

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:

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

Виконала здобувачка вищої освіти
II-го курсу групи ПМ-23М-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності 131 «Прикладна
механіка»

_____ Юлія АУЛІНА

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	131 Прикладна механіка
Освітньо- професійна програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ММіР

_____ Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2024 р.

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

Юлії АУЛІНОЇ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Визначення силових залежностей п'ятикоординатного
робота на основі паралельних кінематичних структур
2. Керівник роботи: _____ к.т.н., доцент Андрій ГРЕЧКА
3. Строк подання роботи до захисту _____ 10 грудня 2024 р.
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи

Мета роботи: 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.

Завдання:

огляд існуючих типів промислових роботів та підбір прототипів;
розробка на рівні схеми конструкції п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
розробка схеми навантаження п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
розробка математичної моделі силового навантаження п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
розрахунок силових залежностей в штангах п'ятикоординатного робота для раціонального підбору двигунів приводів подачі вихідного органу та подальшого розв'язку задач динаміки;
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.	12.09	вик.
2.	Огляд літературних джерел.	27.09	вик.
3.	Розробка схеми механізму і опис конструкції.	07.10	вик.
4.	Розв'язок зворотної задачі кінематики.	12.10	вик.
5.	Розробка схеми навантаження.	19.10	вик.
6.	Розробка математичної моделі силового навантаження.	26.10	вик.
7.	Розрахунок силових залежностей в штангах п'ятикоординатного робота.	02.11	вик.
8.	Аналіз отриманих графіків.	09.11	вик.
9.	Розрахунок економічної ефективності.	19.11	вик.
10.	Оформлення пояснювальної записки.	29.11	вик.
11.	Оформлення презентації роботи.	01.12	
12.	Здача роботи на кафедрі та перевірка на антиплагіат.	10.12	вик.

Дата видачі завдання «_____» _____ 20__ р.

Керівник роботи _____ Андрій ГРЕЧКА
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «_____» _____ 20__ р.

Здобувач вищої освіти _____ Юлія АУЛІНА
(підпис)

Анотація

АУЛІНА Юлія. Визначення силових залежностей п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур. Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2024. – 82 с. Матеріали презентації 12 іл.

Розроблено схеми навантаження вихідного органу п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур. Розроблено математичні моделі внутрішніх сил в штангах механізму. Проведено комп'ютерне моделювання впливу параметрів схем навантаження на величини внутрішніх сил в штангах механізму. Результати моделювання представлено у вигляді графіків.

Очікуваний економічний ефект у виробника продукції в складає 23800 грн, у споживача – 20900 грн.

Актуальність: вперше розроблені просторові схеми навантаження вихідного органу п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур та вперше отримано аналітичні залежності впливу параметрів цих схем на величини реакцій, що виникають в штангах приводу переміщення зазначеного органу та у його з'єднувальному поворотному шарнірі.

Практичне значення: розроблено схему п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур, розв'язано зворотні кінематичні задачі, розроблено схеми навантаження вихідного органу зазначеного механізму та проведено розрахунки величин внутрішніх силових факторів, що виникають у його штангах.

Ключові слова: робот, паралельні кінематичні структури, схеми навантаження, математична модель.

Summary

AULINA Yuliia. Determination of force dependencies of a five-axis robot based on parallel kinematic structures. Qualification work at the second (master's) level of higher education: CUNTU, 2024.– 82 p. Presentation materials 12 il.

It is developed the loading schemes of the end effector of a five-coordinate robot based on parallel kinematic structures. It is developed mathematical models of internal forces in the rods of the mechanism. Computer modeling of the influence of parameters of loading schemes on value of internal forces in the rods of the mechanism was carried out. The results of modeling are presented in the form of graphs.

The expected economic effect for the producer of products is UAH 23,800, for the consumer – UAH 20,900.

Keywords: robot, parallel kinematic structures, loading schemes, mathematical model.

ЗМІСТ

	сторінка
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА СТРУКТУРА ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ. ОГЛЯД ПРОТОТИПІВ	10
1.1 Класифікація промислових роботів	10
1.2 Функціональне призначення, структура та характеристики промислових роботів	12
1.3 Огляд прототипів на основі механізмів паралельної кінематики	25
1.4 Мета і задачі досліджень	30
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ СИЛОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА	33
2.1 Опис пропонованої конструкції робота	33
2.2 Розв'язок зворотних кінематичних задач	36
2.3 Математична модель силових залежностей	43
2.4 Розрахунок реакцій в штангах п'ятикоординатного робота	56
РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА	64
3.1 Загальні вихідні дані	64
3.2 Визначення витрат на підготовку виробництва	65
3.3 Визначення повної собівартості та оптової ціни проектного робота	66
3.4 Визначення експлуатаційних витрат при застосуванні роботів	71
3.5 Розрахунок показників економічної ефективності	76
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81

ВСТУП

Актуальність роботи. В останній час транспортувальне технологічне обладнання, побудоване на основі паралельних кінематичних структур, знаходить все більше розповсюдження в машинобудівній галузі. При степені вільності вихідного органа більше трьох конструктивна реалізація такого обладнання стає порівнянно простою в порівнянні зі зразками, побудованими на основі традиційних послідовних кінематичних схемах. А велика різниця в жорсткості обладнання на користь першого типу надає можливість здійснювати транспортувальні операції з на порядок вищими швидкостями. Описана рухомість обладнання забезпечує високу функціональність з точки зору транспортувальних операцій, проте є певні недоліки у її реалізації. Основним з них є малий коефіцієнт використання робочого простору. Хоча для механізмів з паралельною кінематикою вже відомі способи підвищення просторової рухомості за однакової кількості приводів. Вони полягають у функціональному розділенні приводів лінійних та кутових переміщень.

Транспортувальне технологічне обладнання, побудоване на основі паралельних кінематичних структур, у повній мірі задовольняє такій тенденції розвитку робототехніки, як використання маніпуляторів з замкненими кінематичними ланцюгами при розміщенні двигунів приводів на елементах основи робота. Шарнірна стрижнева конструкція у поєднанні з малою масою переміщуваних елементів конструкцій без їх поступового нагромадження призводять до збільшення динамічних показників. На перших етапах синтезу такого обладнання важливим є питання розрахунку внутрішніх силових факторів, які є одними з чинників, що безпосередньо впливають на міцність машини, вибір двигунів, є складовими навантаження шарнірних з'єднань механізму. Визначення силових залежностей п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур є актуальним науково-технічним завданням, що має практичну цінність.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є визначення силових залежностей п'ятикоординатного робота, побудованого на основі паралельних кінематичних структур, для раціонального підбору двигунів приводів подачі вихідного органу та подальшого розв'язку задач динаміки. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести огляд існуючих типів промислових роботів та виконати підбір прототипів;
- розробити на рівні схеми конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розробити схеми навантаження п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розробити математичну модель силового навантаження п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розрахувати силові залежності в штангах п'ятикоординатного робота для раціонального підбору двигунів приводів подачі вихідного органу та подальшого розв'язку задач динаміки.

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

Об'єкт дослідження – п'ятикоординатний робот на основі паралельних кінематичних структур.

Предмет дослідження – параметри схеми навантаження п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур.

Практичне значення – розроблено схему п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур, розв'язано зворотні кінематичні задачі, розроблено схеми навантаження вихідного органу зазначеного

механізму та проведено розрахунки величин внутрішніх силових факторів, що виникають у його штангах.

Особистий внесок – розв’язано зворотні кінематичні задачі, розроблено схеми навантаження вихідного органу п’ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур, розраховано величини внутрішніх силових факторів, що виникають у його штангах, проаналізовано отримані залежності та надано окремі рекомендації щодо проектування механізму з урахуванням розподілу внутрішніх силових факторів.

РОЗДІЛ 1

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА СТРУКТУРА ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ. ОГЛЯД ПРОТОТИПІВ

1.1 Класифікація промислових роботів

На початку важливо розібратися з різницею у поняттях «промисловий робот» і «маніпулятор». На сьогоднішній день прийнято наступні визначення. Промисловий робот – це машина, функціонування якої відбувається в автоматичному режимі, та містить в собі маніпулятор і пристрій програмного управління його рухами, призначення якої спрямоване на вивільнення людини з виконання різноманітних, особливо монотонних, операцій у технологічних виробничих процесах. Маніпулятор – це поєднання просторового (в простих випадках плоского) важільного механізму та системи приводів, які здатні за командами наперед запрограмованого пристрою чи під керуванням безпосередньо людини-оператора здійснювати необхідні рухи (маніпуляції), що в необхідному обсязі забезпечують відтворення функціоналу руки людини. Виходячи зі сказаного, «маніпулятор» є більш вузьким поняттям, що охоплює тільки механічну частину пристрою та сукупність приводних двигунів. «Промисловий робот» в такому випадку є більш загальним поняттям, оскільки до електромеханічної системи додатково включає і систему управління.

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

За характером виконуваних технологічних операцій:

- основні;
- допоміжні;
- універсальні.

За видом промислового виробництва:

- ливарні;

- зварювальні;
- кувально-штампувальні;
- для механічної обробки;
- складальні;
- фарбувальні;
- транспортно-складські.

За системою координат руки маніпулятора:

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

За числом рухомотей маніпулятора.

За вантажопідйомністю:

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

За типом силового приводу:

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

За рухомістю основи:

- мобільні;
- стаціонарні.

За видом програми керування:

- з жорсткою програмою;
- перепрограмовані;

- адаптивні;
- з елементами штучного інтелекту.

За характером програмування:

- позиційне;
- контурне;
- комбіноване.

Як і кожна класифікація, даний перелік ознак не є остаточним і може бути доповненим з урахуванням специфіки застосування промислових роботів.

1.2 Функціональне призначення, структура та характеристики промислових роботів

Основним функціональним призначенням будь-якого маніпулятора промислового робота є забезпечення переміщення об'єкта маніпулювання, який закріплений в вихідній ланці пристрою, за наперед заданою траєкторією і з заданою орієнтацією у просторі. Слід однак зауважити, що в сучасних системах управління з адаптивним штучним інтелектом можуть задаватися лише крайні положення і орієнтація об'єкта маніпулювання, а проміжна траєкторія визначається безпосередньо системою управління.

Для повного виконання описаного функціонального призначення в загальному випадку важільний механізм маніпулятора повинен володіти не менше, ніж шість рухомостей, до того ж рух за кожною з передбачених рухомостей повинен бути керованим. Такі промислові роботи, що володіють шістьма (і більше) рухомостями, є складними автоматичними системами, причому як у виготовленні, так і в процесі експлуатації. Звісно, вартість такого робота буде великою, і вона буде перенесена на вартість кінцевої продукції, у виробництві якої він використовується. Відтак часто реальні зразки промислових роботів будуються на основі механізмів з рухомостями менше

шести. В простих випадках маніпулятори мають три, подекуди дві рухомості. Звісно, що за простотою таких маніпуляторів йде їх здешевшення, проте технологічна функціональність також знижуються. Це необхідно враховувати при організації робочого простору маніпулятора. Найбільше такі спрощені конструкції входять до складу робото-технологічних комплексів, що мають жорсткі обмеження на орієнтацію як об'єктів маніпулювання, так і самих елементів маніпулятора у складі технологічної машини вищого рівня.

Візьмемо для прикладу структурну і функціональну схему маніпулятора, що володіє трьома рухомостями. Основна механічна частина зазначеного маніпулятора складається з нерухомої ланки 0 і трьох рухомих ланок 1, 2 і 3, як показано на рис. 1.1.

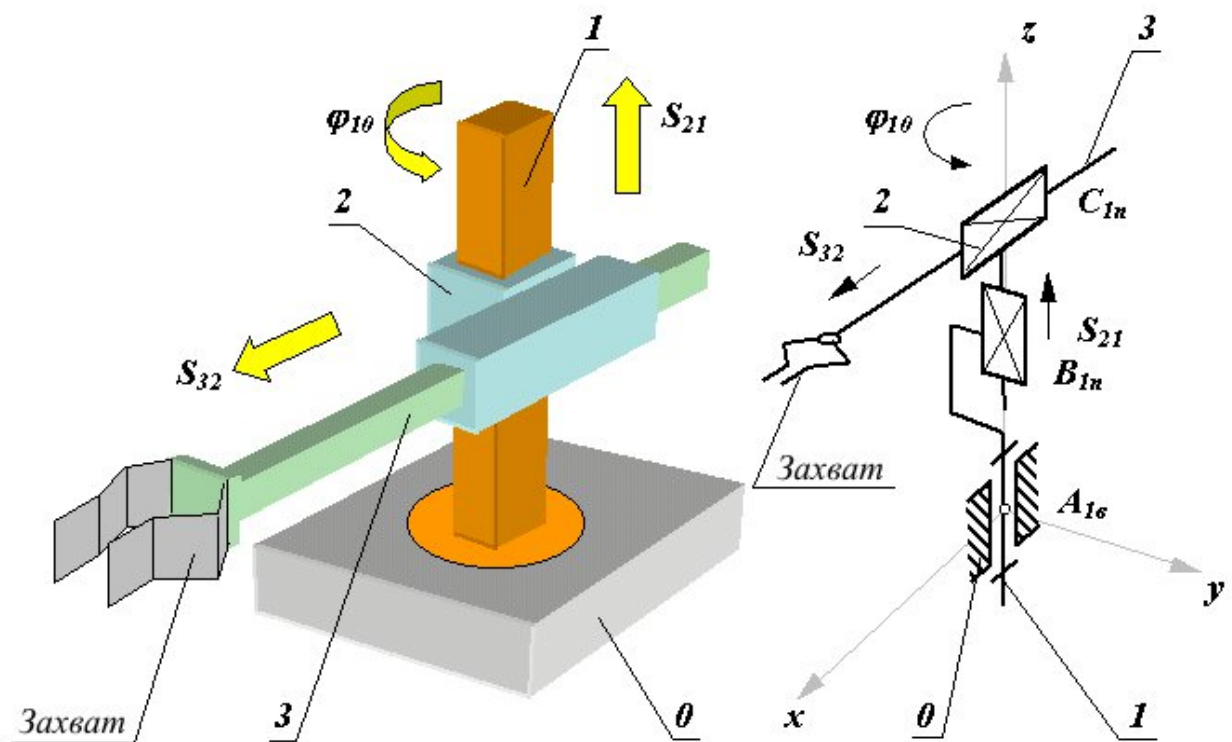


Рис. 1.1 – Структурна схема маніпулятора з трьома рухомостями

Функціонування цього маніпулятора побудоване на основі циліндричної системи координат. У цій системі ланка 1 обертається відносно ланки 0 (відносне кутове переміщення φ_{10}), ланка 2 переміщується вертикально відносно ланки 1 (відносне лінійне переміщення S_{21}) і ланка 3

переміщується відносно ланки 2 по горизонталі (відносно лінійне переміщення S_{32}). На кінці ланки 3 кріпиться пристрій для захвату й утримання об'єкта маніпулювання при роботі маніпулятора. Описані ланки важільного механізму маніпулятора утворюють між собою три прості кінематичні пари з одним рухом (одну обертальну А і дві поступальні В і С), забезпечуючи при цьому переміщення об'єкта маніпулювання в просторі з незмінною орієнтацією. Для здійснення кожного із трьох відносних рухів маніпулятор оснащується відповідним приводом, у складі якого є двигун, перетворюючий механізм, датчики зворотного зв'язку. Система управління роботом складається з ЕОМ, з необхідним програмним забезпеченням, цифроаналогових перетворювачів і підсилювачів. Система управління перетворює задану програму в сигнали керування двигунами у вигляді керуючих впливів u_i , що можуть коригуватися по сигналах Δx_i від датчиків зворотного зв'язку.

Функціональна схема промислового робота показана на рис. 1.2.

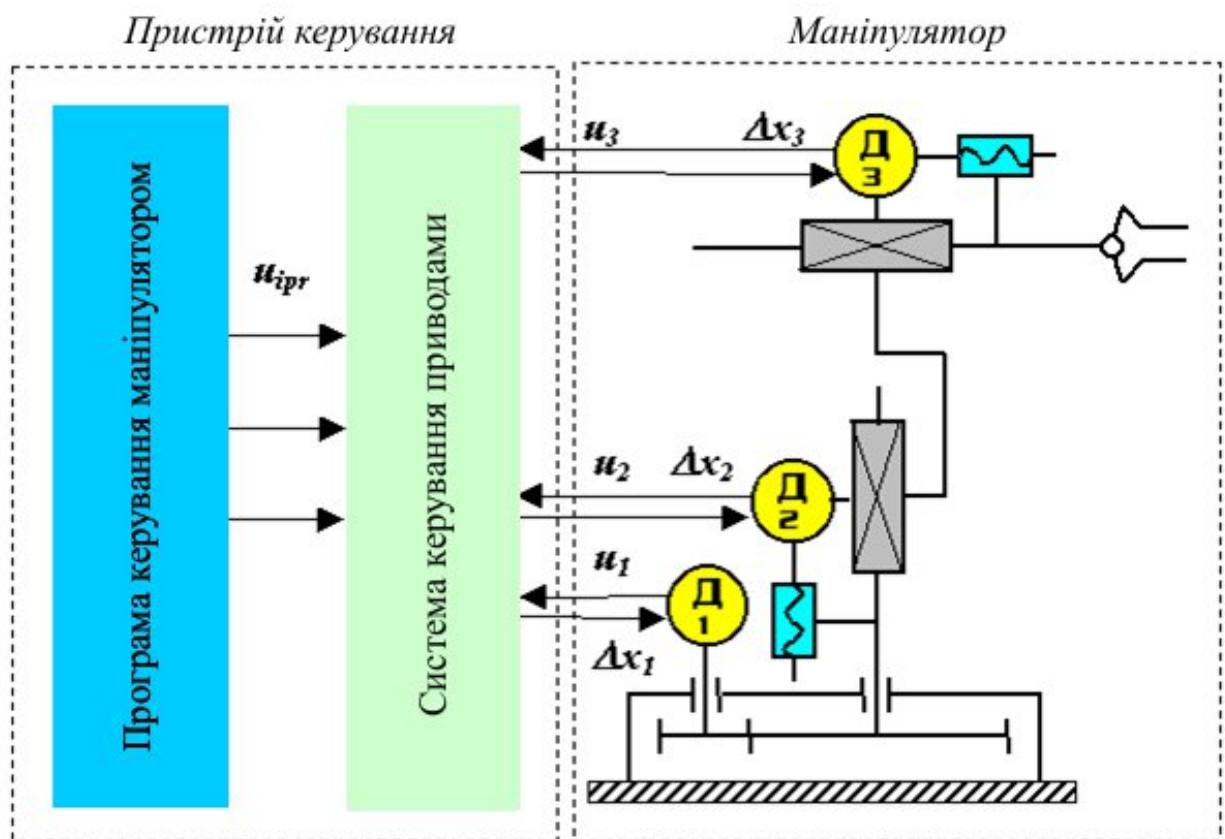


Рис. 1.2 – Функціональна схема промислового робота

Опис структури маніпуляторів може бути здійснено у вигляді формул їх будови. Формула будови маніпулятора – це запис структурної схеми маніпулятора у математичній формі, що містить інформацію про кількість його рухомостей, вид застосованих кінематичних пар, їх просторову орієнтацію відносно осей прийнятої системи координат, яка, як правило, пов'язується з нерухомою ланкою маніпулятора.

