. По двом іншим вертикальним напрямним 2 рухаються повзуни 6 переміщення одиничних штанг постійної довжини 7. Іншими кінцями пари штанг постійної довжини 5 приєднані до рухомої платформи 8. Відстані між центрами шарнірів кріплення пар штанг довжини 5 на повзунах 4 і рухомій платформі 8 однакові. Довжини цих штанг також однокові, тому кожна їх пара утворює шарнірний паралелограм. Три таких шарнірних паралелограми забезпечують рух рухомої платформи 8 виключно по лінійним координатам. Зазначимо, що даний принцип взято з роботи [15]. На кронштейнах 9 рухомої платформи 8 розташовані поворотні шарніри 10, на яких обертається корпус підшипника 11. У даному підшипнику 11 обертається рука 12, на кінці якої розташовується захватний пристрій 13. Для забезпечення поворотів руки 12 у підшипнику 11 та поворотних шарнірах 10 на іншому її кінці, протилежному розташуванню захватного пристрою 13, розташована пара вилок 14. Кожна з цих вилок 14 поєднана з одиничною штангою постійною довжини 7. Таким чином, узгоджене переміщення двох повзунів 6 по напрямним 2 забезпечує необхідний поворот захватного пристрою 13 навколо осі руки 12, а також повороту всієї руки 12 відносно рухомої платформи 8 навколо осі поворотних шарнірів 10.

Використання поворотних шарнірів 10 та підшипника 11 дозволяє розмежувати приводи лінійних і кутових переміщень виконавчих елементів робота, що значно розширює діапазони їх переміщень та спрощує систему керування роботом в цілому.

2.2 Синтез приводу переміщення рухомої платформи

Задачами синтезу приводу переміщення рухомої платформи у даній роботі будуть визначення розташування напрямних переміщення повзунів приводів штанг постійної довжини та розміри зазначених штанг. На початку домовимося, що кожен пару штанг постійної довжини даного приводу ми замінимо еквівалентною штангою, центри шарнірів якої розташовуватимуться посередині відрізків, що поєднують центри реальних штанг, якщо приймати до уваги відстані між шарнірами на повзунах і рухомій платформі. Таким чином, шарнірно поєднаний паралелограм виродиться в еквівалентну штангу. Довжина еквівалентної штанги буде рівної довжині реальної штанги. Під розташуванням напрямних ми будемо розуміти пряму, що утворюється геометричним місцем центрів уявного шарніру кріплення еквівалентної штанги до повзуна, що здійснює переміщення по даній напрямній. Таким чином, ми уникаємо розгляду впливу конкретної конструктивної реалізації повзуна та напрямної на поставлену задачу.

При визначенні довжин штанг приводу переміщення рухомої платформи будемо застосовувати принцип забезпечення повної рухомості виконавчого органу робота у заданому просторі. Приймаємо, що ми повинні забезпечити розташування розрахункової точки захватного пристрою робота при будь-якому заданому положенні руки робота. Таку розрахункову точку розмістимо на осі руки робота на визначеній відстані від точки перетину осі поворотних шарнірів (позиція 10 на рис. 2.1) та осі обертання руки (позиція 12 на рис. 2.1) в підшипнику (позиція 11 на рис. 2.1). Цей конструктивний параметр буде входним у задачі синтезу приводу переміщення рухомої платформи.

За робочий простір, в якому ми повинні забезпечити повну рухомість виконавчого органу робота, приймаємо циліндр діаметром D і висотою H . При паралельному розташуванні всіх напрямних, що розглядається у нашому

випадку, на розташування напрямних і на розміри штанг постійної довжини у приводі переміщення рухомої платформи безпосередній вплив матиме тільки діаметр робочого простору. Висота робочого простору матиме безпосередній вплив тільки на довжину напрямних.

Наявність повороту руки робота навколо осі поворотних шарнірів очевидно призведе до різного діапазону переміщень центрів шарнірів умовних штанг на рухомій платформі, а отже і довжини самих еквівалентних штанг. Під довжиною еквівалентної штанги ми розуміємо відстань між центрами шарнірів даної штанги. Спочатку визначимо довжину еквівалентної штанги, що поєднує рухому платформу і повзун, через пряму розташування центрів шарніру кріплення еквівалентної штанги якого проходить площина повороту осі руки робота за умови її одночасного проходження через вісь циліндру заданого робочого простору. Нехай це буде еквівалентна штанга 1. Схема до визначення довжини еквівалентної штанги 1 та розташування напрямної повзуна її переміщення представлена на рис. 2.2.

Вже згадану відстань від точки перетину осі поворотних шарнірів та осі обертання руки в підшипнику до розрахункової точки захватного пристрою позначимо P . Водночас відстань від точки перетину осі поворотних шарнірів та осі обертання руки в підшипнику до центру шарніру кріплення еквівалентної штанги 1 до рухомої платформи у проекції на горизонтальну вісь схеми позначимо T .

Для запобігання виникненню надвисоких тисків у шарнірах еквівалентні штанги повинні розміщатися у своїх крайніх положеннях з певним кутом δ до горизонтальної та вертикальної осей 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, при вертикальному розташуванні руки робота у найближчому до згаданої напрямної розташуванні розрахункової точки захватного пристрою робота у робочому просторі.

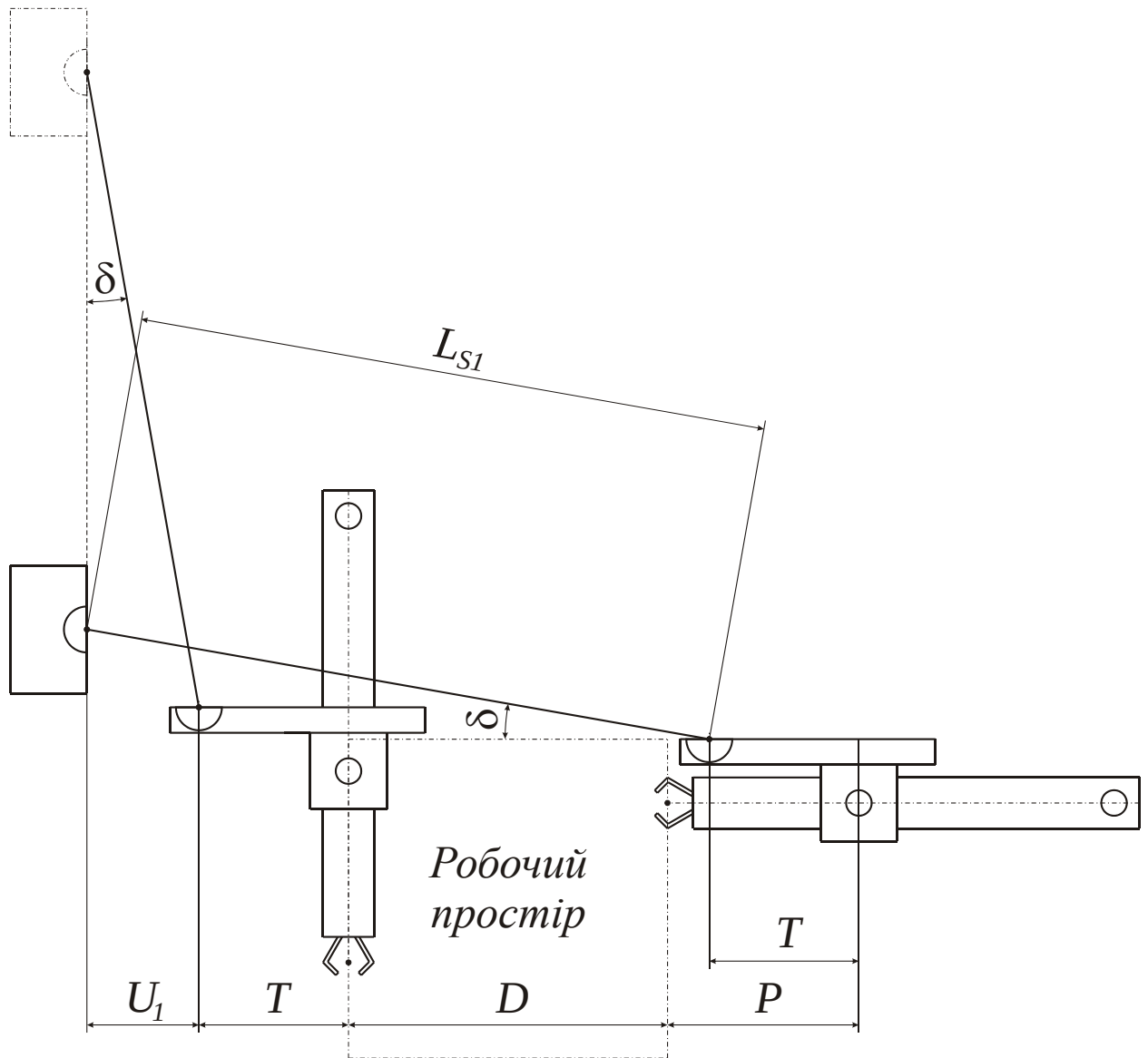


Рис. 2.2 – Схема до визначення довжини еквівалентної штанги 1

Можна записати, що

$$U_1 = L_{S1} \sin(\delta) .$$

Водночас при іншому крайньому розташуванні розрахункової точки захватного пристрою робота у робочому просторі, що відповідатиме найбільшій її відстані до напрямної переміщення повзуна приводу еквівалентної штанги 1, можна записати таку залежність:

$$L_{S1} \cos(\delta) = U_1 + T + D + P - T ,$$

або, враховуючи попередню залежність

$$L_{S1} \cos(\delta) = L_{S1} \sin(\delta) + D + P .$$

Перенісши вирази з L_{S1} у ліву частину рівняння та виділивши безпосередньо величину довжини еквівалентної штанги, знаходимо вираз для її розрахунку:

$$L_{S1} \cos(\delta) - L_{S1} \sin(\delta) = D + P ,$$

$$L_{S1} (\cos(\delta) - \sin(\delta)) = D + P ,$$

$$L_{S1} = \frac{D + P}{\cos(\delta) - \sin(\delta)} .$$

Знаючи довжину штанги, ми будемо знати і мінімально можливу координату розташування напрямної по попередньо встановленій залежності.

Інші дві еквівалентні штанги, що приєднуються до рухомої платформи, працюють у симетричному режимі. Тому достатньо буде встановити величину тільки однієї з штанг. Позначимо дані штанги індексами 2 і 3. Для встановлення необхідних геометричних залежностей розглянемо схему у горизонтальній площині всього механізму, що представлена на рис. 2.3.

Приймемо, що відстань між центром шарніру кріплення еквівалентної штанги 2(3) та площиною коливання руки внаслідок її повороту навколо осі поворотних шарнірів становить R . Відстань від центру шарніру кріплення еквівалентної штанги 2(3) до осі поворотних шарнірів у проекції на горизонтальну площину всього механізму позначимо S .