Рухи, які забезпечуються маніпулятором, можна поділити на:

- *глобальні* (для роботів з рухомою основою) – рухи стійки маніпулятора, які суттєво перевищують розміри механізму;
- *регіональні* (транспортні) – рухи, що забезпечуються першими (від базового елемента) трьома ланками маніпулятора або його «рукою», і величина яких співставна з розмірами механізму;
- *локальні* (орієнтувальні) – рухи, що забезпечуються ланками маніпулятора, які утворюють його «кисть», і величина яких помітно менше розмірів механізму.

У відповідності з наведеною класифікацією рухів, в маніпуляторі можна виділити дві складові ділянки кінематичного ланцюга з різними функціями: механізм «руки» і механізм «кисті». «Рукою» будемо називати той механізм маніпулятора, який покликаний забезпечити переміщення центру захвату – точки М (регіональні рухи захвату). «Кистю» будемо називати той механізм маніпулятора, який забезпечує орієнтацію захвату (локальні рухи захвату).

Розглянемо структурну схему антропоморфного маніпулятора, що в першому наближенні може розглядатися як відповідник механізму руки людини (рис.1.3). До складу даного механізму входять три рухомі ланки і три кінематичні пари: дві трьохрухомі сферичні $A_{3сф}$ і $C_{3сф}$ і одна однорухома оберտальна $B_{1в}$.

Для опису кінематичних пар маніпулятора будемо користуватися: іменем або позначенням - велика буква латинського алфавіту (А, В, С і т.д.); сукупністю ланок, що утворюють пари (0/1, 1/2 і т.д.); відносним рухом цих

ланок у парі (наприклад, для однорухомих пар він може бути обертальним, поступальним і гвинтовим); рухомістю кінематичної пари (для нижчих пар вона складає від 1 до 3, для вищих пар - від 4 до 5); віссю орієнтації осі кінематичної пари відносно осей прийнятої системи координат.

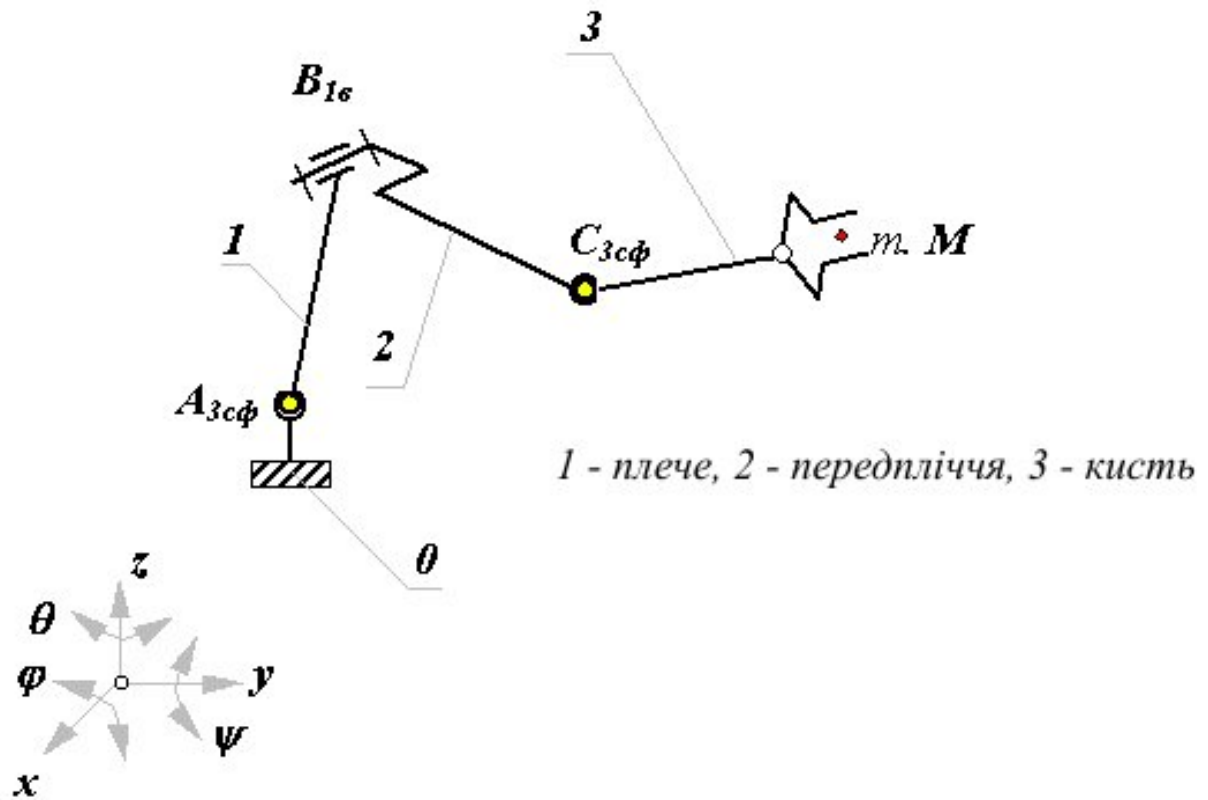


Рис. 1.3 – Схема антропоморфного маніпулятора

Для більш повного розкриття функціональності промислових роботів наведемо наступні важливі поняття та визначення.

Робочим простором маніпулятора називають ту частину простору, яка обмежена поверхнями, що є огибаючою до множини можливих крайніх положень його ланок.

Зоною обслуговування маніпулятора називають ту частину простору, яка утворюється множиною можливих положень центру захвату маніпулятора. Ця зона є важливою характеристикою маніпулятора. Її розміри від структури маніпулятора, наявними конструктивними обмеженнями, що накладаються відносними переміщеннями ланок кінематичних пар.

Рухомістю маніпулятора W називають кількість незалежних узагальнених координат, якими однозначно визначається розташування захвату в просторі. Визначається вона за формулою:

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

Для випадку використання незамкнених кінематичних ланцюгів:

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

Маневреністю маніпулятора M називають рухомість маніпулятора при зафіксованому (нерухомому) захваті:

$$M = W - 6.$$

Кутом сервісу ψ – це кут, що описується останньою ланкою маніпулятора (на якій закріплено захват), якщо центр захвата фіксується в заданій точці зони обслуговування. Даний кут визначає можливість зміни орієнтації захвату і визначається за формулою:

$$y = f_C / l_{CM}^3,$$

де f_C – площа сферичної поверхні, що описується точкою C ланки 3, l_{CM} – довжина ланки 3 на рис. 1.3.

Відносна величина $k_y = y / (4\pi)$ називається коефіцієнтом сервіса.

В числовому вираженні рухомість антропоморфного маніпулятора становить

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

його маневровість складає

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

при цьому формула побудови описується

$$W = [Q_{10} + j_{10} + y_{10}] + j_{11} + [Q_{32} + j_{32} + y_{32}].$$

Структура кінематичного ланцюга маніпулятора покликана забезпечити необхідне переміщення об'єкту маніпулювання в просторі, причому з заданою орієнтацією. Це стане можливим, коли захват маніпулятора матиме можливість виконувати рухи як мінімум по шести координатам: трьом лінійним і трьом кутовим. Візьмемо на об'єкті маніпулювання точку M , яка буде співпадати з центром захвату. В такому випадку розташування об'єкта в нерухомій (базовій) системі координат $Ox_0y_0z_0$ визначатиметься радіус-вектором точки M та орієнтацією одиничного вектора $\bar{A}$ з початком у цій точці. В математиці для опису розташування точки у просторі використовується одна з трьох систем координат:

- прямокутна декартова з координатами x_M, y_M, z_M (три лінійні координати);
- циліндрична з координатами r_{sM}, φ_M, z_M (дві лінійні та одна кутова координати);
- сферична з координатами r_M, φ_M, θ_M (одна лінійна та дві кутові координати).

Для опису орієнтації об'єкта у просторі використовуються кути α, β і γ , що їх одиничний вектор $\bar{A}$ утворює з осями базової системи координат. На рис. 1.4 наведено схему координат об'єкта маніпулювання маніпулятора з шістьма рухомостями, утвореному з обертальних кінематичних пар.

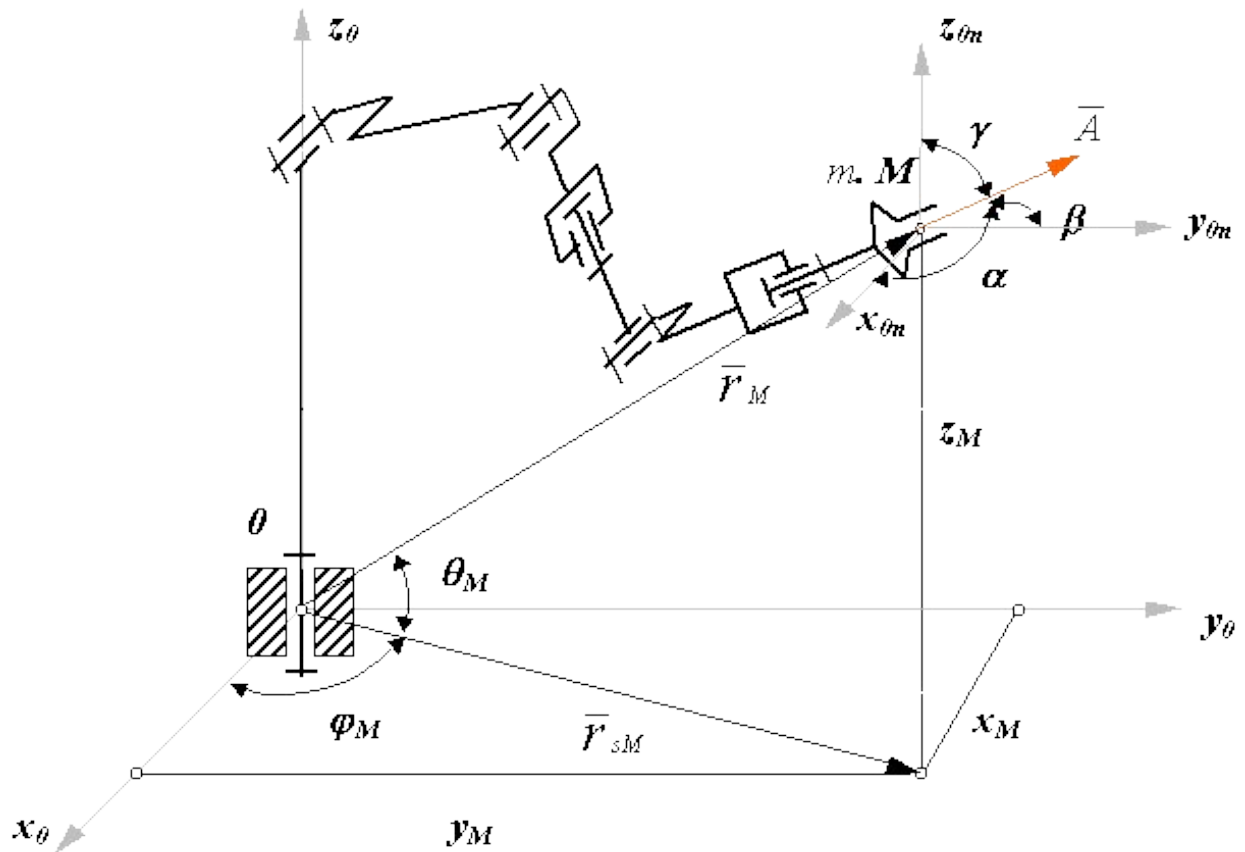
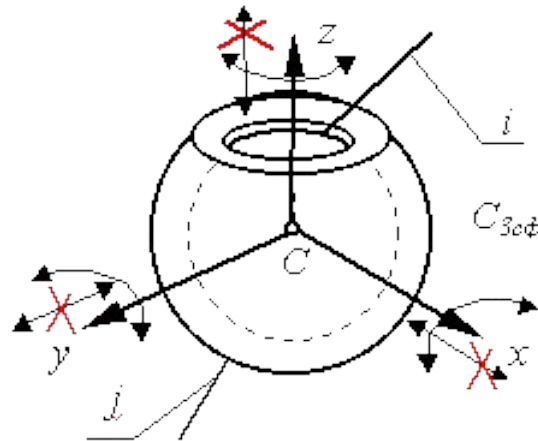


Рис. 1.4 – Умовне позначення координат об'єкта маніпулювання

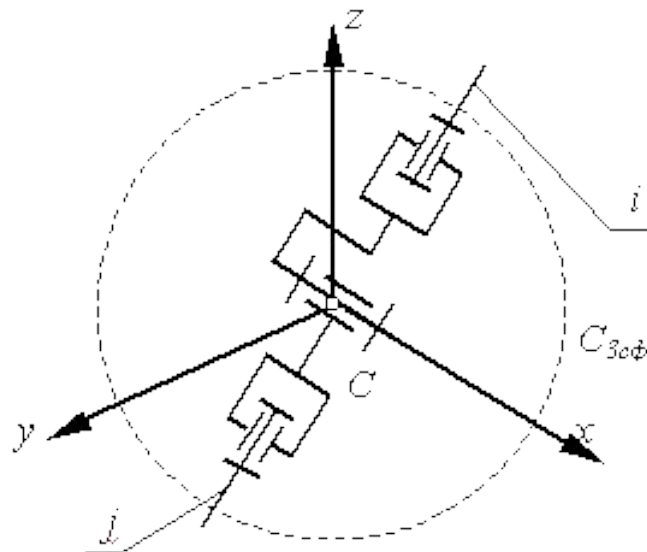
При структурному синтезі механізму маніпулятора варто враховувати таке:

- кінематичні пари маніпуляторів приводяться у рух приводами, що включають двигуни і гальмівні пристрої, відтак в схемах маніпуляторів найчастіше застосовуються однорухомі кінематичні пари: як обертальні, так і поступальні;
- важливо поряд з забезпеченням заданої рухомості захвату маніпулятора передбачити таку орієнтацію осей кінематичних пар, при якій досягається необхідна форма зони обслуговування, забезпечується простота і зручність програмування його рухів;
- орієнтація кінематичних пар відбувається з врахуванням способу розташування приводів (на основі або на рухомих ланках), а також обраного способу врівноваження сил ваги ланок.

При застосуванні кінематичних пар з декількома рухомостями для виконання першої умови їх заміняють еквівалентними кінематичними з'єднаннями. Приклад такої заміни у випадку сферичної пари наведено на рис. 1.5.



Сферична кінематична пара

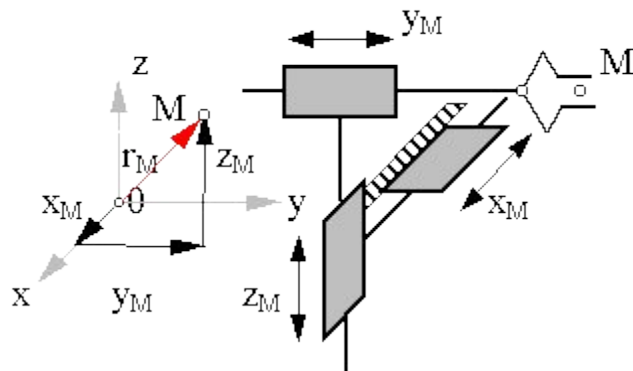


Еквівалентне кінематичне з'єднання

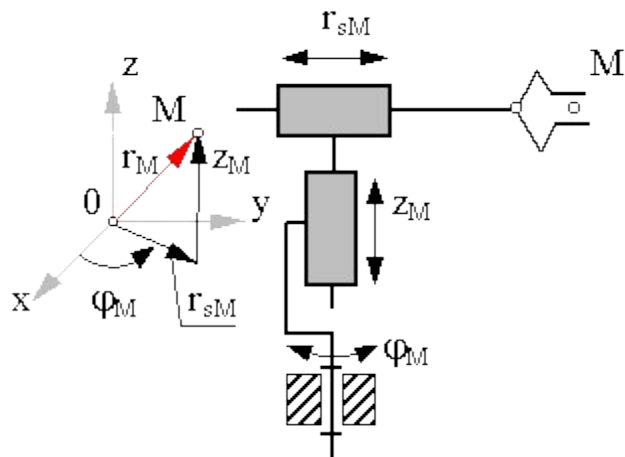
Рис. 1.5 – Заміна сферичної кінематичної пари з трьома рухомостями еквівалентним кінематичним з'єднанням з трьома однорухомими кінематичними парами

Переміщення захвату в просторі буде забезпечено, якщо осі перших трьох кінематичних пар будуть зорієнтовані по осях системи координат. Слід

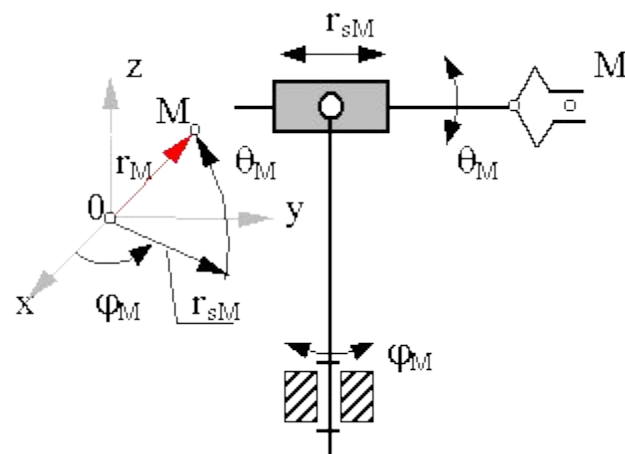
враховувати, що вибір системи координат буде визначати тип руки маніпулятора, а також вид його зони обслуговування. На рис. 1.6 і 1.7 наведені види систем координат з можливою реалізацією руки маніпулятора.



Прямокутна (декартова)



Циліндрична



Сферична

Рис. 1.6 – Системи координат «руки» маніпулятора

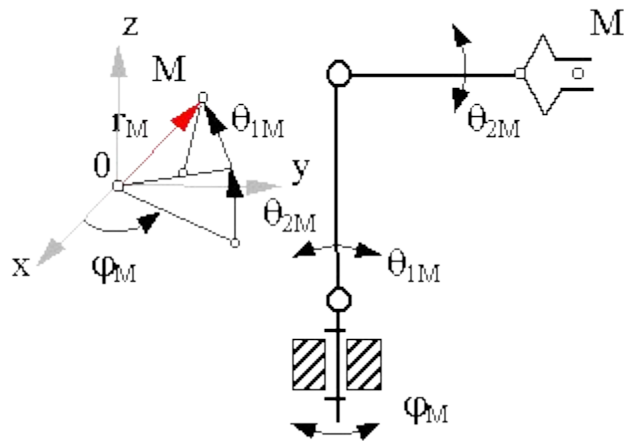


Рис. 1.7 – Кутова (ангулярна) система координат «руки» маніпулятора

Структурні схеми механізмів кисті, які застосовуються в маніпуляторах, наведено на рис. 1.8. Приєднуючи різні варіанти механізмів кисті до вихідної ланки руки, можна отримати більшість відомих структурних схем маніпуляторів, що відповідають реальним промисловим роботам.

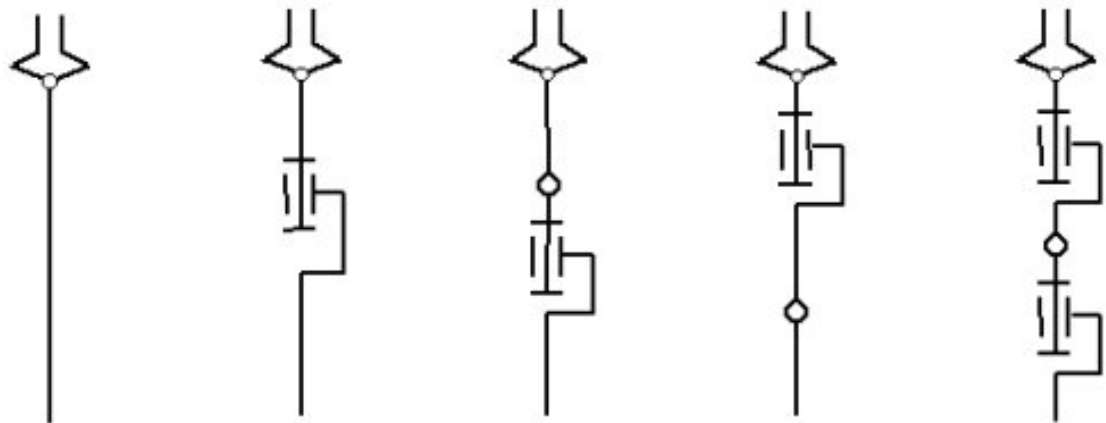


Рис. 1.8 – Структурні схеми кисті маніпулятора

На структуру маніпулятора також впливає і місце розташування приводів. Розташування приводів безпосередньо в кінематичних парах додає до мас рухомих ланок маніпулятора масу приводів. При цьому сумарне навантаження на приводи, а отже і їх необхідна потужність збільшуються, а відношення маси маніпулятора до корисного навантаження, за яку прийнято

вважати максимальну масу об'єкта маніпулювання – зменшується. Як вихід при проектуванні роботів приводи ланок руки, які володіють більшою масою і є найбільш потужні, необхідно розташовувати ближче до основи робота. Для передачі руху від привода до кінематичної ланки можуть використовуватися додаткові кінематичні ланцюги.

Подивимося на схему руки маніпулятора промислового робота фірми ASEA (рис. 1.9). До трьохланкового механізму з використанням ангулярної системи координат додані:

- для привода ланки 2 – найпростіший кулісний механізм, що складається з ланок 4, 5 і 2;
- для привода ланки 3 – кінематичний ланцюг, що включає в себе кулісний механізм (ланки 6, 7 і 8) і шарнірний чотирьохланковий механізм (ланки 8, 9, 2 і 3).

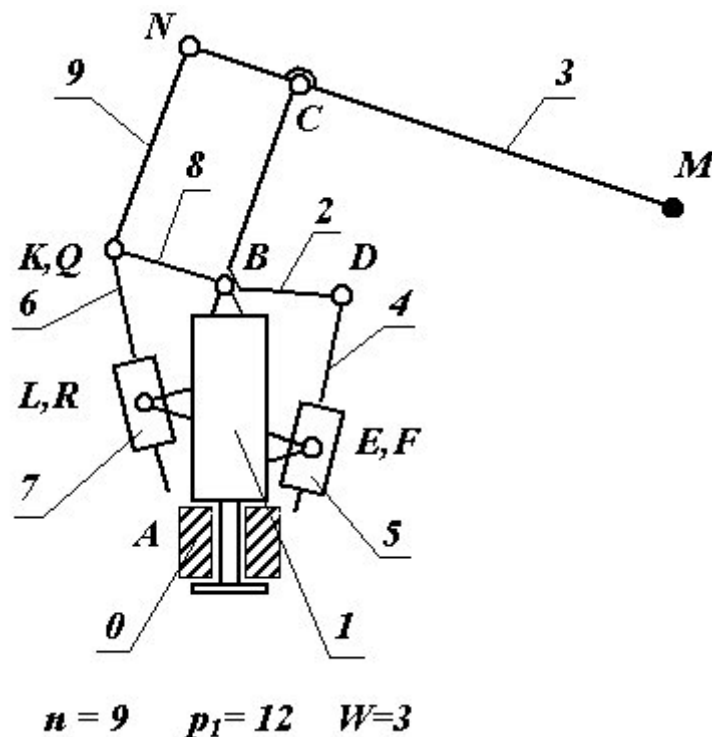


Рис. 1.9 – Схема руки маніпулятора промислового робота фірми ASEA

Відтак у цьому важільному механізмі виділяються кінематичний ланцюг руки (ланки 1, 2 і 3) і кінематичні ланцюги приводів. Маніпулятори, у яких приводи розміщуються на основі, будуть мати більш складні механізми.

Проте таке збільшення числа ланок і кінематичних пар буде компенсуватися корисним зменшенням масо-вагових характеристик рухомих ланок маніпулятора. До того ж застосування таких замкнених кінематичних ланцюгів підвищує жорсткість механізму. Як висновок можна зазначити, що комбіноване розміщення приводів (частина приводів на основі, частина на рухомих ланках) в маніпуляторах забезпечує вищі енергетичні й динамічні характеристики.

В розглянутих схемах маніпуляторів є така негативна особливість, що ваги ланок спричиняють додаткове навантаження на приводи. У роботі SANCIO фірми SKILAM (рис. 1.10) ваги приводів і ланок сприймаються кінематичними парами, а момент двигунів переддається тільки через сили тертя. І хоча така схема реалізації механізму спричинила збільшення розмірів кінематичних пар, проте з погляду на енергетичні і динамічні показники таке рішення виявилось більш виграшним.

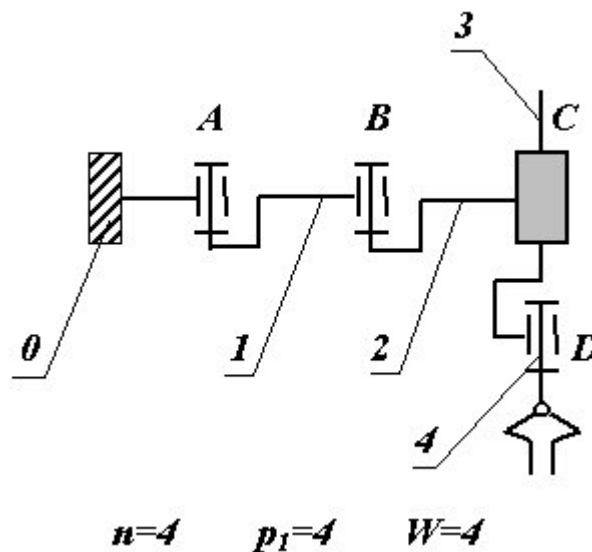


Рис. 1.10 – Схема руки маніпулятора SANCIO

Наведені приклади демонструють найбільш відомі із вдалих структурних схем реальних промислових роботів, проте існують і інші раціональні підходи до вибору структури маніпуляторів.

Однією з важливих особливостей маніпуляторів є можливість зміни структури механізму в процесі роботи. Відповідно до конструкції робота

деякі з кінематичних пар оснащуються пристроями гальмування. Відтак з'являється можливість жорсткого з'єднання двох ланок одна з одною, які будуть функціонувати як одна ланка. В структурній схемі механізму зменшується на одну кількість кінематичних пар і ланок, відтак число рухомостей захвата механізму також зменшується на одиницю. Як зміну структурної схеми механізму можна розглядати випадки, коли в процесі виконання технологічних операцій, наприклад, складання чи зварювання, захват з закріпленим об'єктом маніпулювання стикається з навколишніми предметами, утворюючи таким чином з ними кінематичні пари. Утворюється механізм з замкненим кінематичним ланцюгом, і число рухомостей зменшується. У такому випадку в ланцюзі можуть з'являтися надлишкові зв'язки. Наведені структурні особливості маніпуляторів варто враховувати при складанні програми роботи промислового робота.

Швидкодія промислового робота напряму визначається максимальною швидкістю лінійних переміщень центру захвата маніпулятора. Існує градація промислових роботів за швидкістю: мала швидкодія ($V_M < 0.5$ м/с), середня ($0.5 < V_M < 1.0$ м/с), висока ($V_M > 1.0$ м/с). В основному сучасні промислові роботи відносяться до пристроїв із середньою швидкістю, і тільки близько 20% мають високу швидкість.

Точність маніпулятора промислового робота визначається абсолютною лінійною погрешністю позиціонування центру захвата. Існує наступна градація промислових роботів за точністю позиціонування: мала точність ($\Delta r_m > 1$ мм), середня ($0.1 \text{ мм} < \Delta r_m < 1 \text{ мм}$), висока ($\Delta r_m < 0.1 \text{ мм}$).

1.3 Огляд прототипів на основі механізмів паралельної кінематики

Проведений в попередньому пункті огляд показав, що промислові роботи з розміщенням приводів на основі та із замкненими кінематичними ланцюгами мають більш високі характеристики жорсткості. Побудова

маніпуляторів на основі паралельних кінематичних структур мінімізує нагромадження мас їх рухомих ланок. Розглянемо приклади механізмів зна основі паралельної кінематики, що можуть бути використані як прототип для нової схеми промислового робота.

У роботі [2] показано верстат з комбінованою кінематикою. Метою даного винаходу було підвищення рухомості вихідного органу, що містить шпindel, та оснащений приводом переміщень даного органу на основі паралельних кінематичних структур з чотирма штангами, з розділенням приводів переміщення штанг на функціональні групи та забезпечення довільного розташування шпинделя у робочому просторі відносно заготовки, що крутиться навколо вертикальної осі.

Вказана мета досягається тим, що у пропонованому рішенні вихідний орган складається з двох частин, які з'єднуються між собою шарніром, при цьому три штанги приєднується до однієї з вказаних частин вихідного органу та за своєю конструкцією забезпечує переміщення цієї частини вихідного органу по трьом лінійним координатам з незмінною кутовою орієнтацією відносно станини, а ще одна штанга приєднується до другої частини вихідного органу, і саме ця частина містить шпindel, вісь обертання якого в вертикальному положенні співпадає з віссю обертання заготовки.

Схема верстата з комбінованою кінематикою наведена на рис 1.11.

Станина 1 предсталає собою просторову раму, вертикальні ланки якої представляють собою напрямні трьох приводів подач 2 штанг 3 та одного приводу подачі 4 штанги 5. Вихідний орган верстата складається з двох частин 6 і 7. Складовою частини 7 є шпindel 8. Частини 6 і 7 поєднуються між собою шарніром 9. Штанги 3 шарнірно пов'язані з частиною 6 вихідного органу. Штанга 5 шарнірно пов'язана з частиною 7 вихідного органу. Конструкція штанг 3 та шарнірів, що розміщуються на них, обирається такою, яка забезпечує переміщення частини 6 вихідного органу по трьом лінійним координатам з незмінною кутовою орієнтацією відносно станини. На основі станини встановлюється привід 10 обертання заготовки 11.

функціональні групи: приводи подач 2 штанг 3 визначають положення вихідного органа по лінійним координатам, а привід 4 штанги 5 забезпечує кутову його орієнтацію.

Можливість повороту шпинделя 8 і його лінійних переміщень у просторі в поєднанні з поворотним рухом заготовки 11 у пропонованому рішенні забезпечує довільне взаємне розташування шпинделя відносно заготовки у робочому просторі.

У роботі [3] показано п'ятикоординатний механізм паралельної структури, в якому використано лише три напрямні. Метою даного виходу було забезпечення рівномірного розташування напрямних навколо зони обробки для уникнення перетину штанг приводів лінійного і кутового переміщення вихідного органа при збереженні необхідної його рухомості шляхом скорочення кількості напрямних.

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

Схема п'ятикоординатного механізму паралельної структури з трьома напрямними наведена на рис. 1.12.

До станини 1 кріпляться три напрямні 2 рівномірно навколо робочого простору 3. На даних трьох напрямних 2 рухаються три повзуни 4, до яких шарнірно кріпляться пари штанг 5. Іншим своїм кінцем кожна з пар штанг 5 шарнірно кріпиться до частини 6 вихідного органа. Довжина кожної зі штанг 5, які складають пару, однакова. Також однакова відстань між центрами шарнірів даних штанг на повзунах 4 і частині вихідного органа 6. Таким чином маємо шарнірний паралелограм, як у роботі Клавела [4]. Шарнір 7 з двома степенями з'єднує іншу частину 8 вихідного органа. Дана частина 8 містить в собі шпиндель 9. На торці частини 8 вихідного органа, яка розташована з іншого боку, ніж шпиндель 9, кріпиться здвоєний шарнір 10,

до якого приєднуються штанги 11 і 12. Кожна з даних штанг шарнірно кріпиться до свого повзуна 13, які розміщуються на напрямних 2.