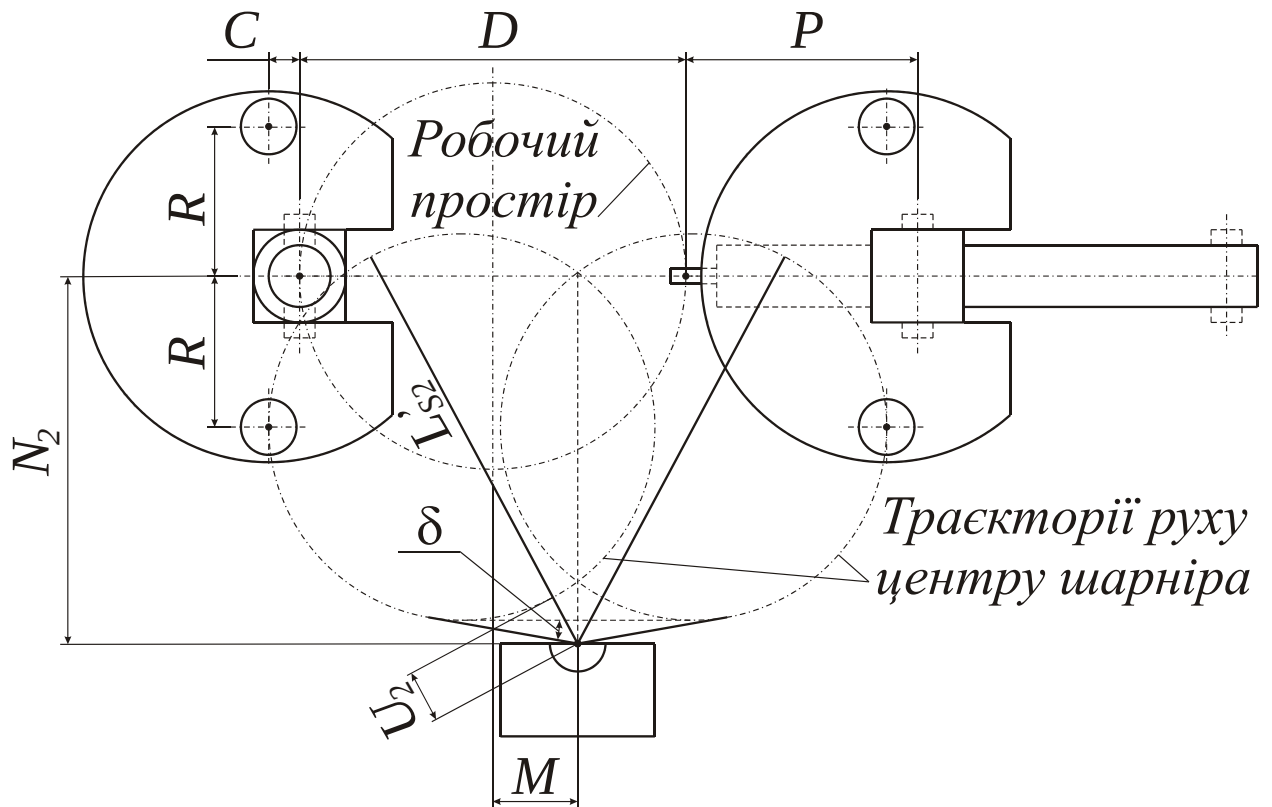


Рис. 2.3 – Схема до визначення довжини еквівалентної штанги 2

Довжина штанги на схемі на рис. 2.3 позначена як L'_{s2} , оскільки представлена як її проекція на горизонтальну площину всього механізму. Координати розташування прямої повзуна переміщення еквівалентної штанги 2 позначимо відносно центру робочого простору як M і N_2 . При їх визначенні керуємося необхідністю забезпечити мінімальну довжину еквівалентної штанги 2.

Центр шарніру кріплення еквівалентної штанги 2 до рухомої платформи при русі останньої по крайній траєкторії робочого простору за двох крайніх положеннях руки робота описуватиме два кола діаметром D , що видно із схеми. Очевидно, що для мінімізації довжини еквівалентної штанги 2 пряма повзуна її переміщення повинна розташовуватися на прямій, що проходить через точки перетину цих двох кіл. Таким чином, відрізок M визначається простою залежністю

$$M = \frac{P}{2} - C.$$

Координата N_2 визначатиметься, виходячи з необхідності забезпечення мінімального кута δ при розташуванні еквівалентної штанги 2 по дотичній до кожного з двох кіл траєкторії руху центру шарніру кріплення даної штанги до рухомої платформи. Величина проекції еквівалентної штанги 2 на горизонтальну площину всього механізму нас в даному випадку не цікавить. Згідно побудов за схемою з рис. 2.3, координата N_2 дорівнює:

$$N_2 = R + \frac{D}{2} \cos(\delta) + \left(\frac{P}{2} + \frac{D}{2} \sin(\delta) \right) \tan(\delta).$$

Визначення довжини еквівалентної штанги 2 будемо проводити аналогічно до схеми з рис. 2.2, з урахуванням урахуванням того, що координати розташування напрямної повзуна переміщення штанги в даному випадку вже відомі. Величина U_2 в даному випадку визначатиметься як різниця між проекцією еквівалентної штанги 2 на горизонтальну площину всього механізму та діаметром D робочого простору. Щодо довжини еквівалентної штанги 2, то її проекція L'_{s2} рівна

$$L'_{s2} = \sqrt{\left(\frac{D}{2} \cos(\delta) + \left(\frac{P}{2} + \frac{D}{2} \sin(\delta) \right) \tan(\delta) \right)^2 + \frac{P^2}{4} + \frac{D}{2}}.$$

Відповідно довжина довжини еквівалентної штанги 2 з урахуванням кута δ становитиме

$$L_{s2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2} \cos(\delta) + \left(\frac{P}{2} + \frac{D}{2} \sin(\delta) \right) \tan(\delta) \right)^2 + \frac{P^2}{4} + \frac{D}{2}}}{\cos(\delta)}.$$

Знаючи довжину еквівалентної штанги 2, необхідно перевірити виконання умови

$$\sqrt{\left(\frac{D}{2}\cos(\delta) + \left(\frac{P}{2} + \frac{D}{2}\sin(\delta)\right)\tan(\delta)\right)^2 + \frac{P^2}{4} - \frac{D}{2}} > L_{s2}\sin(\delta).$$

Якщо умова виконується, то величина еквівалентної штанги 2 вважається остаточно розрахованою. У випадку, якщо поставлена умова не виконується, то довжину даної штанги розраховують, виходячи з виразу

$$L_{s2}\cos(\delta) = L_{s2}\sin(\delta) + D,$$

тобто

$$L_{s2}\cos(\delta) - L_{s2}\sin(\delta) = D,$$

$$L_{s2} = \frac{D}{\cos(\delta) - \sin(\delta)}.$$

Враховуючи збільшення довжини еквівалентної штанги, координата N_2 розташування напрямної повзуна 2 визначатиметься за іншою залежністю:

$$N_2 = R + \sqrt{\left(\frac{D\cos(\delta)}{\cos(\delta) - \sin(\delta)} - \frac{D}{2}\right)^2 - \frac{P^2}{4}}.$$

Враховуючи, що залежності для розрахунку довжини еквівалентної штанги 3 та координат розташування напрямної повзуна приводу зазначеної штанги аналогічні, як і для випадку еквівалентної штанги 2, що виходить із

симетричності механізму, вважаємо задачу синтезу приводу переміщення рухомої платформи виконаною.

2.3 Синтез приводу повороту руки та орієнтації захватного пристрою

Метою даного етапу синтезу пропонованої конструкції робота є визначення залежностей довжин штанг і координат розташування напрямних переміщення приводу повороту руки та орієнтації захватного пристрою в залежності від конструктивних розмірів вузла кріплення штанг постійної довжини даного приводу до руки робота. Окрім впливу згаданих конструктивних параметрів на елементи приводу важливим чинником є врахування конструктивних особливостей виконання шарнірних з'єднань руки і рухомої платформи, які можуть накладати ряд обмежень. За результатами вирішення задач синтезу повинні бути забезпеченні задані кути повороту руки та орієнтації захватного пристрою при знаходженні розрахункової точки останього в довільному місці обраного робочого простору. Приймаємо, що рука робота може знаходитися у довільному кутовому положенні відносно рухомої платформи механізму в межах від горизонтального її положення до вертикального. Захватний пристрій повинен обертатися на кут 90 градусів. Початкова орієнтація захватного пристрою на руці робота не задається.

Розглянемо схему на рис. 2.4. Приймаємо, що координати розташування центрів шарнірів кріплення штанг постійної довжини приводу повороту руки та орієнтації захватного пристрою на згаданій руці робота визначаються віддаленням B від таких центрів шарнірів вздовж осі руки до точки перетину даної осі з віссю поворотних шарнірів на кронштейні рухомої платформи, а також віддаленням E 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.