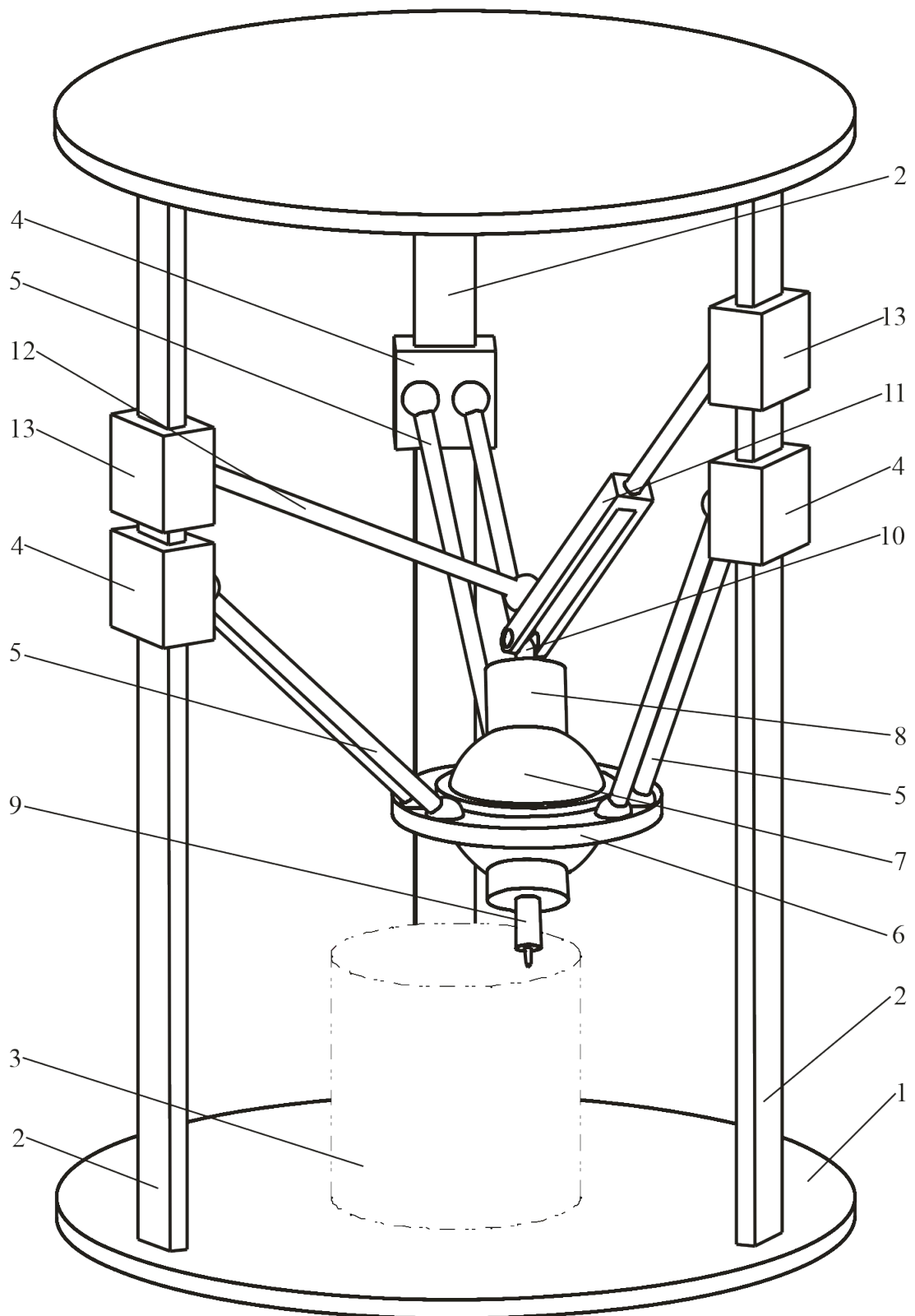


Рис. 1.12 – Схема п'ятикоординатного механізму паралельної структури з трьома напрямними

Переміщення повзунів 4 внаслідок властивостей шарнірного паралелограма забезпечують лінійні переміщення частини 6 вихідного органу. Кутова орієнтація частини 6 залишається незмінною відносно станини 1. Переміщення повзунів 13 забезпечують поворот частини 8 вихідного органу, а отже і шпинделя 9, навколо тих осей, що дозволені шарніром 7. Наявність цього шарніру 7 забезпечує функціональне розділення управління переміщеннями вихідного органу. Система керування повинна унеможливити стикання повзунів 4 і 13, які розміщені на одній напрямній 2. Виконання шарніру 10 забезпечує взаємний поворот штанг 11 і 12 як відносно одна одної, так і відносно осі шпинделя 9 на необхідний кут.

Наведені патенти демонструють можливість синтезу нової схеми маніпулятора, в якому його рука переміщуватиметься по трьом лінійним координатам, матиме поворот в одній площині та навколо своєї повздовжньої осі, що призводитиме до повороту кисті.

1.4 Мета і задачі досліджень

Проведений огляд показує велику різноманітність конструкцій маніпуляторів, яка викликана великим колом питань, що вирішуються з використанням робототехніки. Сучасні тенденції розвитку обладнання для транспортувальних функцій спрямовані на мінімізацію переміщуваних мас, яка максимально забезпечується розташуванням всіх двигунів приводів на основі маніпулятора, та використанні схем із замкненими кінематичними ланцюгами, що дозволяє очікувати ще більшого покращення характеристик жорсткості. За аналогією розвивається і наближена сфера верстатобудування, причому вимоги до жорсткості конструкції обладнання там ще вищі. Такі вимоги призвели до активного впровадження механізмів на основі паралельних кінематичних структур. При цьому варто зазначити одну

перспективу для виробників і експлуатантів обладнання для здійснення технологічних операцій обробки та транспортувальних операцій переміщення об'єктів.

Детальний аналіз кінематики обладнання обох сфер застосування дозволяє зробити висновок, що існує однакове за функціоналом використання всіх координат руху, окрім однієї. Ця окрема координата – обертання навколо осі шпинделя в обладнанні для здійснення технологічних операцій обробки. Даний рух називається головним рухом, і він відбувається у більшості випадків з суттєво вищою швидкістю, ніж інші переміщення. Існує обмежене коло технологічних операцій, де дане переміщення використовується в якості руху подачі для попередньої орієнтації шпинделя. Однак в переважній більшості випадків такий рух подачі не потрібний. Можна назвати аналогом такого руху в обладнанні для здійснення транспортувальних операцій поворот кисті маніпулятора. Для такого типу обладнання зазначений рух є розповсюдженим. Якщо ж поставити завдання швидкого переналагоджування транспортувального обладнання в технологічне і навпаки, дану особливість варто враховувати. На нашу думку, найбільш просто це можна реалізувати в механізмах з паралельною структурою, що робить таку задачу актуальною та надає їй практичної цінності.

Метою даної роботи є визначення силових залежностей п'ятикоординатного робота, побудованого на основі паралельних кінематичних структур, для раціонального підбору двигунів приводів подачі вихідного органу та подальшого розв'язку задач динаміки. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести огляд існуючих типів промислових роботів та виконати підбір прототипів;
- розробити на рівні схеми конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;

- розробити схеми навантаження п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розробити математичну модель силового навантаження п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розрахувати силові залежності в штангах п'ятикоординатного робота для раціонального підбору двигунів приводів подачі вихідного органу та подальшого розв'язку задач динаміки.

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

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА

2.1 Опис пропонованої конструкції робота

В попередньому розділі в якості прототипів було розглянуто дві конструкції роботів на рівні винаходів. Спільним конструктивним рішенням в них є використання рухомої платформи, що переміщується в просторі виключно по лінійним координатам. Такий підхід щодо забезпечення лінійних переміщень окремим елементом (в нашому випадку – рухомою платформою) візьмемо за основу і для нашої конструкції. За інформацією джерела [2], таке рішення дозволяє розділити керування лінійними та кутовими переміщеннями механізмах паралельної структури.

Оберемо необхідні кутові переміщення руки. Обов'язково слід передбачити можливість повороту кисті навколо осі руки на певний кут. З метою розширення функціональних можливостей робота забезпечимо кутове переміщення руки робота у площині, що перепендикулярна до площини рухомої платформи. Для кращого розуміння використаємо той же принцип, що у механізмі з роботи [2] з аналогічними кутовими обмеженнями. Виходить, що нам необхідно передбачити два додаткових приводи подачі для забезпечення описаних кутових переміщень руки робота. При цьому залишаються три приводи, що реалізовуватимуть лінійне переміщення рухомої платформи.

Прийняті кутові переміщення у пропонованій конструкції робота будемо реалізовувати одночасним керуванням двох координат, як у роботі [3]. Однак у нашому випадку не буде суміщення двох повзунів приводів штанг на одній напрямній. Приймаємо, що для забезпечення переміщення кожного з повзунів використовуватиметься окрема штанга. Схема пропонованої конструкції робота показана на рис. 2.1.

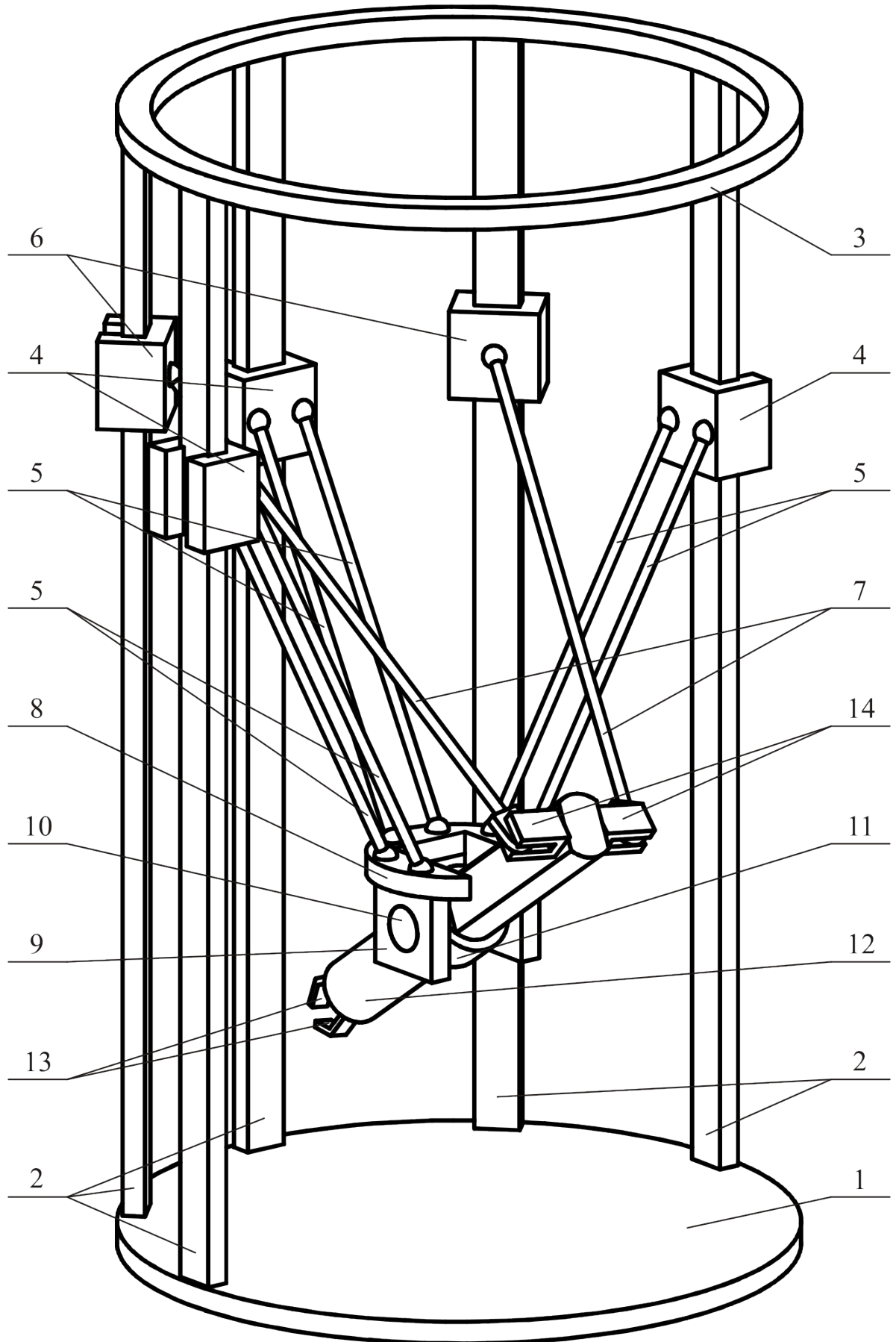


Рис. 2.1 – Схема пропонованої конструкції робота

Базою конструкції робота є основа 1. До даної основи 1 приєднуються п'ять вертикальних напрямних 2 за прийнятою раніше необхідною кількістю приводів. У верхній своїй частині вертикальні напрямні 2 для підвищення жорсткості поєднуються між собою додатковим конструктивний елементом, наприклад, обручем 3. По трьом з п'яти вертикальних напрямних 2 нехай рухаються позуни 4 переміщення пар штанг постійної довжини 5. По двом іншим вертикальним напрямним 2 нехай рухаються повзуни 6 переміщення одиничних штанг постійної довжини 7. Пари штанг постійної довжини 5 протилежними своїми кінцями шарнірно приєднані до рухомої платформи 8. Обов'язковою умовою є рівність відстані між центрами шарнірів кріплення пар штанг постійної довжини 5 на повзунах 4 і на рухомій платформі 8. Оскільки довжини штанг в кожній парі також однакові, то утворюється шарнірний паралелограм. Наявність трьох таких шарнірних паралелограмів унеможливорює зміну кутового положення рухомої платформи 8 по жодній координаті, її переміщення відбуватимуться тільки по лінійним координатам декартової системи координат. Зазначимо, що даний принцип взято з роботи [4]. На двох кронштейнах 9 рухомої платформи 8 розміщуються поворотні шарніри 10. На зазначених шарнірах обертається корпусний підшипник 11. В свою чергу у даному корпусному підшипнику 11 обертається рука 12, на передньому кінці якої кріпиться захватний пристрій 13. Конструкція захватного пристрою у даній роботі не розглядається. Для забезпечення обертання руки 12 у корпусному підшипнику 11 та повороту корпусного підшипника 11 у поворотних шарнірах 10 на іншому кінці руки 12 розташована пара вилок 14. Кожна з цих вилок 14 шарнірно поєднана з одиничною штангою постійною довжини 7, які іншим своїм кінцем шарнірно приєднані до повзунів 6, як описано вище. Узгоджене переміщення цих двох повзунів 6 по напрямним 2 буде забезпечувати необхідний поворот захватного пристрою 13 навколо осі корпусного підшипника 11, а також кутове переміщення руки 12 навколо осі поворотних шарнірів 10.

Використання в даному випадку комплексного шарніру у складі поворотних шарнірів 10 та корпусного підшипника 11 дозволить розмежувати керування приводами лінійних та кутових переміщень виконавчих елементів робота, що значно розширює діапазони їх переміщень в порівнянні з безшарнірним виконанням та спрощує систему керування роботом загалом.

2.2 Розв'язок зворотних кінематичних задач

Задача синтезу подібного п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур була розв'язана в роботі [5]. Результатами такого розв'язку, які необхідно задіяти в нашій роботі, будуть наступні параметри:

- розміри руки та рухомої платформи маніпулятора;
- розташування центрів шарнірів на рухомій платформі;
- розташування сліду траєкторії переміщення центру шарніра штанги на рухомому повзуні на основну площину механізму;
- довжини штанг механізму.

Для приводу лінійних переміщень рухомої платформи важливим аспектом буде заміна пари штанг, що утворюють шарнірний паралелограм, еквівалентною штангою. Якщо прийняти відстань між центрами шарнірів пари штанг на рухомій платформі і на повзуні приводу переміщення штанги за $2m$, то зміщенням даних точок до середини зазначеного відрізка отримуємо заміну пари штанг на одну еквівалентну, як це показано на рисунку 2.2. З точки зору подальших розрахунків така заміна буде припустимою, оскільки кутові переміщення рухомої платформи відсутні, а для забезпечення рівноваги у просторі за відсутності поворотів тіла достатньо трьох реакцій зв'язків, що і забезпечуватиметься наявністю трьох еквівалентних штанг.

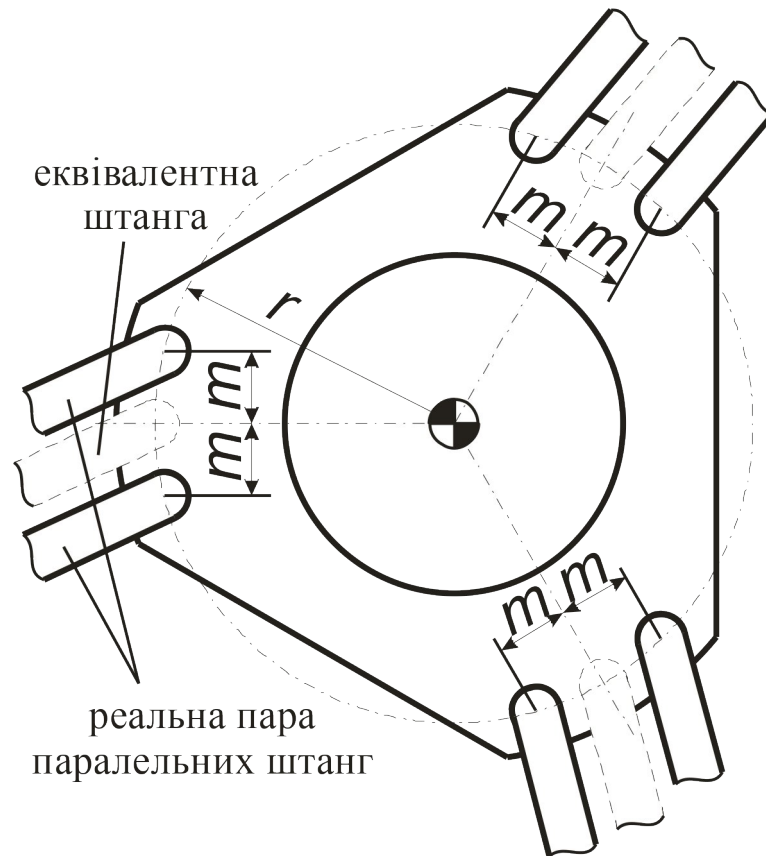


Рис. 2.2 – Схема пропонуваної конструкції робота

Сенс розв'язку зворотної кінематичної задачі полягає у знаходженні координат розташування розрахункових точок приводних механізмів при заданому положенні вихідного органу приводу подачі. Дану задачу будемо представляти в декартовій системі координат, початок якої сумістимо з центром площини основи та направимо осі координат наступним чином:

- вісь Z спрямована вертикально вгору;
- вісь Y направимо від початку системи координат через точку сліду траєкторії переміщення центру шарніра еквівалентної штанги на рухомому повзуні на основну площину механізму таким чином, щоб утворена площина YOZ була паралельною площині коливання осі руки маніпулятора навколо поворотних шарнірів рухомої платформи;
- вісь X направимо перпендикулярно площині YOZ за правилом правої декартової системи координат.

З задачі синтезу механізму візьмемо наступні дані:

- координати розташування сліду траєкторії переміщення центру шарніра штанги на рухомому повзуні на основну площину механізму x_{Ni}, y_{Ni} , де i – індекс штанги;
- довжини штанг L_i ;
- розміри рухомої платформи та координати розташування на ній центрів шарнірів еквівалентних та реальних штанг x_{Pi}, y_{Pi} .

Прийmemo, що штанги приводу лінійного переміщення рухомої платформи матимуть індекс від 1 до 3, причому індекс 1 буде присвоєно штанзі, повзун переміщення якої утворює слід центру даної штанги на площину основи, і через яку проходить вісь Y системи координат. Штанги приводу кутових переміщень руки матимуть індекси 4 і 5.

Розрахунковою точкою вихідного органу у зворотній задачі кінематики будемо вважати центр захвату, який знаходитиметься на перетині осей руки та умовної циліндричної деталі номінального діаметру, затисненої у даному захваті. На схемі, показаній на рисунку 2.3, він зображений у вигляді кола з двома зафарбованими протилежними четвертями. Координати даної точки приймаємо x_0, y_0, z_0 , також задаються кут нахилу осі руки α і кут орієнтації захвату β . Враховуючи особливості механізмів з паралельною кінематикою щодо наявності в них особливих положень, виходить, що при горизонтальному положенні руки робота кут орієнтації захвату β може змінюватися від 0 до 90° тільки за умови здвигу відрізка, що поєднує центри шарнірів штанг 4 і 5 на руці робота на 45° відносно прийнятого нульового положення захвату. Дана величина показана на рисунку 2.3. На відстані V від даної розрахункової точки вздовж осі руки розташований центр поворотних шарнірів Q , а далі вздовж осі руки на відстані S від розрахункової точки знаходяться центри шарнірів штанг механізму повороту руки і орієнтації захвату робота. Відстані від згаданих центрів до осі руки приймаємо однаковими і рівними T .

Площину розташування центрів шарнірів еквівалентних штанг механізму лінійних переміщень рухомої платформи зміщено на величину K вздовж осі Z відносно центру Q поворотних шарнірів, що поєднують руку робота та його рухому платформу. Оскільки таких штанг три, то через центри їх шарнірів на рухомій платформі можна провести коло радіусом C , центр якого зміщено вздовж осі Y на величину E відносно проєкції точки Q на площину зазначеного кола. Відрізки, що поєднують центр кола радіусом C та центри шарнірів еквівалентних штанг на рухомій платформі, утворюють кути γ , якщо за базис відліку взяти зазначений відрізок для штанги 1. Внаслідок симетричності механізму застосовується тільки одна величина кута γ .

Отже, маємо можливість розрахувати величини координат центрів шарнірів штанг на вихідному органі робота. Координати точки Q знаходимо за наступними залежностями:

$$x_Q = x_0; \quad y_Q = y_0 - V \cos(a); \quad z_Q = z_0 + V \sin(a).$$

Координати центру шарніру штанги 4 знаходимо за наступними залежностями:

$$x_{P4} = x_0 + T \cos(b - 45^\circ); \quad y_{P4} = y_0 - S \cos(a) + T \sin(b - 45^\circ) \sin(a);$$

$$z_{P4} = z_0 + S \sin(a) + T \sin(b - 45^\circ) \cos(a).$$

Координати центру шарніру штанги 5 знаходимо за наступними залежностями:

$$x_{P5} = x_0 - T \cos(b - 45^\circ); \quad y_{P5} = y_0 - S \cos(a) - T \sin(b - 45^\circ) \sin(a);$$

$$z_{P5} = z_0 + S \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a).$$

Координати центру шарніру еквівалентної штанги 1 знаходимо за наступними залежностями:

$$x_{P1} = x_Q; y_{P1} = y_Q + E + C; z_{P1} = z_Q + K,$$

або виражаючи через координати розрахункової точки:

$$x_{P1} = x_0; y_{P1} = y_0 - V \cos(a) + E + C; z_{P1} = z_0 + V \sin(a) + K.$$

Координати центру шарніру еквівалентної штанги 2 знаходимо за наступними залежностями:

$$x_{P2} = x_Q + C \cos \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p \ddot{\theta}}{2 \emptyset}; y_{P2} = y_Q + E - C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p \ddot{\theta}}{2 \emptyset}; z_{P2} = z_Q + K,$$

або виражаючи через координати розрахункової точки:

$$x_{P2} = x_0 + C \cos \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p \ddot{\theta}}{2 \emptyset}; y_{P2} = y_0 - V \cos(a) + E - C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p \ddot{\theta}}{2 \emptyset};$$

$$z_{P2} = z_0 + V \sin(a) + K.$$

Координати центру шарніру еквівалентної штанги 3 знаходимо за наступними залежностями:

$$x_{P3} = x_Q - C \cos \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p \ddot{\theta}}{2 \emptyset}; y_{P3} = y_Q + E - C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p \ddot{\theta}}{2 \emptyset}; z_{P3} = z_Q + K,$$

або виражаючи через координати розрахункової точки:

$$x_{P3} = x_0 - C \cos(\alpha) - \frac{p}{2} \ddot{\phi}; \quad y_{P3} = y_0 - V \cos(\alpha) + E - C \sin(\alpha) - \frac{p}{2} \ddot{\phi};$$

$$z_{P3} = z_0 + V \sin(\alpha) + K.$$

Довжини проєкцій відрізків, що поєднують центри шарнірів на штангах, на площину основи XOY , можна знайти за єдиною формулою:

$$d_i = \sqrt{(x_{Ni} - x_{Pi})^2 + (y_{Ni} - y_{Pi})^2},$$

де i – індекс штанги.

Нагадаємо, що координати x_{Ni} , y_{Ni} в даній задачі є заданими.

Величини напрямних косинусів відрізків довжиною d_i до осей X та Y можна розрахувати з виразів:

$$\cos(\alpha_{Xi}) = \frac{x_{Ni} - x_{Pi}}{d_i}, \quad \cos(\alpha_{Yi}) = \frac{y_{Ni} - y_{Pi}}{d_i}.$$

Відрізки d_i є проєкцією штанг L_i на площину основи XOY . Отже, відрізок d_i буде катетом прямокутного трикутника з гіпотенузою L_i . Іншим катетом виступатиме шукана координата z_i переміщення повзуна на напрямній. Оскільки довжини штанг L_i в даній задачі є заданими, то за теоремою Піфагора:

$$z_{Ni} = z_{Pi} + \sqrt{L_i^2 - d_i^2}.$$

Величина напрямного косинуса довжини штанги L_i до осі Z розраховується з виразу:

$$\cos(r_{zi}) = \frac{\sqrt{L_i^2 - d_i^2}}{L_i}.$$

На цьому зворотна кінематична задача і задача знаходження напрямних косинусів штанг до осей координат є вирішеною.

2.3 Математична модель силових залежностей

Наступним пунктом нашої роботи є синтез математичної моделі розрахунку реакцій, що виникають в штангах. Припустимо, що реакції спрямовуються вздовж осей штанг. В нашому механізмі є вісім штанг, а вихідний орган складається з двох частин, які шарнірно поєднані між собою. Для спрощення замінюємо пари штанг приводу переміщення рухомої платформи еквівалентними штангами. Вважаємо, що така заміна буде припустимою, оскільки кутові переміщення рухомої платформи відсутні, а для забезпечення рівноваги у просторі за відсутності поворотів тіла достатньо трьох реакцій зв'язків, що і забезпечуватиметься наявністю трьох еквівалентних штанг.

Запропонований робот є транспортувальною машиною. Отже, його корисним навантаженням буде вага переміщуваної деталі. Позначимо її G_D . Будемо вважати, що центр даної ваги знаходиться на осі умовної циліндричної деталі номінального діаметру, закріпленій у захватному пристрої. Врахуємо, що внаслідок різної будови деталей та поставлених транспортувальних задач центр ваги умовної деталі не співпадатиме з центром захвату, а знаходитиметься з ексцентриситетом U вздовж осі даної деталі.

Оскільки мова йдеться про вагу, то окрім умовної деталі будемо враховувати вагу руки і вагу рухомої платформи. Позначимо їх відповідно G_R і G_P . Приймаємо, що центр ваги руки знаходиться вздовж її осі на відстані W

від центру поворотного шарніру Q , наприклад, ближче до захватного пристрою. Аналогічно центр ваги рухомої платформи розташовуватиметься на проекції відрізка, що поєднує центр поворотного шарніру Q та центр шарніру еквівалентної штанги 1, на площину основи XOY , тобто вздовж осі Y на схемі з рисунку 2.3. Відстань від центру ваги до точки Q на згаданому відрізку позначимо F і нехай він буде орієнтований від точки Q до центру шарніру еквівалентної штанги 1 на рухомій платформі.

Задачу знаходження реакцій в штангах розіб'ємо на дві частини. В першій частині розглянемо незалежно схему навантаження руки робота, що зображена на рисунку 2.4. Будемо розглядати виключно вертикальні складові реакцій, тобто їх проекції на вісь Z . Реакції на схемі позначено R . Індекс біля кожної реакції означає індекс штанги, вздовж осі якої вона діє, а у випадку проекції реакції – відповідну вісь. Оскільки ми розглядаємо на даному етапі руку робота незалежно від рухомої платформи, то припускаємо, що вага платформи не впливає на руку робота. Вплив рухомої платформи на руку робота враховуємо через проекцію реакції R_{ZQ} .

Складаємо рівняння рівноваги.

$$\overset{\circ}{a} X = 0 : - R_4 \cos(r_{x4}) + R_5 \cos(r_{x5}) + R_{xQ} = 0;$$

$$\overset{\circ}{a} Y = 0 : - R_4 \cos(r_{y4}) - R_5 \cos(r_{y5}) + R_{yQ} = 0;$$

$$\overset{\circ}{a} Z = 0 : R_4 \cos(r_{z4}) + R_5 \cos(r_{z5}) + R_{zQ} - G_D - G_R = 0;$$

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{a} M_X = 0 : & - G_D (V \cos(a) - U \sin(b) \sin(a)) - G_R W \cos(a) - \\ & - R_4 \cos(r_{z4}) ((S - V) \cos(a) + T \sin(b - 45^\circ) \sin(a)) - \\ & - R_5 \cos(r_{z5}) ((S - V) \cos(a) - T \sin(b - 45^\circ) \sin(a)) + \end{aligned}$$

$$+ R_4 \cos(r_{Y4})((S - V)\sin(a) - T \sin(b - 45^\circ)\cos(a)) +$$

$$+ R_5 \cos(r_{Y5})((S - V)\sin(a) + T \sin(b - 45^\circ)\cos(a)) = 0;$$

$$\overset{\circ}{a} M_Y = 0: - G_D U \cos(b) - R_4 \cos(r_{Z4})T \cos(b - 45^\circ) + R_5 \cos(r_{Z5})T \cos(b - 45^\circ) -$$

$$- R_4 \cos(r_{X4})((S - V)\sin(a) - T \sin(b - 45^\circ)\cos(a)) +$$

$$+ R_5 \cos(r_{X5})((S - V)\sin(a) + T \sin(b - 45^\circ)\cos(a)) = 0.$$

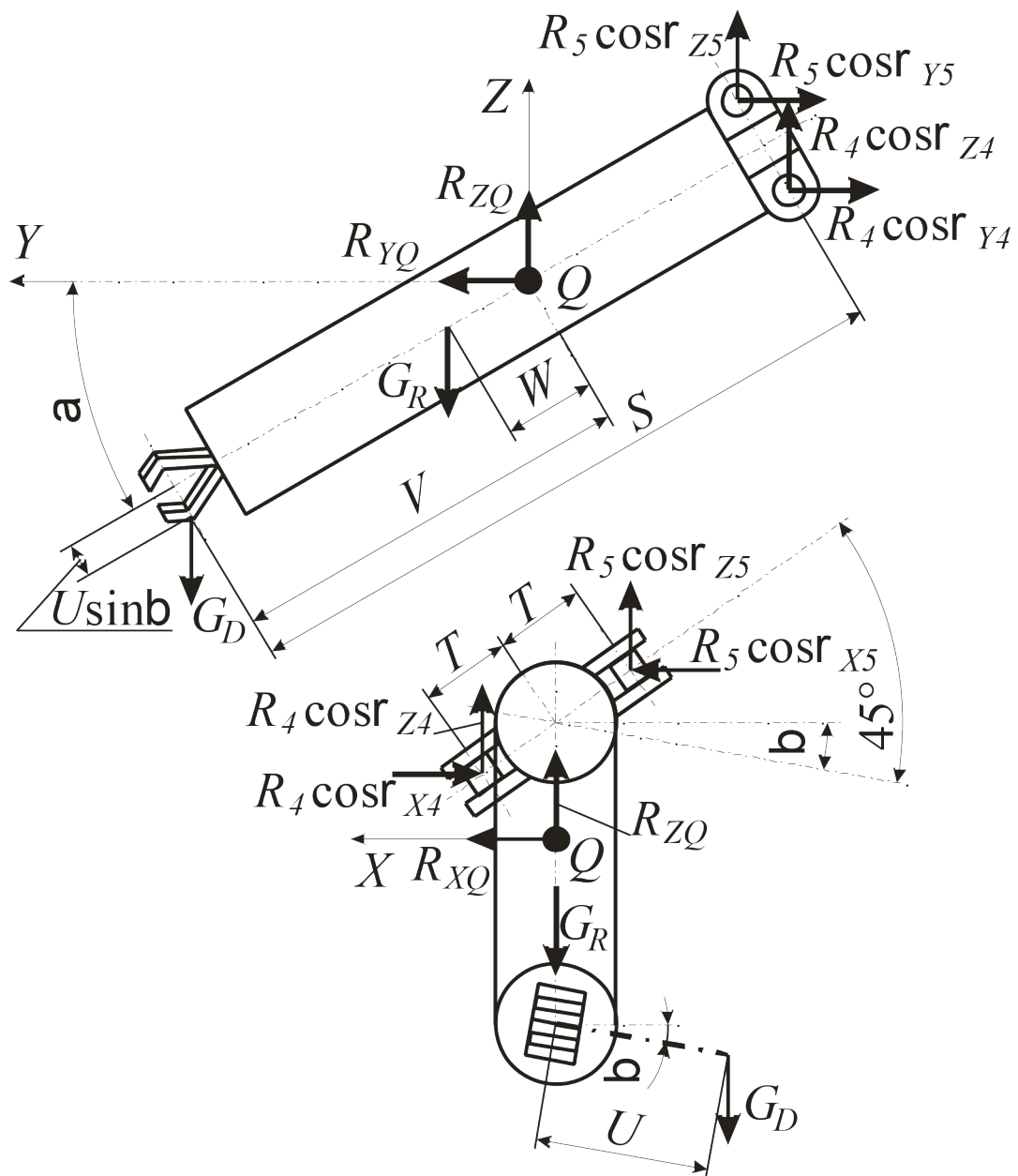


Рис. 2.4 – Схема навантаження руки робота

З рівняння рівноваги моментів навколо осі Y маємо:

$$\begin{aligned} R_4 \cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + R_4 \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a)) = \\ = R_5 \cos(r_{z5}) T \cos(b - 45^\circ) + R_5 \cos(r_{x5}) ((S - V) \sin(a) + T \sin(b - 45^\circ) \cos(a)) - \\ - G_D U \cos(b). \end{aligned}$$

З даного виразу виокремлюємо реакцію R_4 :

$$\begin{aligned} R_4 = R_5 \frac{\cos(r_{z5}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x5}) ((S - V) \sin(a) + T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}{\cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))} - \\ - \frac{G_D U \cos(b)}{\cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}. \end{aligned}$$

Підставляємо вираз для заміщення реакції R_4 у рівняння рівноваги моментів навколо осі X :

$$\begin{aligned} - G_D (V \cos(a) - U \sin(b) \sin(a)) - G_R W \cos(a) - \\ - R_5 \cos(r_{z5}) ((S - V) \cos(a) - T \sin(b - 45^\circ) \sin(a)) + \\ + R_5 \cos(r_{x5}) ((S - V) \sin(a) + T \sin(b - 45^\circ) \cos(a)) - \\ - R_5 \frac{\cos(r_{z5}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x5}) ((S - V) \sin(a) + T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}{\cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cos(r_{z4})((S - V)\cos(a) + T\sin(b - 45^\circ)\sin(a)) + \\
& + \frac{G_D U \cos(b)\cos(r_{z4})((S - V)\cos(a) + T\sin(b - 45^\circ)\sin(a))}{\cos(r_{z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))} + \\
& + R_5 \frac{\cos(r_{z5})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x5})((S - V)\sin(a) + T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}, \\
& \cos(r_{y4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a)) - \\
& - \frac{G_D U \cos(b)\cos(r_{y4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))} = 0.
\end{aligned}$$