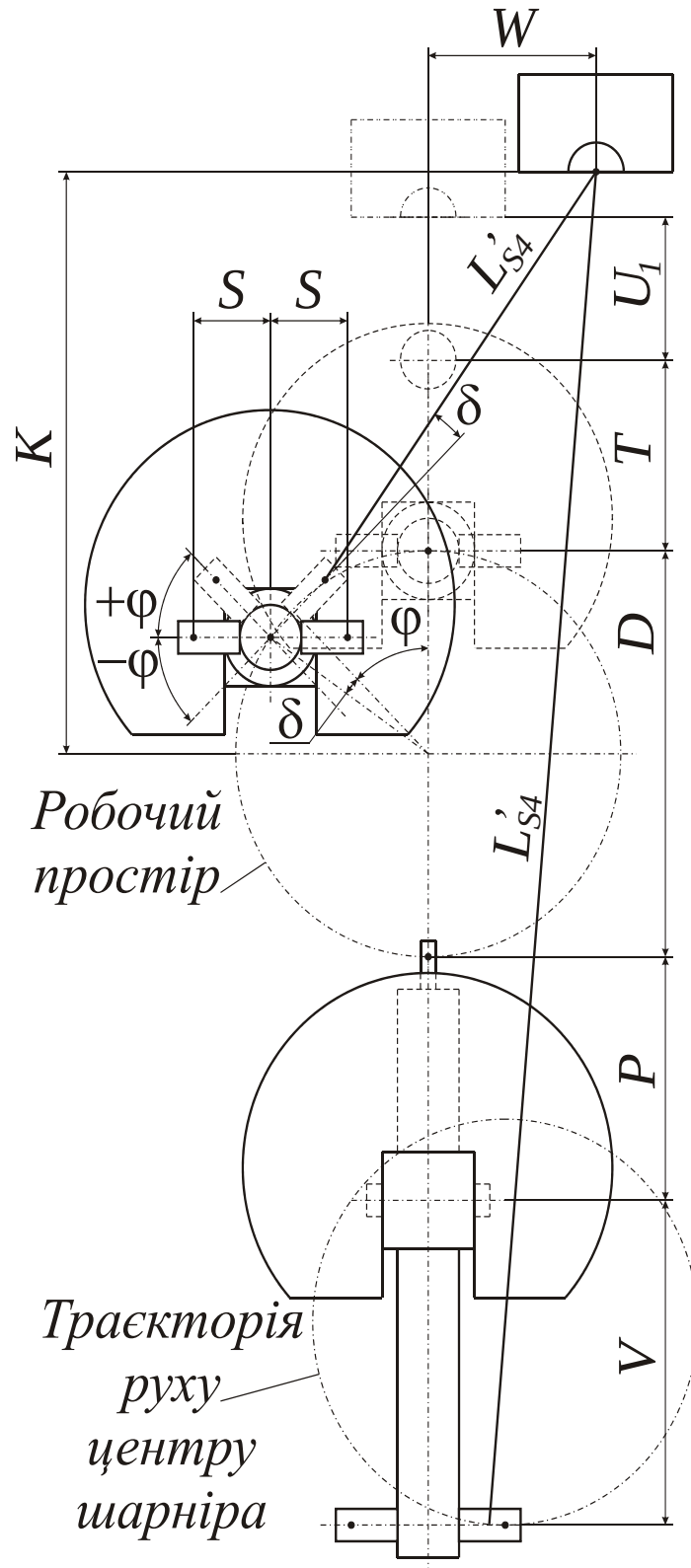


Рис. 2.4 – Схема до визначення довжини штанги 4

Координати розташування напрямних переміщення повзунів даного приводу визначаються з обмежень, які виникають при вертикальному розташуванні руки робота. Поворот руки робота навколо своєї поздовжньої осі в підшипнику позначимо $\pm\varphi$. Знову необхідно враховувати запобіжний кут δ для уникнення особливих положень механізму. На схемі, представлений на рис. 2.4, показано положення рухомої платформи, за якої забезпечується необхідний діапазон зміни значень кута φ при дотриманні запобіжного кута δ . При всіх інших положеннях рухомої платформи і нахилу руки робота до неї нахил проекції штанги 4 на горизонтальну площину усього механізму буде більшим, ніж кут δ . Саме в показаному на рис. 2.4 положенні вихідного органу робота проекція штанги на горизонтальну площину усього механізму визначатиме пряму, на якій розташовуватиметься розрахункова координата напрямної повзуна переміщення даної штанги. Її нахил до вертикальної (відносно схеми на рис. 2.4) осі становитиме $\varphi - \delta$. Для координат W і K напрямної повзуна переміщення штанги 4 можуть існувати обмеження. Для прикладу, координата W не може бути менше певної величини, визначеної конструктивними параметрами повзунів приводів переміщення штанг, щоб уникнути стикання між ними. Водночас, для прикладу, координата K не може бути більшою за певну величину для мінімізації габаритних розмірів механізму. В переважній більшості випадків лімітуючою, на наш погляд, буде саме мінімальна величина координати W .

Отже, при лімітуючій наперед заданій координаті W розташування напрямної повзуна переміщення штанги 4 інша її координата K визначатиметься з виразу:

$$K = \frac{W + \frac{D}{2} \cos(\varphi - \delta) - S \sin(\varphi - \delta)}{\tan(\varphi - \delta)} + \frac{D}{2} \sin(\varphi - \delta) + S \cos(\varphi - \delta).$$

Навпаки, при лімітуючій наперед заданій координаті K розташування прямої повзуна переміщення штанги 4 інша її координата W визначатиметься з виразу:

$$\frac{W + \frac{D}{2} \cos(\varphi - \delta) - S \sin(\varphi - \delta)}{\tan(\varphi - \delta)} = K - \frac{D}{2} \sin(\varphi - \delta) - S \cos(\varphi - \delta),$$

$$W + \frac{D}{2} \cos(\varphi - \delta) - S \sin(\varphi - \delta) = \left(K - \frac{D}{2} \sin(\varphi - \delta) - S \cos(\varphi - \delta) \right) \tan(\varphi - \delta),$$

$$W = \left(K - \frac{D}{2} \sin(\varphi - \delta) - S \cos(\varphi - \delta) \right) \tan(\varphi - \delta) - \frac{D}{2} \cos(\varphi - \delta) + S \sin(\varphi - \delta).$$

Довжина штанги 4 визначатиметься з конструктивних залежностей при горизонтальному положенні руки робота, показаному на схемі на рис. 2.4. На цьому рисунку показана найбільша проекція штанги 4 на горизонтальну площину усього механізму. Її довжина відповідно до схеми рівна:

$$L'_{s4} = \frac{D}{2} + \sqrt{\left(K + \frac{D}{2} + P + V - \frac{D}{2} \right)^2 + (W - S)^2},$$

$$L'_{s4} = \frac{D}{2} + \sqrt{(K + P + V)^2 + (W - S)^2}.$$

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. Він може бути рівним вже прийнятому куту δ , а може бути і більшим із-за специфіки будови виконавчого органа робота та поперечних

розмірів штанги. Прийнемо, що в зазальному для штанг приводу повороту руки робота даний лімітуючий кут буде ψ . Пояснення причин неспівпадання кутів δ і ψ наведено на схемі на рис. 2.5.

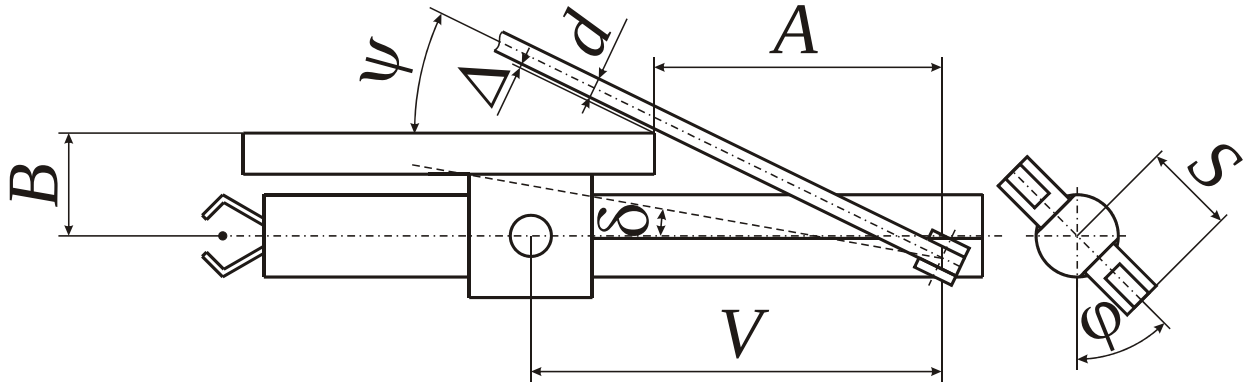


Рис. 2.5 – Схема до визначення кута ψ

В даному випадку значення кута ψ визначається комбінацією конструктивних параметрів A , B і V , а також діаметром штанги d і протиударним зазором Δ . Відповідно повна довжина штанги 4 дорівнює:

$$L_{S4} = \frac{\frac{D}{2} + \sqrt{\left(K + P + V - \frac{D}{2}\right)^2 + (W - S)^2}}{\cos(\psi)}.$$

Для штанги 5 внаслідок симетричності механізму конструктивні залежності аналогічні. На даному етапі задачу синтезу поперечних розмірів механізму можна вважати розв'язаною.

2.4 Дослідження конструктивних залежностей робота

Проаналізуємо отримані в попередніх двох пунктах залежності конструктивних параметрів. При визначенні довжини еквівалентної штанги 1 приводу переміщення рухомої платформи маємо прямопропорційну

залежність даного параметра від діаметра робочого простору D і вильоту P розрахункової точки захватного пристрою відносно точки перетину повздовжньої осі руки та осі поворотних шарнірів платформи. Стосовно впливу запобіжного кута δ , то в цьому випадку залежність більш складна, і її варто проаналізувати докладніше, про що показано графіком на рис. 2.6.

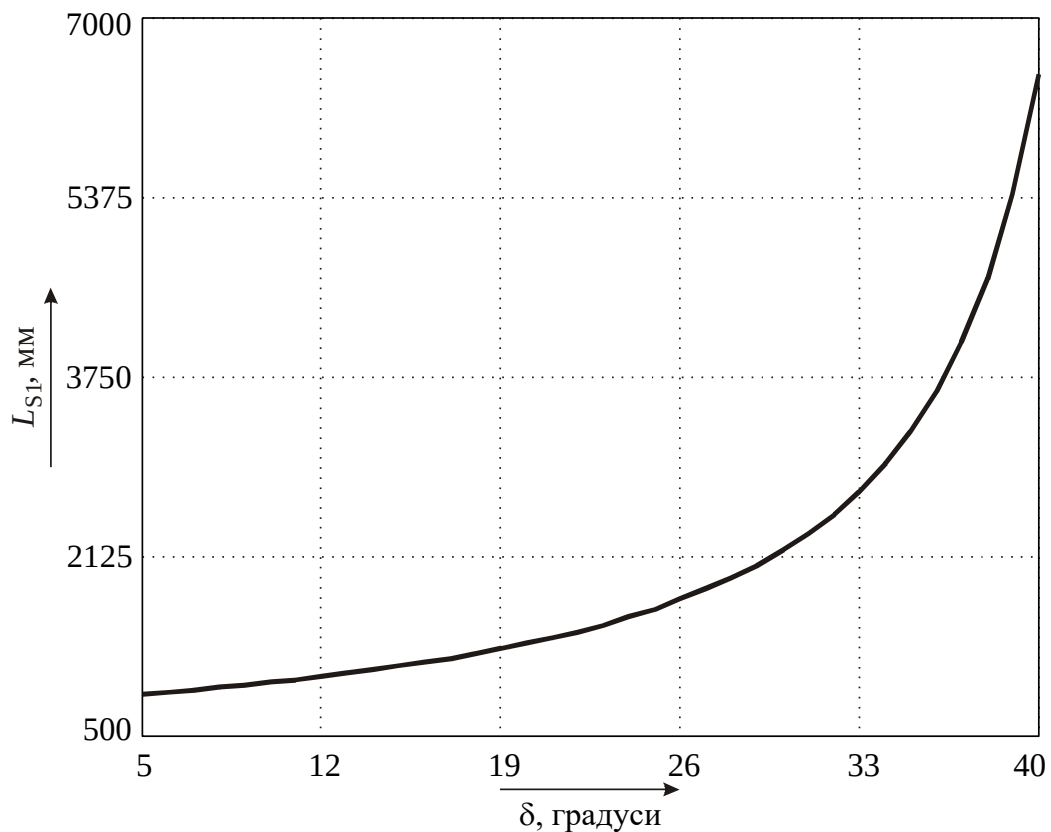


Рис. 2.6 – Залежність довжини еквівалентної штанги 1 від запобіжного кута δ

На даному графіку чітко видно асимптотичну ділянку в районі значень кута δ , що наближається до 45 градусів. І це цілком очевидно, оскільки в знаменнику формули присутня різниця функцій косинуса і синуса для даного кута. Як відомо, функції косинуса і синуса кута рівні між собою при 45 градусах величини їхнього аргумента.

На наступному графіку на рис. 2.7 буде показано залежність координати U розташування напрямної повзуна переміщення еквівалентної штанги 1 від запобіжного кута δ .