Розв'язуємо дане рівняння відносно реакції R_5 :

$$\begin{aligned}
& R_5 \cos(r_{y5})((S - V)\sin(a) + T\sin(b - 45^\circ)\cos(a)) + \\
& + R_5 \frac{\cos(r_{z5})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x5})((S - V)\sin(a) + T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))} \\
& \cos(r_{y4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a)) - \\
& - R_5 \cos(r_{z5})((S - V)\cos(a) - T\sin(b - 45^\circ)\sin(a)) - \\
& - R_5 \frac{\cos(r_{z5})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x5})((S - V)\sin(a) + T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))} \\
& \cos(r_{z4})((S - V)\cos(a) + T\sin(b - 45^\circ)\sin(a)) =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= G_D (V \cos(a) - U \sin(b) \sin(a)) + G_R W \cos(a) - \\
&- \frac{G_D U \cos(b) \cos(r_{z4}) ((S - V) \cos(a) + T \sin(b - 45^\circ) \sin(a))}{\cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))} + \\
&+ \frac{G_D U \cos(b) \cos(r_{y4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}{\cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}; \\
&R_5 \cos(r_{y5}) ((S - V) \sin(a) + T \sin(b - 45^\circ) \cos(a)) + \\
&+ R_5 \frac{\cos(r_{z5}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x5}) ((S - V) \sin(a) + T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}{\cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}, \\
&\cos(r_{y4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a)) - \\
&- R_5 \cos(r_{z5}) ((S - V) \cos(a) - T \sin(b - 45^\circ) \sin(a)) - \\
&- R_5 \frac{\cos(r_{z5}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x5}) ((S - V) \sin(a) + T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}{\cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}, \\
&\cos(r_{z4}) ((S - V) \cos(a) + T \sin(b - 45^\circ) \sin(a)) = \\
&R_5 = [G_D (V \cos(a) - U \sin(b) \sin(a)) + G_R W \cos(a) - \\
&- \frac{G_D U \cos(b) \cos(r_{z4}) ((S - V) \cos(a) + T \sin(b - 45^\circ) \sin(a))}{\cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))} + \\
&+ \frac{G_D U \cos(b) \cos(r_{y4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}{\cos(r_{z4}) T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4}) ((S - V) \sin(a) - T \sin(b - 45^\circ) \cos(a))}] \frac{\dot{u}}{u}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& /[\cos(r_{Y5})((S - V)\sin(a) + T\sin(b - 45^\circ)\cos(a)) + \\
& + \frac{\cos(r_{Z5})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{X5})((S - V)\sin(a) + T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{Z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{X4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}, \\
& \cdot \cos(r_{Y4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a)) - \\
& - \cos(r_{Z5})((S - V)\cos(a) - T\sin(b - 45^\circ)\sin(a)) - \\
& - \frac{\cos(r_{Z5})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{X5})((S - V)\sin(a) + T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{Z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{X4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}, \\
& \cdot \cos(r_{Z4})((S - V)\cos(a) + T\sin(b - 45^\circ)\sin(a))].
\end{aligned}$$

Підставляємо даний вираз в рівняння виокремлення реакції R_4 :

$$\begin{aligned}
R_4 = & [G_D(V\cos(a) - U\sin(b)\sin(a)) + G_R W\cos(a) - \\
& - \frac{G_D U\cos(b)\cos(r_{Z4})((S - V)\cos(a) + T\sin(b - 45^\circ)\sin(a))}{\cos(r_{Z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{X4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))} + \\
& + \frac{G_D U\cos(b)\cos(r_{Y4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{Z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{X4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}] \dot{u}, \\
& , \frac{\cos(r_{Z5})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{X5})((S - V)\sin(a) + T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{Z4})T\cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{X4})((S - V)\sin(a) - T\sin(b - 45^\circ)\cos(a))} // \\
& /[\cos(r_{Y5})((S - V)\sin(a) + T\sin(b - 45^\circ)\cos(a)) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\cos(r_{z5})T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x5})((S - V)\sin(a) + T \sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{z4})T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4})((S - V)\sin(a) - T \sin(b - 45^\circ)\cos(a))}, \\
& \quad \cdot \cos(r_{y4})((S - V)\sin(a) - T \sin(b - 45^\circ)\cos(a)) - \\
& \quad - \cos(r_{z5})((S - V)\cos(a) - T \sin(b - 45^\circ)\sin(a)) - \\
& \quad - \frac{\cos(r_{z5})T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x5})((S - V)\sin(a) + T \sin(b - 45^\circ)\cos(a))}{\cos(r_{z4})T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4})((S - V)\sin(a) - T \sin(b - 45^\circ)\cos(a))}, \\
& \quad \cdot \cos(r_{z4})((S - V)\cos(a) + T \sin(b - 45^\circ)\sin(a)) - \\
& \quad - \frac{G_D U \cos(b)}{\cos(r_{z4})T \cos(b - 45^\circ) + \cos(r_{x4})((S - V)\sin(a) - T \sin(b - 45^\circ)\cos(a))}.
\end{aligned}$$

З рівняння проєкцій сил на вісь X знаходимо реакцію R_{XQ} :

$$R_{XQ} = R_4 \cos(r_{x4}) - R_5 \cos(r_{x5}).$$

В силу громіздкості викладок остаточний вигляд виразу для знаходження реакції R_{XQ} не наводимо.

З рівняння проєкцій сил на вісь Y знаходимо реакцію R_{YQ} :

$$R_{YQ} = R_4 \cos(r_{y4}) + R_5 \cos(r_{y5}).$$

В силу громіздкості викладок остаточний вигляд виразу для знаходження реакції R_{YQ} не наводимо.

З рівняння проєкцій сил на вісь Z знаходимо реакцію R_{ZQ} :

$$R_{ZQ} = G_D + G_R - R_4 \cos(r_{Z4}) - R_5 \cos(r_{Z5}).$$

В силу громіздкості викладок остаточний вигляд виразу для знаходження реакції R_{ZQ} не наводимо.

Приступаємо до другої частини побудови математичної моделі для знаходження реакцій в еквівалентних штангах приводу переміщення рухомої платформи. Вплив руки на рухому платформу, а також штанг 4 і 5 буде враховано через прикладення знайдених реакцій R_{XQ} , R_{YQ} і R_{ZQ} . Їх напрямок повинен бути протилежним показаному на схемі з рисунку 2.4. Також в схемі навантаження рухомої платформи, яка зображена на рисунку 2.5, необхідно врахувати прикладення ваги самої рухомої платформи G_P .

Складаємо рівняння рівноваги:

$$\sum Z = 0: R_1 \cos(r_{Z1}) + R_2 \cos(r_{Z2}) + R_3 \cos(r_{Z3}) - R_{ZQ} - G_P = 0;$$

$$\sum M_X = 0: - G_P \frac{C}{e} \sin \alpha - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} E + F \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} R_{ZQ} \frac{C}{e} \sin \alpha - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} E \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi}$$

$$- R_{YQ} K + R_1 \cos(r_{Z1}) \frac{C}{e} \sin \alpha - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} + C \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} = 0;$$

$$\sum M_Y = 0: - R_2 \cos(r_{Z2}) C \cos \alpha - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} + R_3 \cos(r_{Z3}) C \cos \alpha - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} + R_{XQ} K = 0.$$

З рівняння рівноваги моментів навколо осі X знаходимо реакцію R_I :

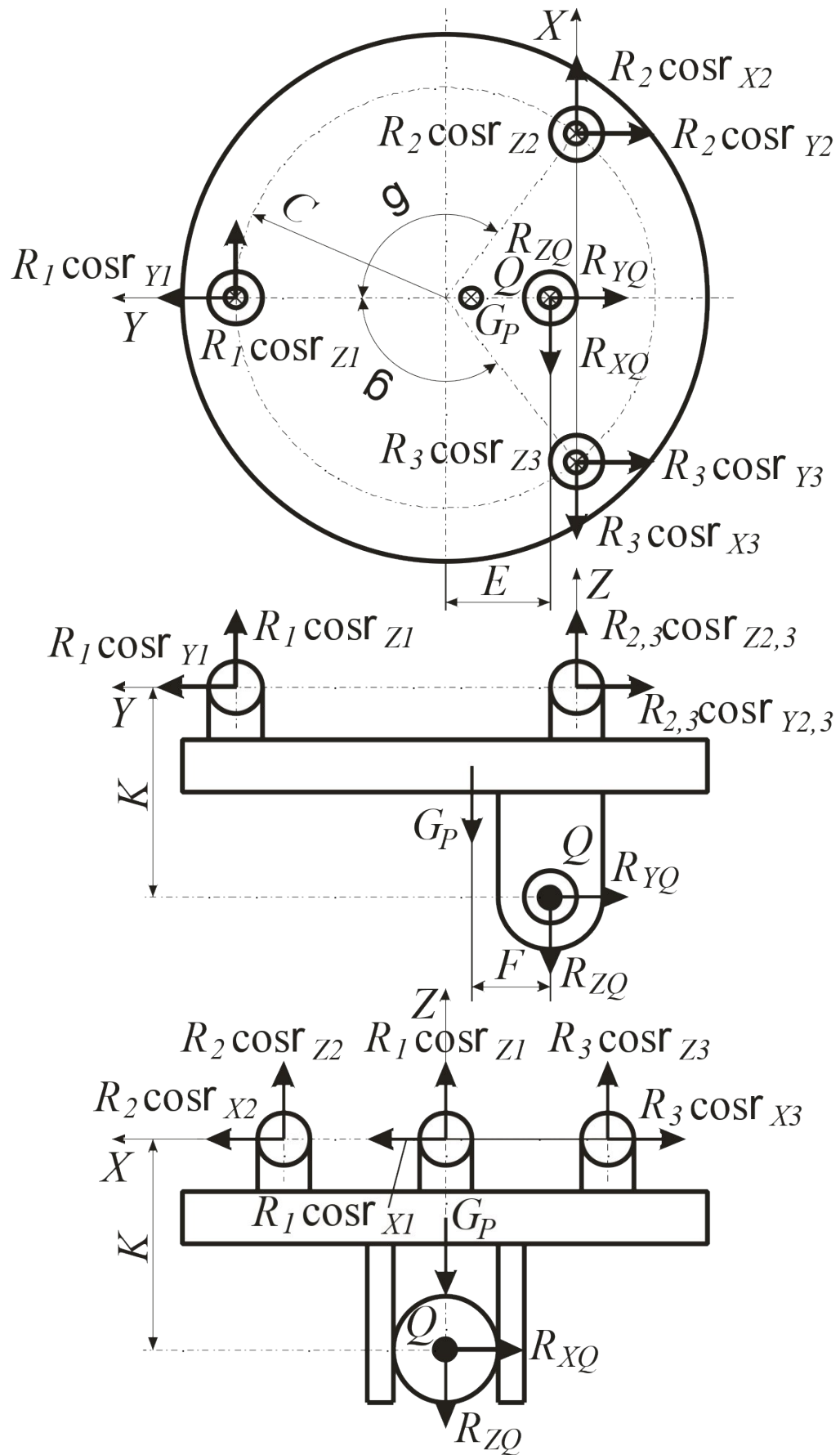


Рис. 2.5 – Схема навантаження рухомої платформи робота

$$\begin{aligned}
R_1 \cos(r_{z1}) C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} + C \ddot{\varphi} &= R_{yQ} K + G_P C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} E + F \ddot{\varphi} + \\
&+ R_{zQ} C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} E \ddot{\varphi}; \\
R_1 \cos(r_{z1}) &= \frac{R_{yQ} K + G_P C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} E + F \ddot{\varphi} + R_{zQ} C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} E \ddot{\varphi}}{C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} + C \ddot{\varphi}}; \\
R_1 &= \frac{R_{yQ} K + G_P C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} E + F \ddot{\varphi} + R_{zQ} C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} E \ddot{\varphi}}{\cos(r_{z1}) C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} + C \ddot{\varphi}}.
\end{aligned}$$

З рівняння рівноваги моментів навколо осі Y виокремлюємо реакцію R_2 :

$$\begin{aligned}
R_2 \cos(r_{z2}) C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} &= R_3 \cos(r_{z3}) C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} + R_{xQ} K; \\
R_2 \cos(r_{z2}) &= \frac{R_3 \cos(r_{z3}) C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi} + R_{xQ} K}{C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi}}; \\
R_2 \cos(r_{z2}) &= R_3 \cos(r_{z3}) + R_{xQ} \frac{K}{C \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{p}{2} \ddot{\varphi}};
\end{aligned}$$

$$R_2 = R_3 \frac{\cos(r_{z3})}{\cos(r_{z2})} + R_{xQ} \frac{K}{C \cos(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} \cos(r_{z2})}.$$

Підставляємо знайдені залежності для $R_1 \cos(r_{z1})$ і $R_2 \cos(r_{z2})$ в рівняння рівноваги проєкцій сил на вісь Z:

$$\frac{R_{yQ} K + G_P \frac{\alpha}{2} C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} E + F \frac{\ddot{\phi}}{2} + R_{zQ} \frac{\alpha}{2} C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} E \frac{\ddot{\phi}}{2} +}{\frac{\alpha}{2} C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} + C \frac{\ddot{\phi}}{2}} +$$

$$+ R_3 \cos(r_{z3}) + R_{xQ} \frac{K}{C \cos(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2}} + R_3 \cos(r_{z3}) - R_{zQ} - G_P = 0.$$

З даного виразу знаходимо реакцію R_3 :

$$\frac{+ G_P \frac{\alpha}{2} C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} E + F \frac{\ddot{\phi}}{2} +}{\frac{\alpha}{2} C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} + C \frac{\ddot{\phi}}{2}} +$$

$$2R_3 \cos(r_{z3}) = R_{zQ} + G_P - \frac{R_{xQ} K}{C \cos(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2}} - \frac{R_{yQ} K}{C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} + C} -$$

$$- \frac{R_{zQ} \frac{\alpha}{2} C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} E \frac{\ddot{\phi}}{2} - G_P \frac{\alpha}{2} C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} E + F \frac{\ddot{\phi}}{2}}{C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} + C} - \frac{C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} + C}{C \sin(\frac{\alpha}{2}) - \frac{p \ddot{\phi}}{2} + C},$$

$$\begin{aligned}
R_3 \cos(r_{z3}) = & \frac{R_{zQ}}{2} + \frac{G_P}{2} - \frac{R_{xQ}K}{2C \cos \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta}} - \frac{R_{yQ}K}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} + 1\frac{\ddot{\theta}}{\theta}} - \\
& - \frac{R_{zQ} \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} - \frac{E\ddot{\theta}}{\theta}}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} + 1\frac{\ddot{\theta}}{\theta}} - \frac{G_P \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} - \frac{E+F\ddot{\theta}}{\theta}}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} + 1\frac{\ddot{\theta}}{\theta}}, \\
R_3 = & \frac{R_{zQ}}{2 \cos(r_{z3})} + \frac{G_P}{2 \cos(r_{z3})} - \frac{R_{xQ}K}{2C \cos \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} \cos(r_{z3})} - \\
& - \frac{R_{yQ}K + R_{zQ} \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} - \frac{E\ddot{\theta}}{\theta} + G_P \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} - \frac{E+F\ddot{\theta}}{\theta}}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} + 1\frac{\ddot{\theta}}{\theta} \cos(r_{z3})}.
\end{aligned}$$

Підставляємо залежність для $R_3 \cos(r_{z3})$ в залежність для $R_2 \cos(r_{z2})$, знаходимо реакцію R_2 :

$$\begin{aligned}
R_2 \cos(r_{z2}) = & \frac{R_{xQ}K}{C \cos \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta}} + \frac{R_{zQ}}{2} + \frac{G_P}{2} - \frac{R_{xQ}K}{2C \cos \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta}} - \frac{R_{yQ}K}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} + 1\frac{\ddot{\theta}}{\theta}} - \\
& - \frac{R_{zQ} \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} - \frac{E\ddot{\theta}}{\theta}}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} + 1\frac{\ddot{\theta}}{\theta}} - \frac{G_P \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} - \frac{E+F\ddot{\theta}}{\theta}}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p\ddot{\theta}}{2\theta} + 1\frac{\ddot{\theta}}{\theta}},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_2 \cos(r_{z2}) = & \frac{R_{zQ}}{2} + \frac{G_P}{2} + \frac{R_{xQ} K}{2C \cos \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta}} - \frac{R_{yQ} K}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta} + 1 \ddot{\theta}} - \\
& - \frac{R_{zQ} \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta} - E \ddot{\theta}}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta} + 1 \ddot{\theta}} - \frac{G_P \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta} - E + F \ddot{\theta}}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta} + 1 \ddot{\theta}}, \\
R_2 = & \frac{R_{zQ}}{2 \cos(r_{z2})} + \frac{G_P}{2 \cos(r_{z2})} + \frac{R_{xQ} K}{2C \cos \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta} \cos(r_{z2})} - \\
& - \frac{R_{yQ} K + R_{zQ} \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta} - E \ddot{\theta} + G_P \frac{\alpha}{\epsilon} C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta} - E + F \ddot{\theta}}{2C \sin \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{p}{2} \ddot{\theta} + 1 \ddot{\theta} \cos(r_{z2})}.
\end{aligned}$$

На цьому розробку математичної моделі розрахунку реакцій в штангах п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур можна вважати завершеною.