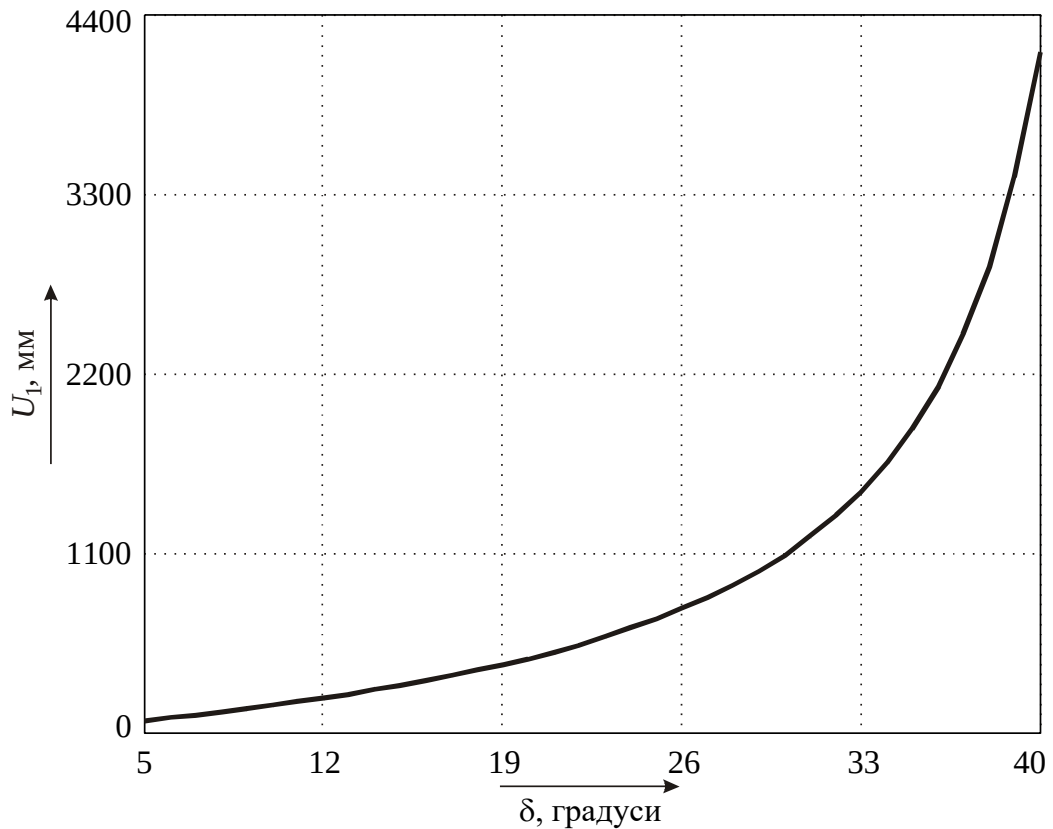


Рис. 2.7 – Залежність координати U розташування напрямної повзуна переміщення еквівалентної штанги 1 від запобіжного кута δ

Даний графік, хоч і повторює докладно попередній, але має дещо більш пологий характер, що пояснюється присутністю у формулі додаткового впливу функції синуса кута δ .

Перейдемо до розгляду впливу конструктивних параметрів на довжину еквівалентної штанги 2. Враховуючи характер отриманої аналітичної залежності, варто дослідити вплив всіх трьох присутніх у ній факторів на вихідну величину. Результати графічно показано на рис. 2.8 – 2.10.

Вплив запобіжного кута на довжину еквівалентної штанги 2 суттєво менший, ніж у випадку довжини еквівалентної штанги 1. Вплив діаметру робочого простору на довжину еквівалентної штанги 2 майже прямопропорційний, незважаючи на наявність радикалу у формулі. Вплив вильоту захватного пристрою P на довжину еквівалентної штанги 2 суттєво менший у порівнянні з діаметром D .

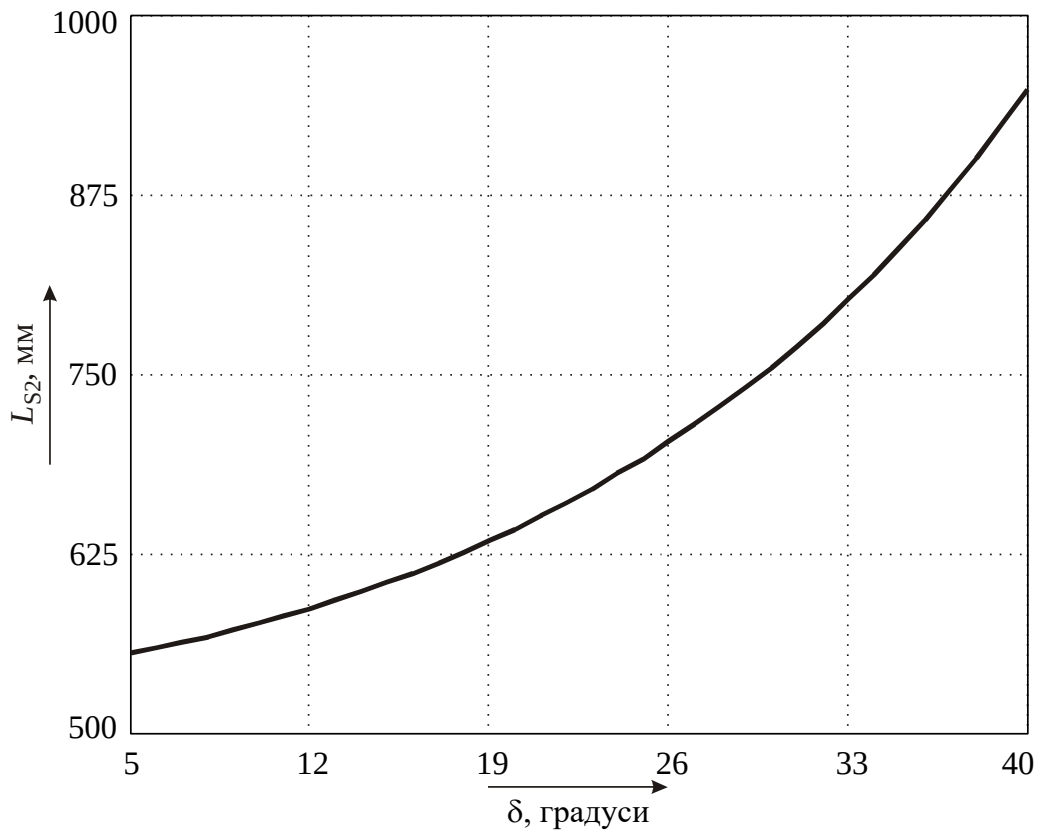


Рис. 2.8 – Залежність довжини еквівалентної штанги 2 від запобіжного кута δ

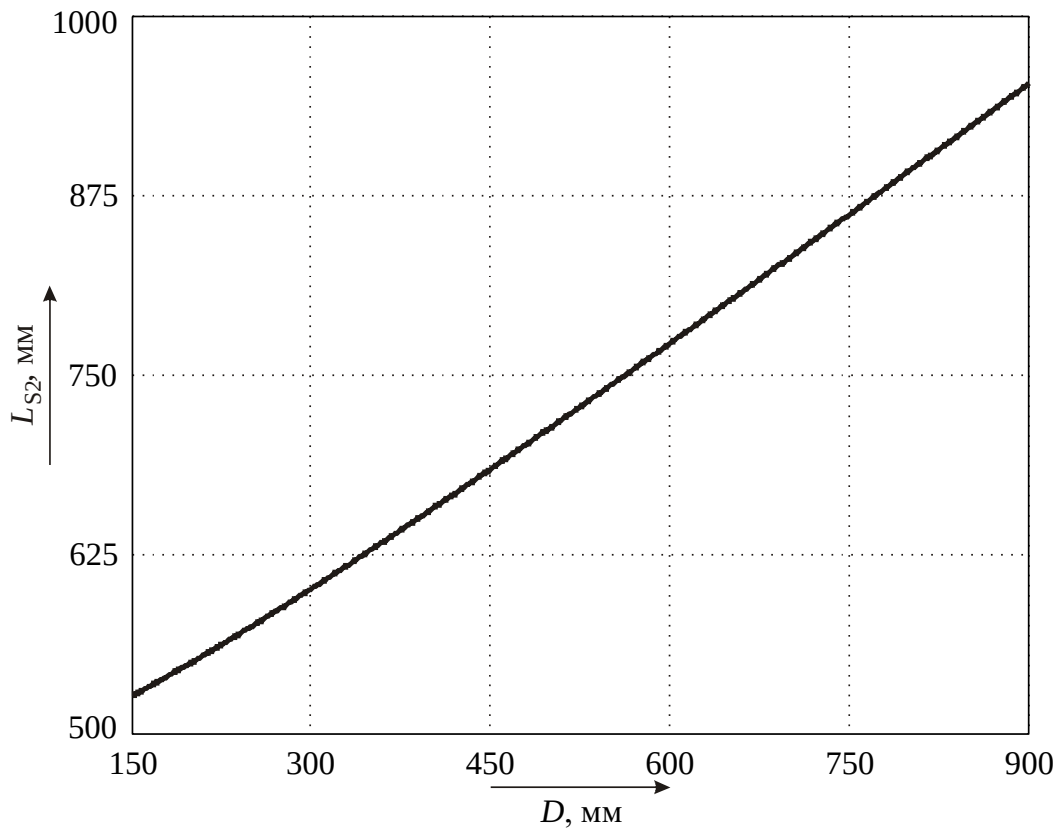


Рис. 2.9 – Залежність довжини еквівалентної штанги 2 від діаметра робочого простору D

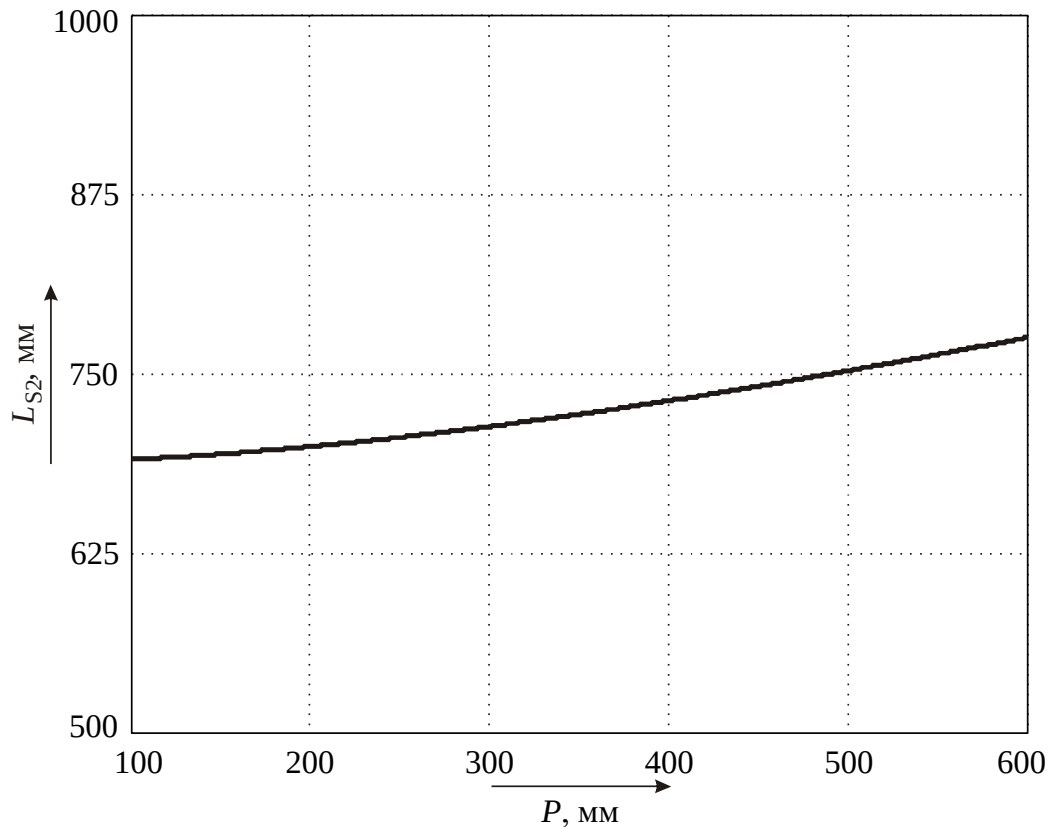


Рис. 2.10 – Залежність довжини еквівалентної штанги 2 від вильоту захватного пристрою Р

При розгляді координат розташування напрямної повзуна еквівалентної штанги 2 аналіз для координати М не проводитимемо, оскільки вплив на неї всіх вхідних параметрів прямопропорційний. Вплив на координату N_2 всіх вхідних величин, окрім запобіжного кута δ , також буде прямопропорційним, тому розглядатися не буде. Графічна залежність впливу величини запобіжного кута δ на величину координати N_2 розташування напрямної повзуна переміщення еквівалентної штанги 2 наведено на рис. 2.11.