2.4 Розрахунок реакцій в штангах п'ятикоординатного робота

Розрахунок конструкційних елементів робота проводимо згідно рекомендацій, наданих в задачі синтезу в раніше опублікованих працях [5]. В результаті отримуємо наступні вихідні дані, які потребуються в розробленій математичній моделі:

- вага деталі $G_D = 100$ Н;
- ексцентриситет прикладення ваги деталі $U = 100$ мм;

- вага руки $G_R = 30$ Н;
- ексцентриситет прикладення ваги руки $W = 50$ мм;
- вага платформи $G_P = 40$ Н;
- ексцентриситет прикладення ваги платформи $F = 40$ мм;
- виліт розрахункової точки захвату відносно центру поворотного шарніру $V = 250$ мм;
- відстань вздовж осі руки між центрами шарнірів штанг та розрахунковою точкою захвату $S = 350$ мм;
- плече центру шарніру штанги приводу орієнтації руки відносно осі останньої $T = 50$ мм;
- відстань від центру поворотного шарніру до площини розміщення центрів штанг приводу переміщення рухомої платформи $K = 80$ мм;
- радіус кола розміщення центрів еквівалентних штанг приводу переміщення рухомої платформи $C = 80$ мм;
- відстань між центром кола радіусом C та проекцією центру поворотного шарніру на площину даного кола $E = 50$ мм;
- кут між радіусами, проведеними до центрів шарнірів еквівалентних штанг 2 і 3 приводу переміщення рухомої платформи, та аналогічним радіусом, проведеним до центру шарніру еквівалентної штанги 1 $\gamma = 120^\circ$.

Приймаємо, що напрямні повзунів переміщення еквівалентних штанг приводу подачі рухомої платформи будуть орієнтованими відносно робочого простору робота із застосуванням аналогічного значення кута γ . Відтак маємо наступні координати розташування слідів траєкторій руху центрів шарнірів повзунів переміщення еквівалентних штанг на площину основи:

- для еквівалентної штанги 1 $x_{N1} = 0$, $y_{N1} = 400$ мм;
- для еквівалентної штанги 2 $x_{N2} = 346$ мм, $y_{N2} = -200$ мм;
- для еквівалентної штанги 3 $x_{N3} = -346$ мм, $y_{N3} = -200$ мм.

Напрямні повзунів приводу повороту і орієнтації руки робота розміщуємо посередині між напрямними повзунів приводу переміщення еквівалентних штанг 1 і 2 для повзуна штанги 4 і між напрямними повзунів

приводу переміщення еквівалентних штанг 1 і 3 для повзуна штанги 5. Відтак маємо наступні координати розташування слідів траєкторій руху центрів шарнірів повзунів переміщення штанг приводу повороту і орієнтації руки робота на площину основи:

- для штанги 4 $x_{N4} = 346$ мм, $y_{N4} = 200$ мм;
- для штанги 5 $x_{N5} = -346$ мм, $y_{N5} = 200$ мм.

Довжини всіх п'ятьох штанг приймаємо рівними $L_i = 800$ мм.

Приймаємо, що розрахункова точка захвату буде переміщуватися в межах кола радіусом 100 мм, проведеному в площині XOY . Кут нахилу руки α буде змінюватися від 0 до 90°. Діапазон зміни величини кута орієнтації захвату на руці робота β приймаємо в межах від 0 до 90°. Початкові значення обох кутів приймаємо рівними нуль градусів.

Проведемо ряд досліджень залежностей реакцій, що виникають в штангах, від зміни параметрів схем навантаження. На рисунках 2.6 – 2.13 показані результати у вигляді графіків залежності зміни реакцій в штангах.