Як видно з даного рисунка, характер залежності координати N_2 розташування напрямної повзуна еквівалентної штанги 2 від зміни величини запобіжного кута δ зростаючий, близький до пропорційного, з невеликою випуклістю вниз.

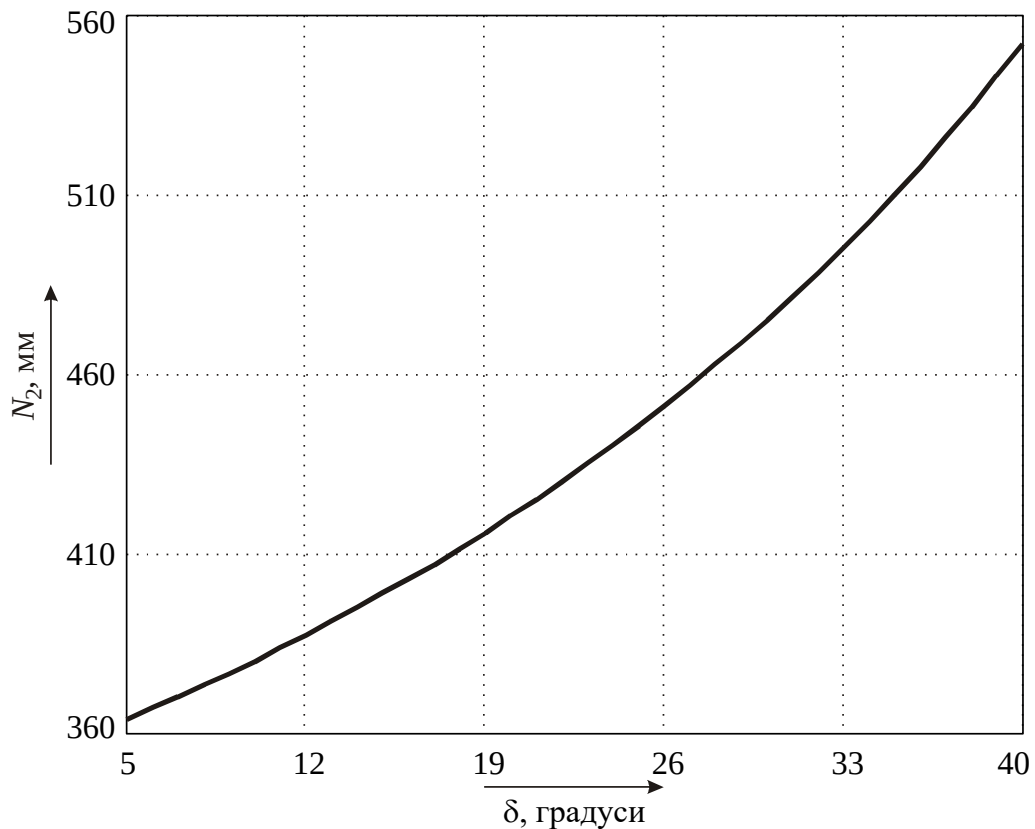


Рис. 2.11 – Залежність координати N_2 розташування напрямної повзуна переміщення еквівалентної штанги 2 від запобіжного кута δ

Якщо аналізувати вираз для визначення координати K розташування напрямної повзуна переміщення штанги 4 приводу повороту руки та орієнтації захватного пристрою, то приходимо до висновку, що вплив всіх параметрів, окрім запобіжного кута δ , буде мати прямопропорційний зростаючий характер. Графічна залежність впливу величини запобіжного кута δ на величину координати K розташування напрямної повзуна переміщення штанги 4 при фіксованій координаті W наведено на рис. 2.12.

Графік на даному рисунку має чітко виражену асимптотичну ділянку та ділянку пологого зростання в області малих значень запобіжного кута δ . Можна стверджувати, що характер даного графіка подібний до представленого на рис. 2.7, з більш різким вигином вниз.

На рис. 2.13 показано графічну залежність впливу величини запобіжного кута δ на величину координати W розташування напрямної повзуна переміщення штанги 4 при фіксованій координаті K .

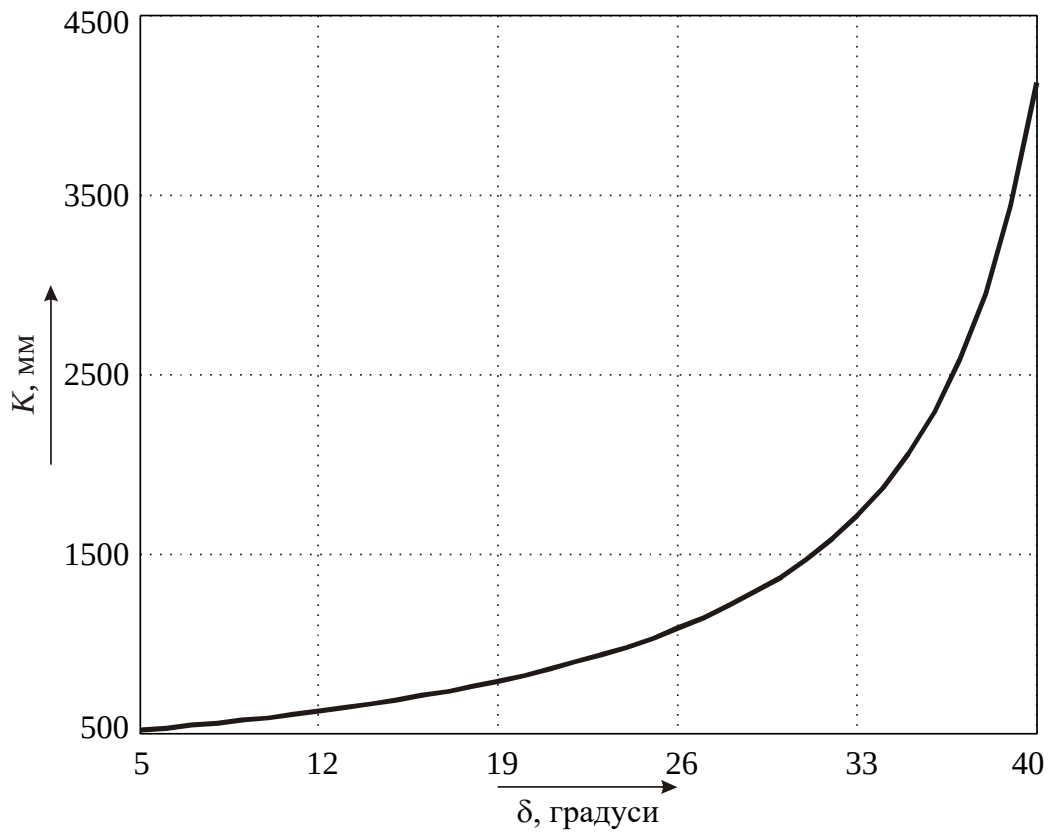


Рис. 2.12 – Залежність координати K розташування напрямної повзуна переміщення штанги 4 від запобіжного кута δ

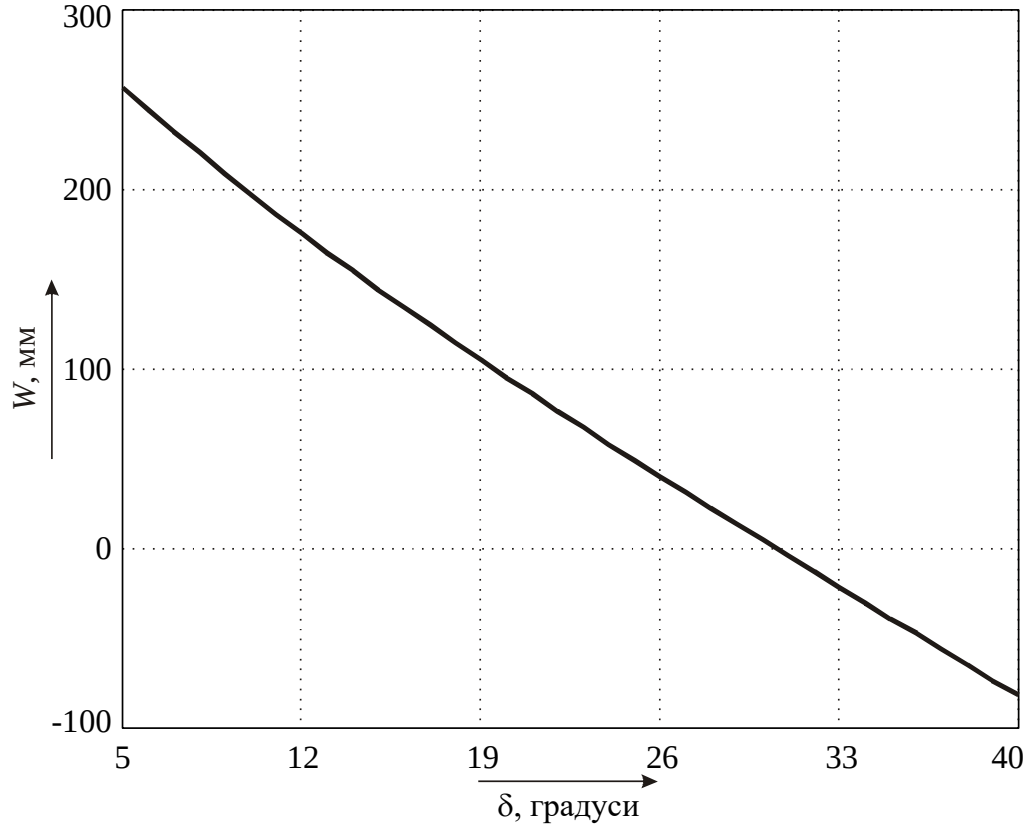


Рис. 2.13 – Залежність координати W розташування напрямної повзуна переміщення штанги 4 від запобіжного кута δ

Графік на рис. 2.13 має майже прямопропорційний спадаючий характер. З даного графіка видно, що при досягненні певної величини кута δ значення координати W стають від'ємними, тобто відбуватиметься «перенос» в іншу півплощину розташування координати W , що свідчитиме про перетин штанг 4 і 5 робота, що є неприпустимим. Таким чином, ми отримали графічно доказ твердження у пункті 2.3 цієї роботи, що значення координати W повине задаватися наперед, до розрахунку значення координати K , і саме такий порядок з точки зору конструювання даного механізму є правильним.

На рис. 2.14 – 2.17 показано залежності довжини штанги 4 від зміни конструктивних параметрів механізму.

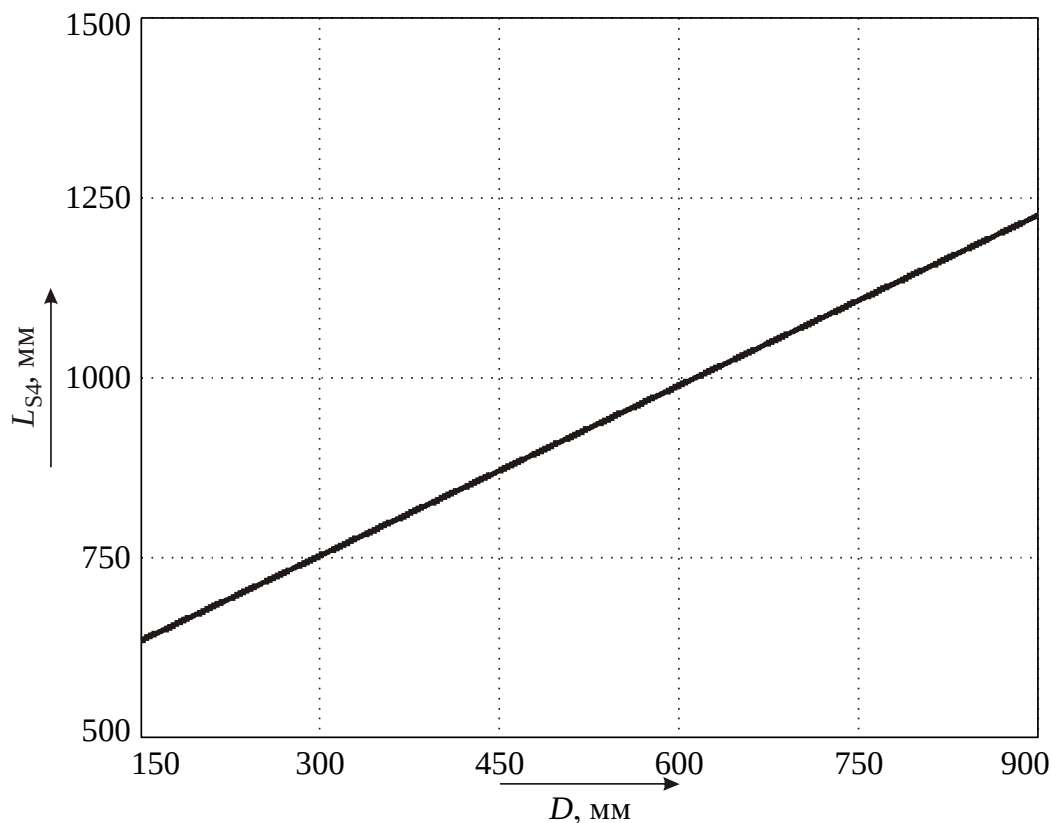


Рис. 2.14 – Залежність довжини штанги 4 від діаметра робочого простору D

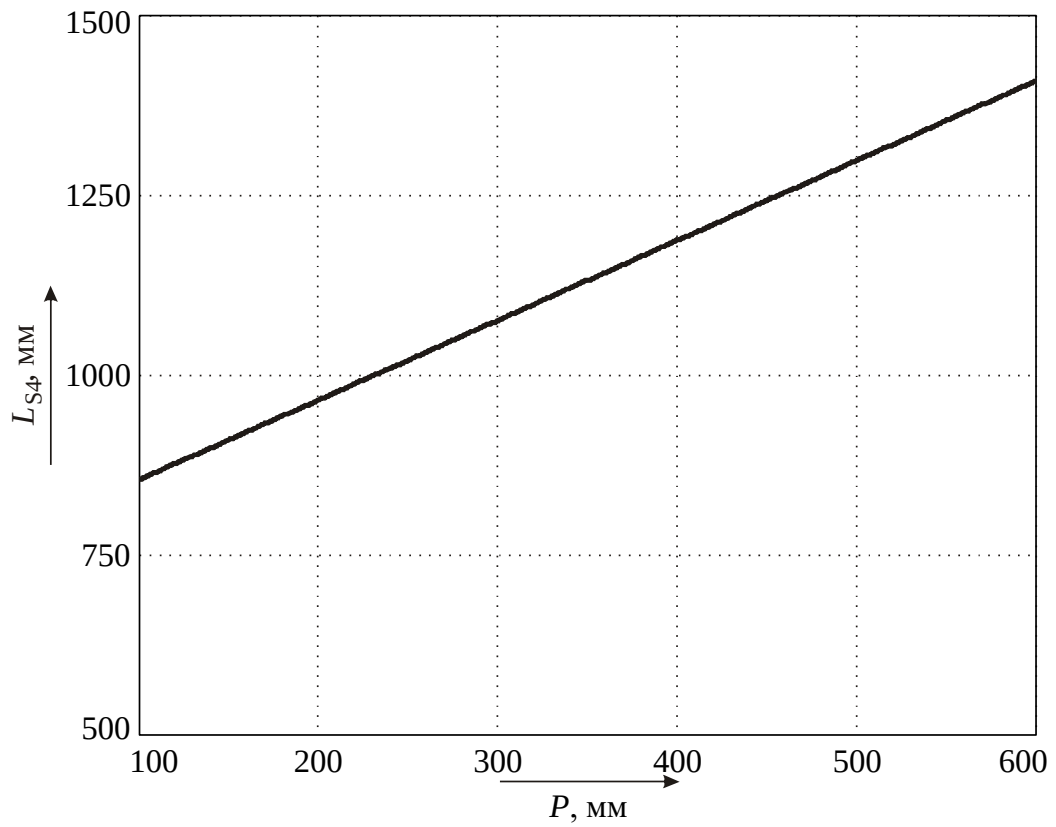


Рис. 2.15 – Залежність довжини штанги 4 від вильоту захватного пристрою Р

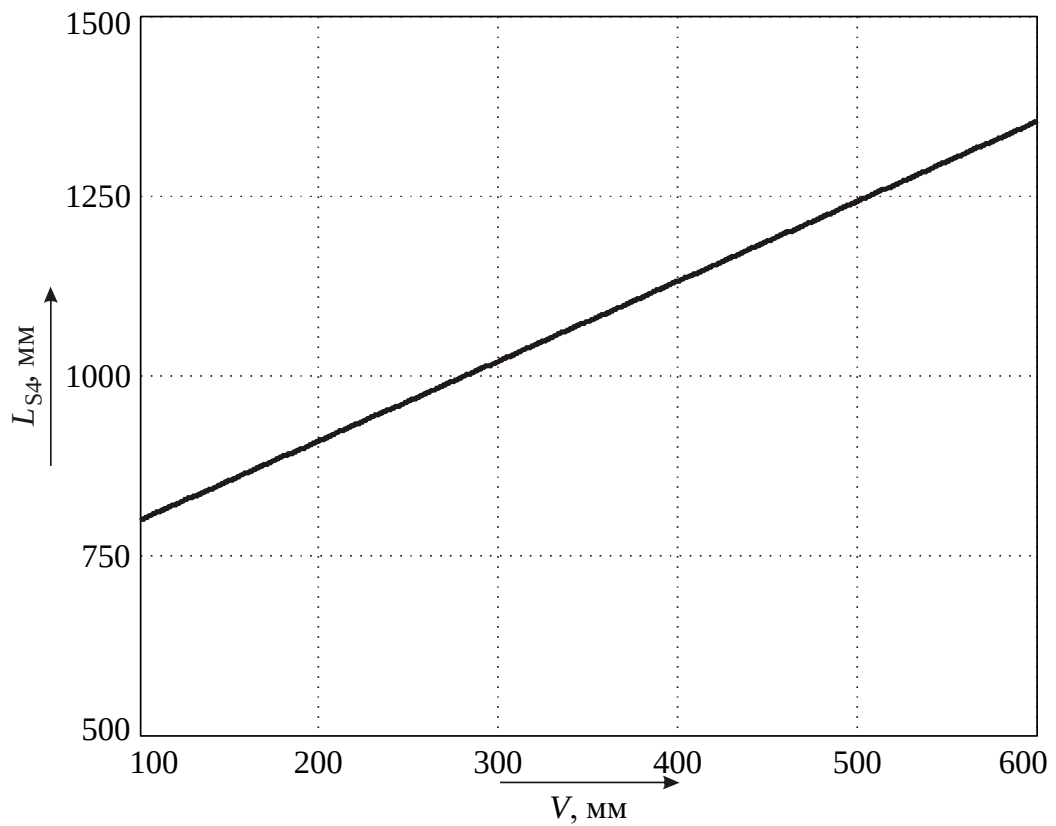


Рис. 2.16 – Залежність довжини штанги 4 від вильоту розташування вилок V кріплення шарнірів даної штанги

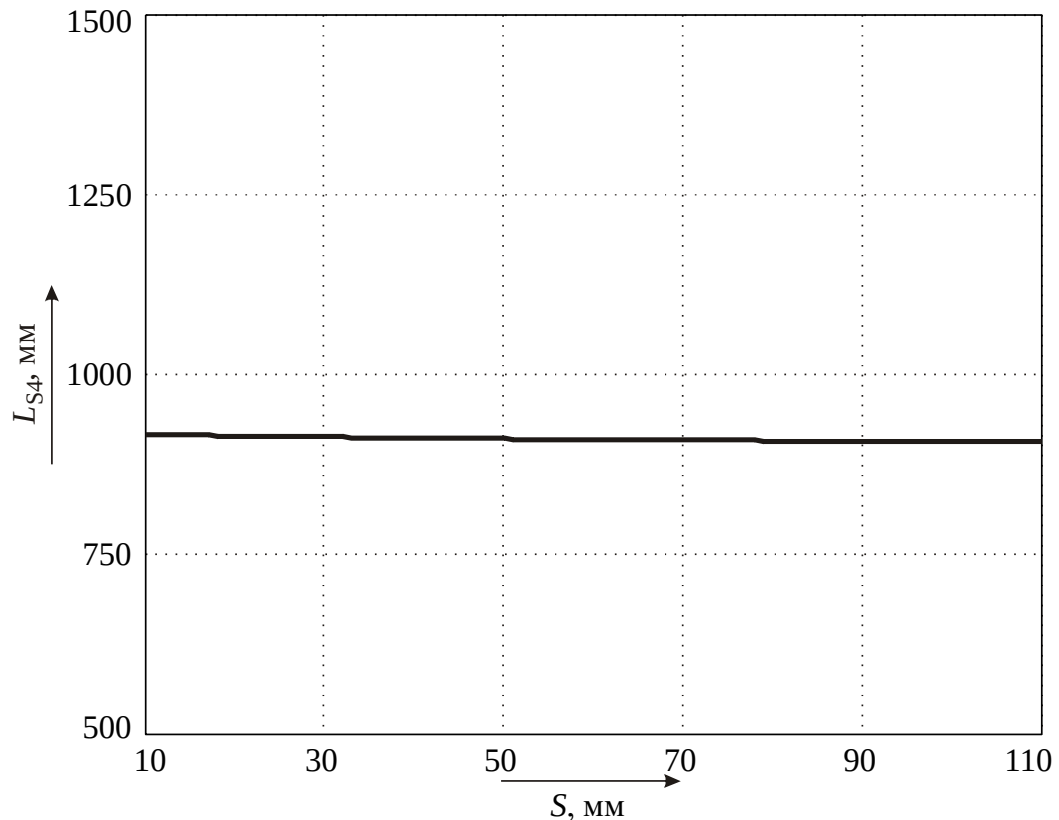


Рис. 2.17 – Залежність довжини штанги 4 від рознесення S центрів шарнірів на вилках даної штанги

Залежності довжини штанги 4 від зміни діаметра робочого простору D , вильоту захватного пристрою P , вильоту розташування вилок V кріплення шарнірів даної штанги мають майже прямопропорційний зростаючий характер. Найбільший вплив спричиняє виліт захватного пристрою P , аналогічний, проте дещо менший – виліт розташування вилок V кріплення шарнірів штанги 4. Діаметр робочого простору D має менший у порівнянні з двома названими параметрами вплив. Характер впливу рознесення S центрів шарнірів на вилках штанги 4 на довжину даної штанги відрізняється своєю пологістю та спадаючим характером.

Основними значимими висновками з проведеного аналізу конструктивних залежностей є рекомендація, що значення запобіжного кута δ для мінімізації габаритів механізму в цілому не повинні бути більшими, ніж 20 градусів, а також рекомендація порядку розрахунку координат

розташування прямої повзуна переміщення штанги 4, за якої значення координати W повине задаватися наперед, до розрахунку значення координати K . Також підтверджено, що мінімізація конструктивних параметрів виконавчого органа робота буде сприяти зменшенню його габаритних розмірів.

РОЗДІЛ 3

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА

3.1 Загальні вихідні дані

Проектний робот є універсальною машиною, що може бути використана як для здійснення механічної обробки деталей основним інструментом, так і для транспортування деталей і заготовок, шляхом заміни одного вузла.

Оскільки даний робот не має прямих аналогів, то для визначення показників економічної ефективності проекту, у якості бази для порівняння приймемо два маніпулятори, один з яких може виконувати лише механічні операції, а інший – операції транспортування. Приймемо, що продуктивність виконання відповідних операцій у порівнюваних варіантах – однакова. Проте, сумарний штучний час виконання операцій проектним роботом враховує також заміну робочого органу (шпинделя на руку і навпаки) і перевстановлення програмного забезпечення (ПЗ) при переході на інший режим роботи. Використання проектного робота дозволить зменшити капітальні вкладення споживача за рахунок заміни двох вузькоспеціалізованих маніпуляторів на один універсальний, а також скоротити втрати, пов'язані з простоюваннями маніпуляторів за відсутності виробничої потреби у виконанні відповідних операцій.

Загальні техніко-економічні показники базових та проектного роботів зведено до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Загальні вихідні техніко-економічні показники

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			Базовий	Проект
1	2	3	4	5
1.	Річна програма випуску продукції	шт./рік	10000	10000
2.	Потреба у роботах-маніпуляторах	шт./рік	2	1

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5
3.	Штучний час виконання операцій: - механічної обробки - транспортування - заміна робочого органу та ПЗ	хв. хв. хв.	0,22 0,04 -	0,22 0,04 0,31
4.	Потужність електродвигунів	кВт	0,7	0,75
5.	Площа, яку займає робот	м ²	1,6	2,0
6.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частини	УРО	7/18	8/20
7.	Оптова ціна робота	грн.	105500	-

3.2 Визначення витрат на підготовку виробництва

Пректний робот-маніпулятор розроблюється на базі існуючої моделі, в процесі модернізації якої замінюється конструкція модуля при збереженні платформи.

3.2.1 Витрати на проектування роботу визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot Z_{сг.к} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_e, \quad (3.1)$$

де $H_{ор}$ – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції модуля, шт.;

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{сг.к}$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

κ_d – додаткова заробітна плата конструктора, %;

B_c – відрахування на соціальні потреби від заробітної плати конструкторів, %;

H_6 – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{\text{нк}} = 1 \cdot 19 \cdot 99,67 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 19 \cdot 99,67 \cdot \frac{45}{100} = 3393,42 \text{ грн.}$$

3.2.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва роботи:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{mex} \cdot Z_{cz.m} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_6, \quad (3.2)$$

де T_{mex} – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{cz.m}$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_t = 1 \cdot 21 \cdot 98,35 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 21 \cdot 98,35 \cdot \frac{55}{100} = 3907,72 \text{ грн.}$$

3.3 Визначення повної собівартості та оптової ціни проектного робота

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного робота розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^n C_{r_i} \cdot T_i, \quad (3.3)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

C_{r_i} – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i -й вид робіт з урахуванням умов праці, грн.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$З_{\text{ор}} = 2,3 \cdot 57,185 = 131,53 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n З_{\text{ор}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{пп}_i}}{100}, \quad (3.4)$$

де $\Pi_{\text{пп}_i}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, витрати на утримання та експлуатацію обладнання на механічних роботах:

в) цехові витрати:

$$B_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^n З_{\text{ор}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{цп}_i}}{100}, \quad (3.5)$$

де $\Pi_{\text{цп}}$ – процент цехових витрат по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$B_o = 131,53 \cdot \frac{285}{100} = 374,85 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{цех}} = 131,53 \cdot \frac{132}{100} = 173,61 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, які включені до собівартості модернізації робота

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн		Загальноцехові витрати $K_{цех}$, грн	
					%	грн.	%	грн.
Ливарні	1,3	3	63,835	82,99	230	190,87	142	117,84
Механічні	2,3	4	57,185	131,53	285	374,85	132	173,61
Слюсарсько- складальні	8,5	4	57,185	486,07	210	1020,75	142	690,22
Інші	5,8	3	51,466	298,50	220	656,71	140	417,90
Всього	17,9	–	–	999,09	–	2243,17	–	1399,58

Повну собівартість модернізації робота розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базової конструкції. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{нов.мод} = M_o + M_d + \Pi_n + B_n + T_v - B_{зв} + E_{тех} + \Pi_{тех} + \\ + Z_{ор} + Z_{др} + B_{сс} + Z_{цп} + B_o + B_{цех} + B_{зав} + B_{ін}, \quad (3.6)$$

де M_o , M_d – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

Π_n – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств, грн.;

Розрахунок витрат на основні матеріали та покупні комплектуючі вироби зведено до табл. 3.3.

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

B_n – напівфабрикати власного виробництва, грн.;

$B_{зв}$ – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн.;

$E_{\text{тех}}, P_{\text{тех}}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

$Z_{\text{др}}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$B_{\text{сс}}$ – відрахування в фонд соціального страхування, грн.;

$Z_{\text{щп}}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$B_{\text{зав}}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{\text{ін}}$ – інші виробничі витрати, грн.;

$B_{\text{не}}$ – поза виробничі витрати, грн.

Таблиця 3.3 – Склад матеріальних витрат на модернізацію робота

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт, кг)	Ціна, грн	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1.	Дюралюміній	кг	0,5	26,60	1702,40
	Всього	—	—	—	3128,74
Покупні комплектуючі					
1.	Комплект підшипників	шт.	1	5000,0	5000,00
2.	Стопорні кільця	шт.	4	20,0	80,00

Розрахунки собівартості робота зводимо до табл. 3.4.

Повну собівартість модернізованого робота визначаємо за формулою:

$$C_{\text{пов.пр}} = C_{\text{пов.б}} - \sum_1^m C_{\text{ан.пов}} + C_{\text{пов.мод}}, \quad (3.7)$$

де $C_{\text{пов.б}}$ – повна собівартість базового верстата, грн.;

m – кількість анульованих деталей та вузлів;

$C_{\text{ан.пов}}$ – собівартість анульованих деталей та вузлів, грн.;

$C_{\text{пов.мод}}$ – повна собівартість деталей та вузлів, що розроблюються (собівартість модернізації), грн.

$$C_{\text{нов.пр}} = 101173,98 - 9652,44 + 13878,46 = 105400 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.4 – Повна собівартість модернізації робота-маніпулятора

№ п.п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.3	381,60
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	15,26
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	P_n	табл. 4.3	5080,00
4.	Зворотні відходи	$-B_{зв}$	5% від M_o	22,90
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	6% від ($M_o + M_d + P_n$)	219,07
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$P_{\text{тех}}, E_{\text{тех}}$	78,8% від $З_{ор}$	787,28
7.	Всього матеріальні витрати			6460,32
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.2	999,09
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	99,91
10.	Відрахування в фонд соціального страхування	B_{cc}	22% від ($З_{ор} + З_{др}$)	241,78
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	8,5% від $З_{ор}$	84,92
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.2	2243,17
13.	Цехові витрати	$B_{цех}$	табл. 4.2	1399,58
14.	Загальнозаводські витрати	$B_{зав}$	220% від $З_{ор}$	2197,99
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	1,43% від $З_{ор}$	14,29
16.	Виробнича собівартість	$C_{\text{вир}}$	$\Sigma(7 \div 15)$	13741,05
17.	Позавиробничі витрати	$B_{пв}$	1,0% від $C_{\text{вир}}$	137,41
18.	Повна собівартість	$C_{\text{пов.мод}}$	$C_{\text{вир}} + B_{пв}$	13878,46

Оптову ціну нового робота-маніпулятора розраховуємо за формулою:

$$\Pi_{\text{онт}} = C_{\text{нов}} + \Pi_n = C_{\text{нов}} \cdot \left(1 + \frac{P_n}{100}\right), \quad (3.8)$$

де Π_n , P_n – відповідно плановий прибуток та рівень рентабельності робота-маніпулятора, грн.

$$\Pi_{\text{онт}} = 105400 \cdot \left(1 + \frac{20}{100}\right) = 126408 \text{ грн.}$$

3.4 Визначення експлуатаційних витрат при застосуванні роботів

Визначення експлуатаційних витрат будемо проводити двох варіантів: базового та нового. До розрахунку включаються лише ті статті витрат, які відрізняються у порівнюваних варіантах. Кошторис річних експлуатаційних витрат розраховується за такими статтями:

- витрати на електроенергію силову;
- витрати на допоміжні матеріали;
- витрати на ремонт;
- витрати на утримання приміщення;
- амортизаційні відрахування;
- витрати на переналагодження робота.

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{е}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot K_{\text{о}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{д}}}{\eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{с}}} \cdot T_{\text{нор}} \cdot \Pi_{\text{ел}}, \quad (3.9)$$

де $N_{\text{в}}$ – встановлена потужність електродвигунів робота, кВт;

$K_{\text{о}}$ – коефіцієнт одночасної роботи двигунів (приймають 0,65...0,8);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для фрезерної обробки – 0,6...0,7);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за часом (приймають 0,4);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів – 0,86;

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

$T_{нор}$ – норма часу на виконання операції, хв.;

$C_{ел}$ – ціна 1 кВт-год силової електроенергії без ПДВ, грн.

В базовому варіанті:

$$B_{ел}^{баз} = \frac{(0,75 \cdot 0,22 + 0,7 \cdot 0,04) \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot 4,5 = 0,1581 \text{ грн.};$$

В проектному варіанті:

$$B_{ел}^{пр} = \frac{0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot 0,26 \cdot 4,5 = 0,1597 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{мв} = \frac{M_{гв} \cdot R_m \cdot T_{нор}}{100} \cdot K_{п}, \quad (3.10)$$

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

R_m – категорія складності ремонту механічної частини робота, УРО;

$K_{п}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $K_{п} = 1,0$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 7 \cdot 0,26}{100} \cdot 1,0 = 1,4469 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{79,5 \cdot 8 \cdot 0,26}{100} \cdot 1,0 = 1,6536 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot \Gamma_{\text{вс}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot T_{\text{нор}}, \quad (3.11)$$

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

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

$$B_{\text{р}}^{\text{баз}} = \frac{7 \cdot 880 + 18 \cdot 720}{3950} \cdot 0,26 = 1,2585 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{р}}^{\text{пр}} = \frac{8 \cdot 880 + 20 \cdot 720}{3950} \cdot 0,26 = 1,4112 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot T_{\text{нор}}, \quad (3.12)$$

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає робот, включаючи площу його переміщення, м²;

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м² виробничого приміщення, грн./м².

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{1,6 \cdot 0,26}{3950} \cdot 780 = 0,0821 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{2,0 \cdot 780 \cdot 0,26}{3950} = 0,1027 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію робота:

$$B_a = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_a}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot T_{\text{нор}}, \quad (3.13)$$

де H_a – норма амортизації, %;

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

Балансову вартість робіт знайдемо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = \Pi_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}}), \quad (3.14)$$

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

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

Таким чином, балансова вартість:

– базового робота:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 105500 \cdot (1 + 0,06 + 0,05) = 117105 \text{ грн.},$$

– нового робота:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} = 126408 \cdot (1 + 0,06 + 0,05) = 140313 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{баз}} = \frac{117105 \cdot 15 \cdot 0,26}{3950 \cdot 100} = 1,1562 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{пр}} = \frac{140313 \cdot 15 \cdot 0,26}{3950 \cdot 100} = 1,3854 \text{ грн.}$$

Витрати на переналагодження проєктного робота:

$$B_n = C_{\text{гн}} (1 + K_{\text{д}})(1 + K_c) \frac{T_{\text{нал}} \cdot A}{60 \cdot N_{\text{д}}}, \quad (3.15)$$

де $C_{\text{гн}}$ – годинна тарифна ставка наладчика, грн./год.;

A – кількість налагоджень на рік;

$T_{\text{нал}}$ – час налагодження, хв.;

$N_{\text{д}}$ – річна програма випуску деталей, шт./рік.

$$B_n^{\text{пр}} = 62,784(1 + 0,1)(1 + 0,22) \frac{0,3112}{60 \cdot 10000} = 0,0005 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Експлуатаційні витрати

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Силовa електроенергія	$B_{\text{ел}}$	0,1581	0,1597
2.	Допоміжні матеріали	$B_{\text{дм}}$	1,4469	1,6536
3.	Ремонт робота	$B_{\text{р}}$	1,2585	1,4112
4.	Утримання приміщення	$B_{\text{уп}}$	0,0821	0,1027
5.	Амортизація робота	$B_{\text{а}}$	1,1562	1,3854
6.	Переналагодження робота	$B_{\text{н}}$	-	0,0005
Загальна сума		$B_{\text{с}}$	4,1018	4,7131

3.5 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект, який отримує виробник модернізованого робота, розраховуємо за формулою:

$$E_{\text{рв}} = (U_{\text{опт}}^{\text{пр}} - C_{\text{пов}}^{\text{пр}}) \cdot \Pi_{\text{в}} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}}, \quad (3.16)$$

де $U_{\text{опт}}^{\text{пр}}$ – оптова ціна проектного робота, грн.;

$C_{\text{пов}}^{\text{пр}}$ – повна собівартість проектного робота, грн.;

$\Pi_{\text{в}}$ – програма виробництва робіт, шт./рік;

$E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень ($E_{\text{н}} = 0,16$);

$K_{\text{в}}$ – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_{\text{в}} = B_{\text{пк}} + B_{\text{т}}, \quad (3.17)$$

де $B_{\text{пк}}$, $B_{\text{т}}$ – відповідно вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$$K_{\text{в}} = 3393,42 + 3907,72 = 7301,14 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рв}} = (126408 - 105400) \cdot 1 - 0,16 \cdot 7301 = 19840 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект у споживача розраховуємо за формулою:

$$E_{\text{рсп}} = (B_{\text{е}}^{\text{баз}} - B_{\text{е}}^{\text{пр}}) \cdot N_{\text{д}} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{сп}}, \quad (3.18)$$

де $P_{\text{е}}^{\text{баз}}$, $P_{\text{е}}^{\text{пр}}$ – експлуатаційні витрати відповідно в базовому та проектному варіантах, грн.;

N_d – річна програма випуску деталей, шт./рік;

$K_{сп}$ – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$K_{сп} = \Phi_{бал}^{пр} \cdot Q_{пр} - \Phi_{бал}^{баз} \cdot Q_{баз}, \quad (3.19)$$

$\Phi_{бал}^{пр}, \Phi_{бал}^{баз}$ – відповідно балансова вартість проектного та базових робіт, грн.;

$Q_{пр}, Q_{баз}$ – потреба у роботах для виконання річної виробничої програми виготовлення деталей.

$$K_{сп} = 140313 \cdot 1 - 117105 \cdot 2 = -93897 \text{ грн.}$$

$$E_{рсп} = (4,1018 - 4,7131) \cdot 10000 - 0,16 \cdot (-93897) = 8900 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника:

$$T_{окв} = \frac{K_{с}}{(C_{опт}^{пр} - C_{пов}^{пр}) \cdot P_{в}} = \frac{7301}{(126408 - 105400) \cdot 1} = 0,35 \text{ року} = 4,2 \text{ міс.} \quad (3.20)$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Підсумкові техніко-економічні показники проекту

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1	2	3	4	5	6
1.	Потреба у роботах	шт./рік	2	1	-50,0
2.	Річний випуск виробів	шт./рік	10000	10000	—

Продовження табл. 3.6

1	2	3	4	5	6
3.	Штучний час виконання операцій: - механічної обробки - транспортування - заміна робочого органу та ПЗ	хв. хв. хв.	0,22 0,04 —	0,22 0,04 0,31	
4.	Повна собівартість - модернізації робота - модернізованого робота	грн. грн.	—	13878 105400	—
5.	Оптова ціна роботу	грн.	105500	126408	+19,8
6.	Експлуатаційні витрати із застосуванням робота (на один виріб)	грн.	4,1018	4,7131	+14,9
7.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	7301	—
8.	Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника	міс.	—	4,2	—
9.	Річний економічний ефект: а) у виробника б) у споживача	грн. грн.	— —	19840 8900	— —

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 проведеному огляді промислових роботів показано, що на сучасному етапі їх розвитку превалюють дві тенденції, а саме використання маніпуляторів з замкненими кінематичними ланцюгами та розміщення двигунів приводів на елементах основи робота. Подібним тенденціям у повній мірі задовольняє технологічне обладнання, побудоване на основі паралельних кінематичних структур. В даній роботі представлено нову конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур. Її перевагою, окрім поєднання двох основних тенденцій розвитку робототехніки, є розділення кінематичних рухів вихідного органу робота на лінійні і кутові переміщення. Це дозволяє суттєво розширити величини рухів або мінімізувати габарити маніпулятора в порівнянні з конструкціями, де такого функціонального розділення рухів не відбувається.

На основі розробленої схеми запропонованої конструкції робота отримано конструктивні залежності для синтезу приводу лінійних переміщень рухомої платформи і приводу повороту руки та орієнтації захватного пристрою, що дозволяє розрахувати координати розташування напрямних повзунів переміщення штанг та довжини самих штанг при повній рухомості руки у межах обраного робочого простору, формою якого обрано циліндр. Проведено дослідження отриманих конструктивних залежностей, основними значимими висновками якого є рекомендація, що значення запобіжного кута δ для мінімізації габаритів механізму в цілому не повинні бути більшими, ніж 20 градусів, а також рекомендація порядку розрахунку координат розташування напрямної повзуна переміщення штанги приводу повороту руки та орієнтації захватного пристрою, за якої значення координати W повине задаватися наперед, до розрахунку значення координати K . Також підтверджено, що мінімізація конструктивних параметрів виконавчого органа робота буде сприяти зменшенню його габаритних розмірів.

Додатково до поставленої мети підтверджено економічну ефективність від впровадження проекту п'ятикоординатного робота. Очікуваний економічний ефект у виробника продукції в складає 19840 грн, у споживача – 8900 грн. Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника становить 4,2 місяці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. http://wwwcdl.bmstu.ru/rk2-tmm/lect_19.htm.
2. 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.
3. 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.
4. Бочков В.М., Сілін Р.І. Обладнання автоматизованого виробництва. Навчальний посібник / За ред. Сіліна Р.І. – Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2000. – 380 с.
5. Костюк В.І., Спину Г.О., Ямпольський Л.С. Робототехніка. – К.: Вища школа, 1994. – 446 с.
6. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою.- Кіровоград.2004. - 449с.
7. Кузнецов Ю.Н., Дмитриев Д.А., Диневич Г.Е. Компоновки станок с механизмами параллельной структуры / Под ред. Ю.Н. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2010. – 471 с.
8. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 420 с.
9. Павленко І.І. Рухові характеристики промислових роботів. – Кіровоград: КДТУ, 2000. – 124 с.
10. Павленко І.І. Структура промислових роботів. – Кіровоград: КІСМ, 1998. – 100 с.

11. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. – Житомир, ЖІТІ, 2001. – 612 с.
12. Струтинський В.Б., Мельничук П.П. Математичне моделювання металорізальних верстатів. – Житомир, ЖІТІ, 2002. – 570 с.
13. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання: Навчальний посібник / Ю.В. Кодра, З.А. Стоцько; За ред. З.А. Стоцька. – Львів: Бескид БІТ, 2004. – 466 с.
14. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / Под ред. В.С. Кулешова. – М.: Машиностроение, 1986.
15. Clavel, R., "Device for the Movement and Positioning of an Element in Space," US Patent No. 4,976,582, December 11, 1990.
16. Кузнєцов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.А. Теорія технічних систем. – К. – Т., 1998. – 310 с.
17. Кузнєцов Ю.М. Станки с ЧПУ и станочніе комплекси. – К. – Т. ЗМОК, 2000. – 343 с.
18. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. 40 с.
19. Організація виробництва на промисловому підприємстві / Під ред. Ю.А. Єгупова Київ: Центр навч. літератури, 2006. 488 с.
20. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник // Под общ. ред. К.М. Великанова. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1990. 448 с.