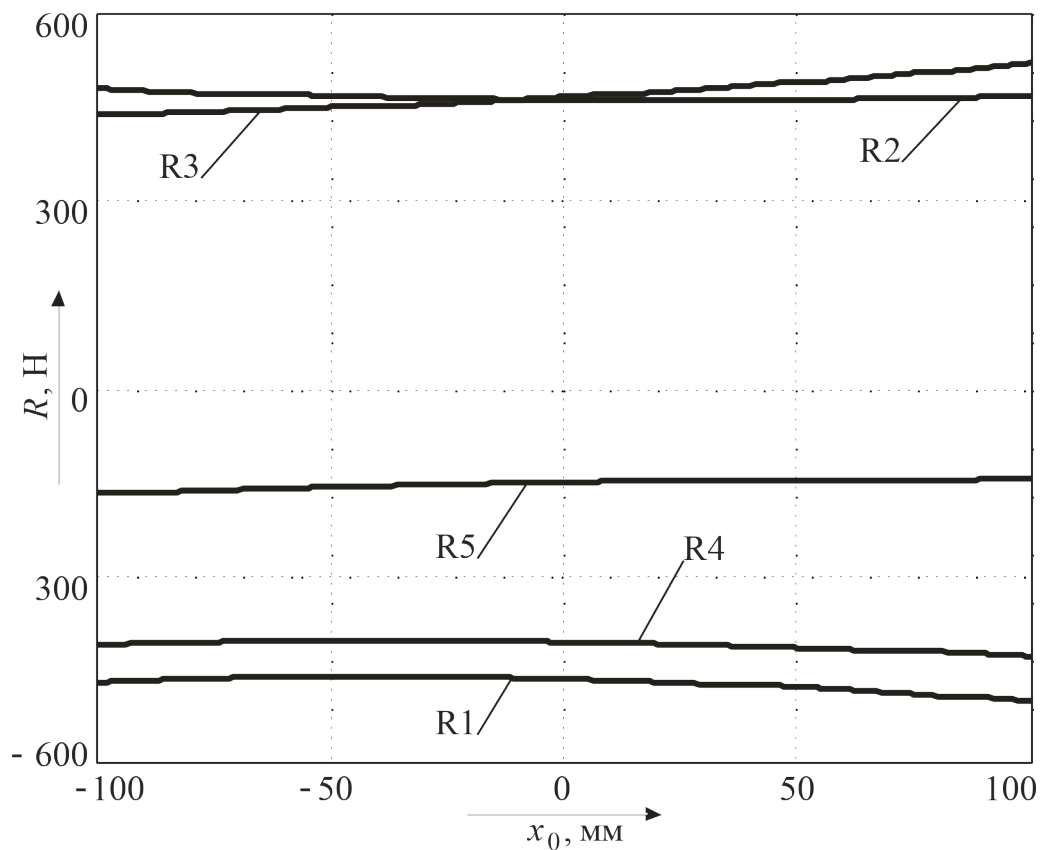


Рис. 2.6 – Залежність зміни реакцій при русі руки робота вздовж осі X

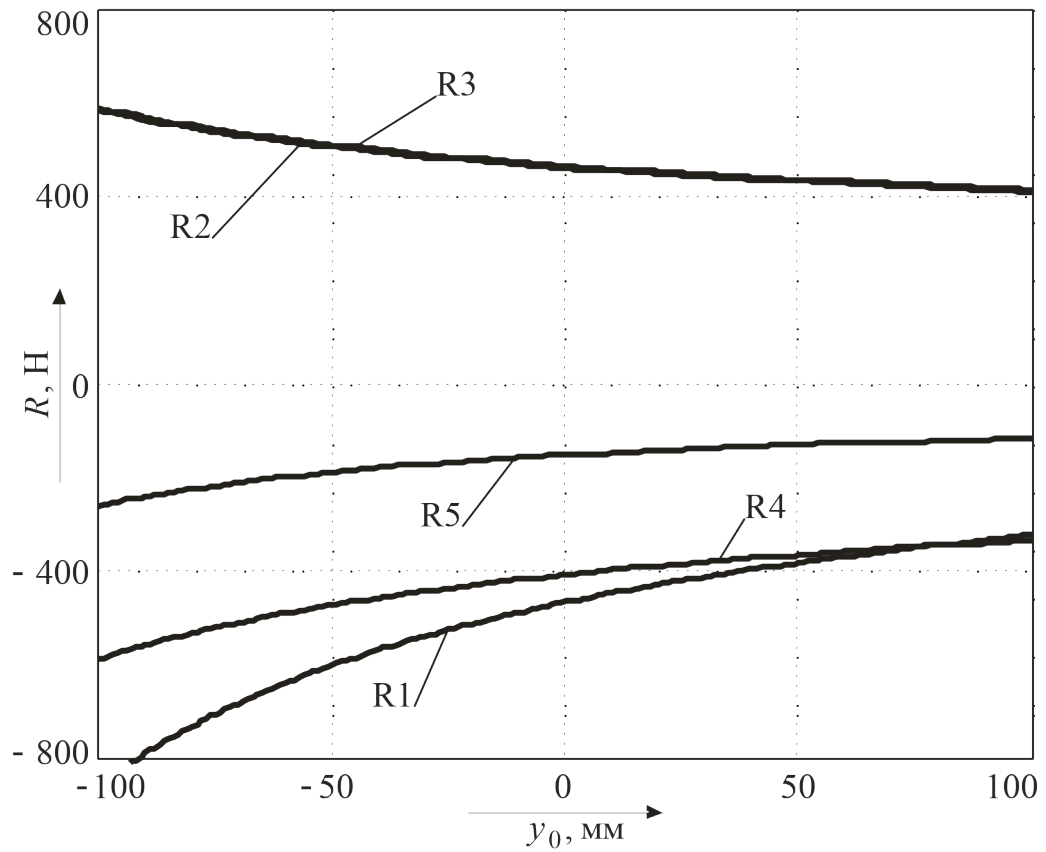


Рис. 2.7 – Залежність зміни реакцій при русі руки робота вздовж осі Y

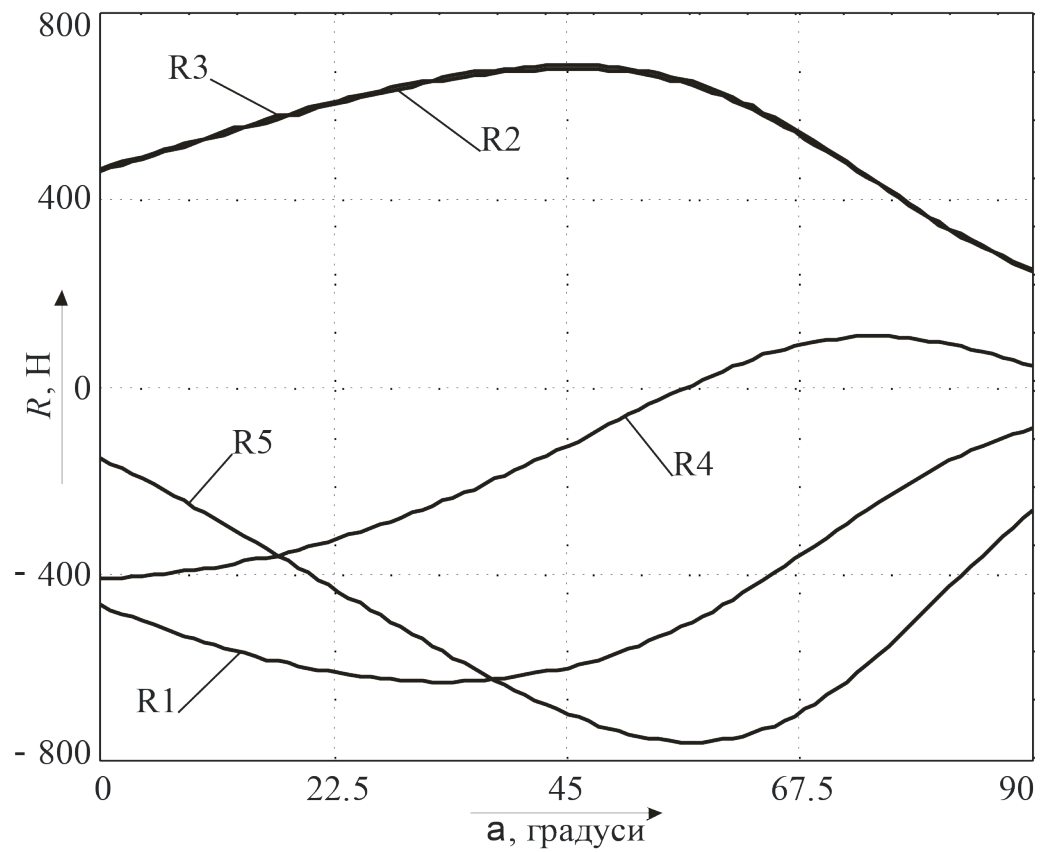


Рис. 2.8 – Залежність зміни реакцій при зміні кута нахилу руки робота

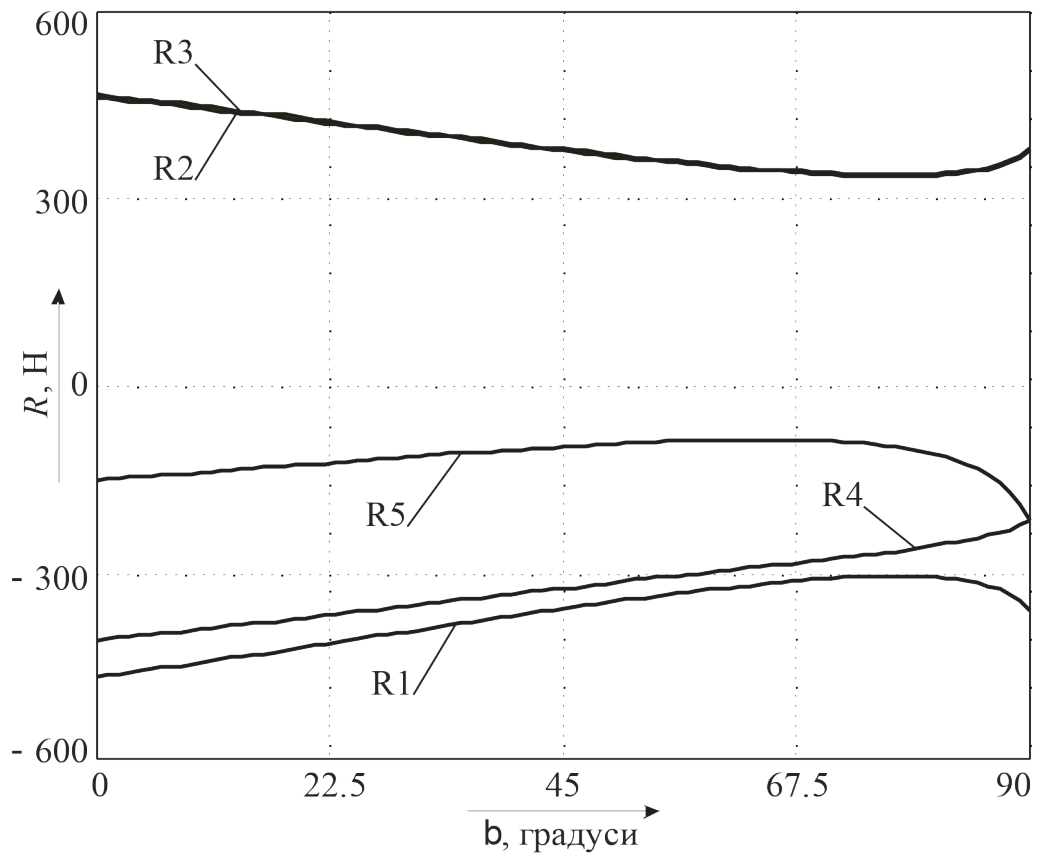


Рис. 2.9 – Залежність зміни реакцій при зміні кута орієнтації захвату

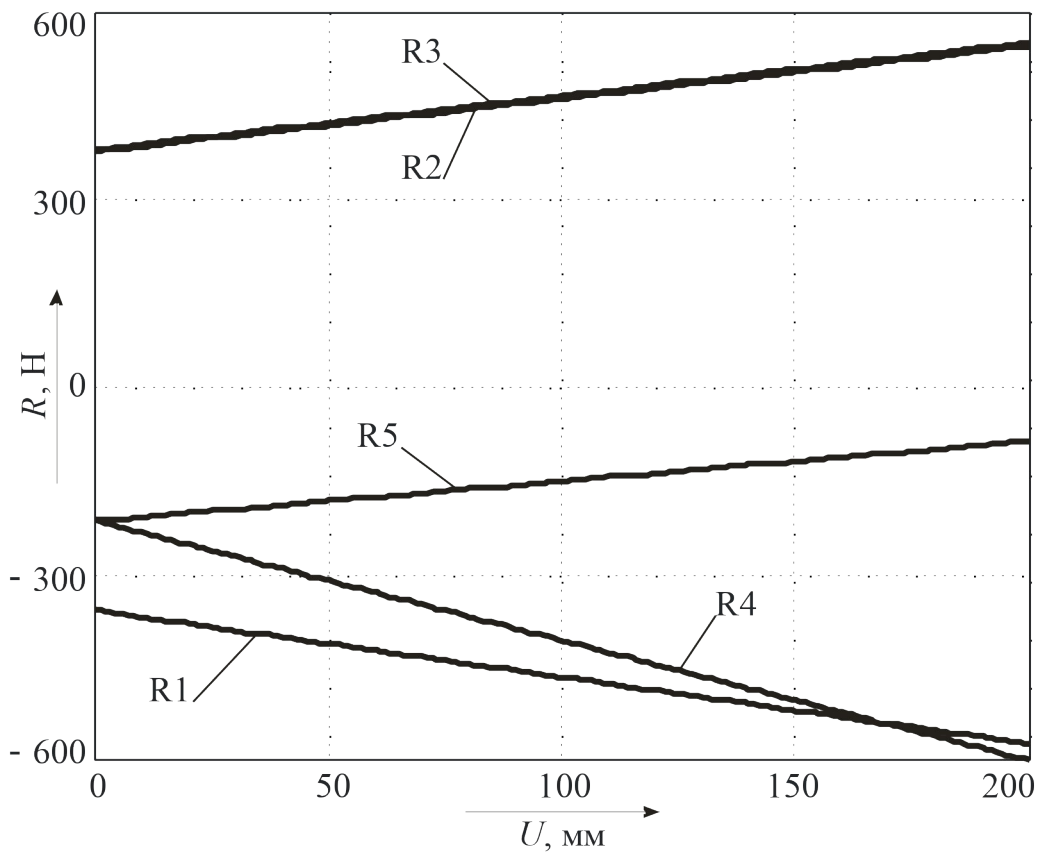


Рис. 2.10 – Залежність зміни реакцій при зміні плеча прикладення ваги деталі

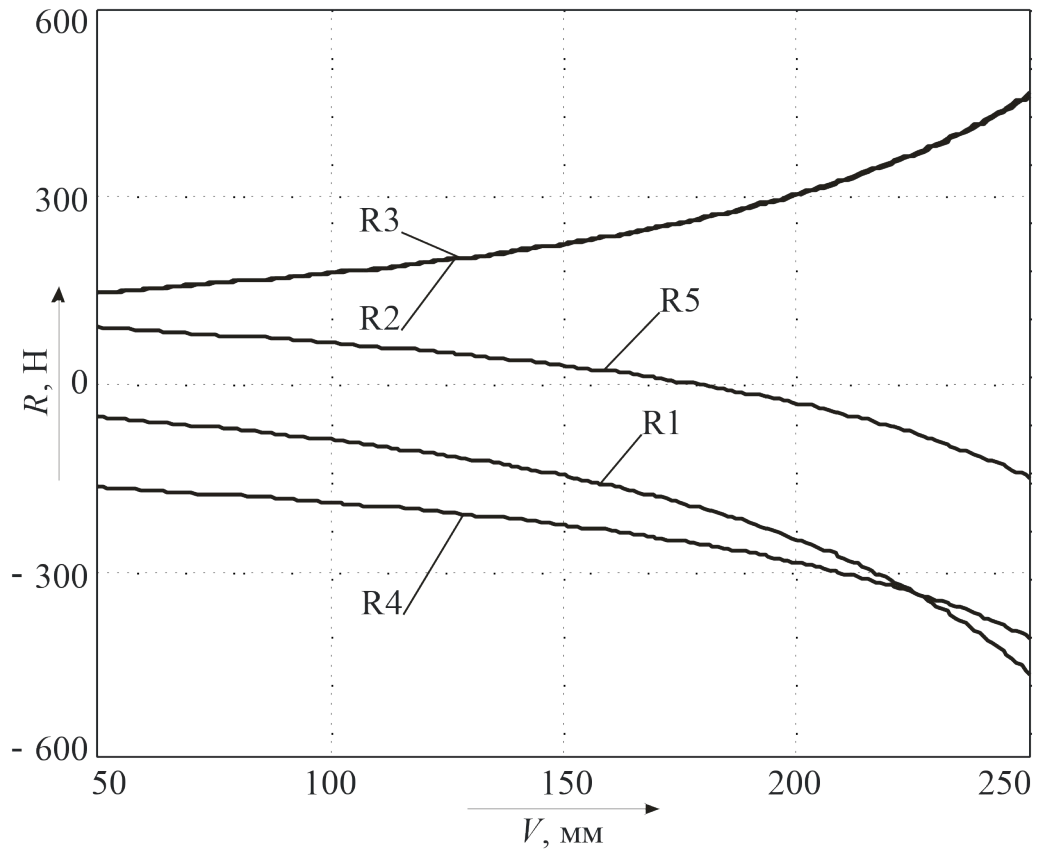


Рис. 2.11 – Залежність зміни реакцій при зміні положення руки робота відносно центру поворотного шарніру

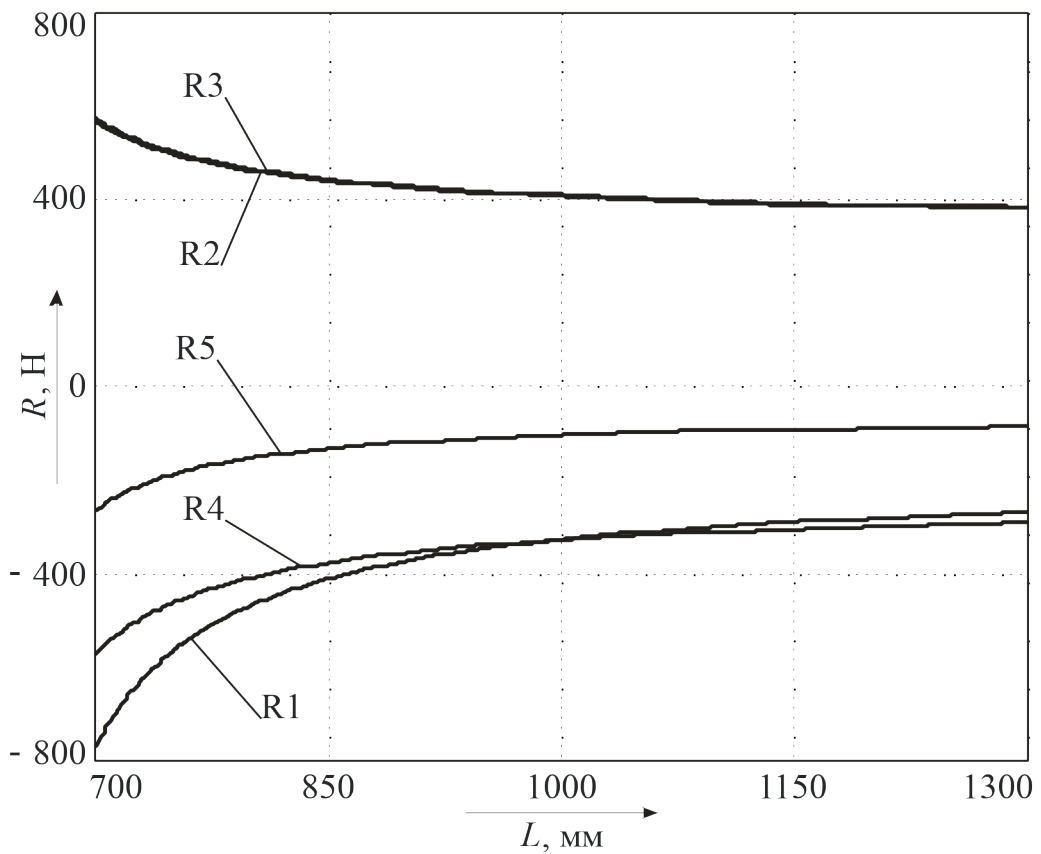


Рис. 2.12 – Залежність зміни реакцій при зміні довжини всіх штанг

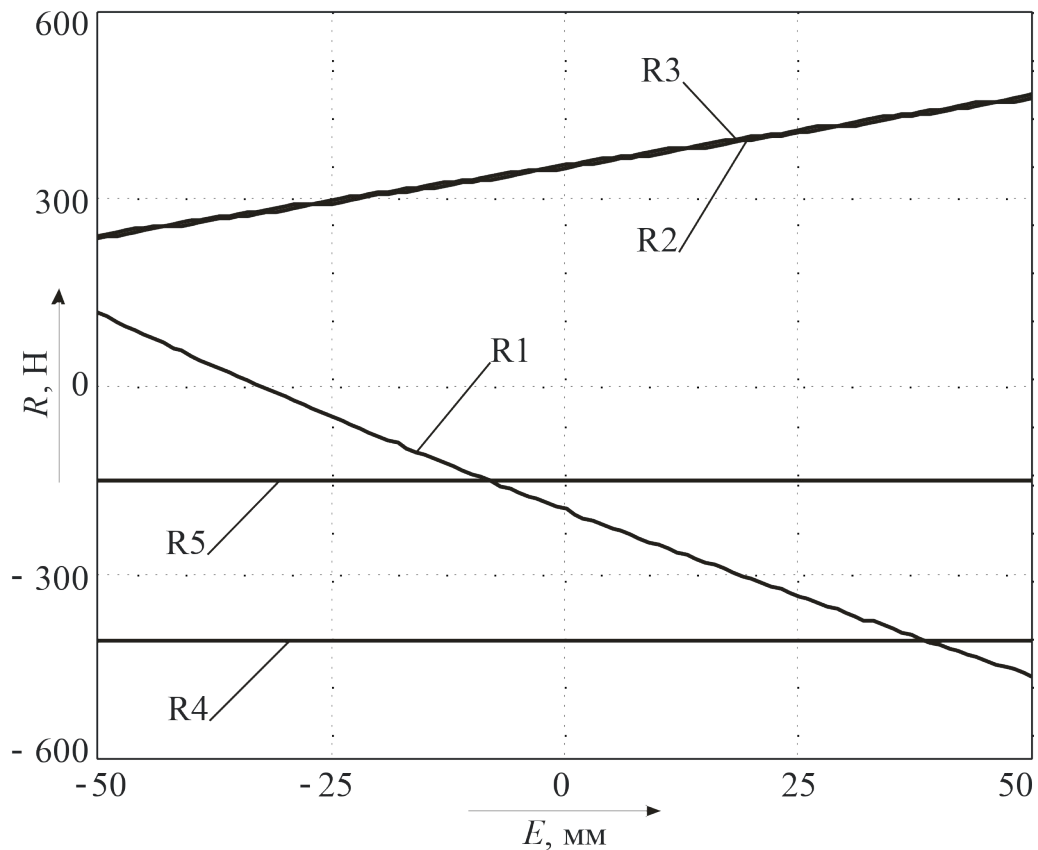


Рис. 2.13 – Залежність зміни реакцій при зміні положення центру поворотного шарніру відносно центру рухомої платформи

Спільною рисою майже всіх графіків є близькість значень величин реакцій $R2$ і $R3$. Тільки на графіку з рисунку 2.6 дані величини різняться з точкою перетину при $x_0 = -10$ мм. Така особливість пояснюється симетричністю розташування еквівалентних штанг 2 і 3, а мінімальна різниця і зміщення точки співпадання графіків пояснюється прикладенням ваги деталі з певним плечем відносно осі руки робота. Останній параметр лінійно впливає на величину реакцій в штангах, в основному викликаючи зростання значень даних силових параметрів (див. графіки на рисунку 2.10). Тільки реакція $R5$ зменшується за величиною. Слід розуміти, що від'ємні значення реакцій на всіх графіках свідчать тільки про те, що їх напрямок є протилежним показаному на схемах навантаження. Тому в усіх поясненнях розглядаються абсолютні величини реакцій без урахування знаку.

Відмітимо однозначну тенденцію зменшення величин всіх реакцій на графіках рисунку 2.7. Це пояснюється тим, що обраний початковий кут

нахилу руки робота призводить до віддалення як центру рухомої платформи, так і руки робота від напрямних повзунів переміщення штанг, що збільшує їх кути нахилу до даних напрямних. Рух в додатньому напрямку вздовж осі Y зменшує нахил штанг до напрямних руху повзунів переміщення саме цих штанг, що позитивно відображається на величинах реакцій. Дану тенденцію однозначно підтверджує графік на рисунку 2.12. Збільшення довжини штанги також буде зменшувати її нахил до напрямні руху повзуна безпосередньо її переміщення.

Вагомий вплив на характер зміни величини реакцій в штангах спричиняють кути нахилу руки робота та орієнтації захвату, що видно з графіків на рисунках 2.8 і 2.9. Майже кожна залежність має свій екстремум, хіба що окрім залежності реакції $R4$ на графіку рисунку 2.9, яка має однозначну тенденцію зменшення величини реакції при зростанні значення кута β . Зміна кутового положення руки робота та орієнтації захвату призводить до найбільш різкої зміни положення ваги деталі як найбільшого вагового параметру відносно елементів маніпулятора, що і призводить до появи екстремумів на графіках.

На останньому графіку на рисунку 2.13 всі величини реакцій реакцій мають лінійні залежності від зміни положення центру поворотного шарніру відносно центру рухомої платформи. Рознесення даних точок, особливо від центру шарніру еквівалентної штанги 1, призводить до зростання величин реакцій, окрім реакцій $R4$ і $R5$. Відсутність впливу на дві зазначені реакції пояснюється особливостями схем навантаження, оскільки ці реакції визначалися тільки для руки робота.

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	ПРОЄКТ
1	2	3	4	5
1.	Річна програма випуску продукції	шт./рік	10000	10000
2.	Потреба у роботах-маніпуляторах	шт./рік	2	1

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5
3.	Штучний час виконання операцій: механічної обробки	хв.	0,23	0,23
	транспортування	хв.	0,04	0,04
	заміна робочого органу та ПЗ	хв.		0,30
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.	142900	

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:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot Z_{сг.к} \cdot \left(1 + \frac{K_{\partial}}{100} \right) + \frac{B_{с}}{100} + H_{в}, \quad (3.1)$$

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.;

K_{∂} – 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).

$$B_{\text{пк}} = 1 \times 9,5 \times 04,65 \times \frac{10}{100} + \frac{22,0}{100} + 1 \times 9,5 \times 04,65 \times \frac{47}{100} = 3697,83 \text{ грн.}$$

3.2.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва роботи:

$$B_m = H_{op} \times T_{mex} \times Z_{cz.m} \times \frac{10}{100} + \frac{K_d}{100} + \frac{B_c}{100} + H_6, \quad (3.2)$$

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.

$$B_r = 1 \times 20,8 \times 03,27 \times \frac{10}{100} + \frac{22,0}{100} + 1 \times 20,8 \times 03,27 \times \frac{52}{100} = 3999,61 \text{ грн.}$$

3.3 Визначення повної собівартості та оптової ціни проектного робота

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного робота розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

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

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:

$$Z_{op} = 2,3 \times 57,185 = 131,53 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n Z_{op_i} \times \frac{P_{pp_i}}{100}, \quad (3.4)$$

де P_{pp_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:

$$B_{цех} = \sum_{i=1}^n Z_{op_i} \times \frac{P_{цр_i}}{100}, \quad (3.5)$$

де $P_{цр}$ – процент цехових витрат по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

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

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

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 $З_{\text{ор}}$, грн	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн		Загальноцехові витрати $K_{\text{цех}}$, грн	
					%	грн.	%	грн.
Ливарні	1,3	3	92,191	119,85	230	275,65	142	170,18
Механічні	2,5	4	82,586	206,47	285	588,43	132	272,53
Слюсарсько- складальні	8,4	4	82,586	693,72	210	1456,82	142	985,09
Інші	5,7	3	74,324	423,65	220	932,02	140	593,11
Всього	17,9	–	–	1443,68	–	3252,92	–	2020,91

ПОВНУ СОБІВАРТІСТЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ РОБОТА
РОЗРАХОВУЄМО ЗА СТАТТЯМИ ВИТРАТ ЗА ДОПОМОГОЮ
ОТРИМАНИХ НА ПІДПРИЄМСТВІ КОШТОРИСНИХ ТА
ЗВІТНИХ КАЛЬКУЛЯЦІЙ БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ.
РОЗРАХУНОК ВИКОНУЄМО ЗА ФОРМУЛОЮ:

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

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_b – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

B_n – напівфабрикати власного виробництва, грн.;

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

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

$З_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

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

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

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

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

$B_{не}$ – позавиробничі витрати, грн.

Таблиця 3.3 – Склад матеріальних витрат на модернізацію робота

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниц я	Витрати (шт, кг)	Ціна, грн	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1.	Сталь 3	кг	10,0	42,60	426,00
2.	Дюралюміній	кг	0,5	210,80	105,40
	Всього	—	—	—	531,40
ПОКУПНІ КОМПЛЕКТУЮЧІ					
1.	Комплект підшипників	шт.	1	6220,0	6220,00
2.	Стопорні кільця	шт.	4	25,0	100,00
	Всього				6320,0

Розрахунки собівартості робота зводимо до табл. 3.4.

Повну собівартість модернізованого робота визначаємо за формулою:

$$C_{пов.пр} = C_{пов.б} - \sum_{i=1}^m C_{ан.пов} + C_{пов.мод}, \quad (3.7)$$

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

m – кількість анульованих деталей та вузлів;

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

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

$$C_{пов.пр} = 119083,33 - 13030,79 + 18792,06 = 124845 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.4 – Повна собівартість модернізації робота-маніпулятора

№ п.п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 3.3	531,40
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	21,26
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	Π_n	табл. 3.3	6320,00
4.	Зворотні відходи	$-B_{зв}$	5% від M_o	31,88
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_b	6% від ($M_o + M_d + \Pi_n$)	274,91
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$\Pi_{тех}, E_{тех}$	59,8% від $З_{ор}$	863,32
7.	Всього матеріальні витрати			7979,00
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 3.2	1443,68

9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	144,37
10.	Відрахування в фонд соціального страхування	$В_{сс}$	22% від $(З_{ор} + З_{др})$	349,37

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	12,2% від $З_{ор}$	176,13
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	$В_о$	табл. 3.2	3252,92
13.	Цехові витрати	$В_{цех}$	табл. 3.2	2020,91
14.	Загальнозаводські витрати	$В_{зав}$	221% від $З_{ор}$	3190,54
15.	Інші виробничі витрати	$В_{ін}$	3,4% від $З_{ор}$	49,09
16.	Виробнича собівартість	$С_{вир}$	$S(7, 15)$	18606,00
17.	Позавиробничі витрати	$В_{пв}$	1,0% від $С_{вир}$	186,06
18.	Повна собівартість	$С_{пов.мод}$	$С_{вир} + В_{пв}$	18792,06

Оптову ціну нового робота-маніпулятора розраховуємо за формулою:

$$Ц_{опт} = C_{нов} + П_n = C_{нов} \times \left(1 + \frac{P_n}{100}\right), \quad (3.8)$$

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

$$Ц_{опт} = 124845 \times \left(1 + \frac{20}{100}\right) = 149800 \text{ грн.}$$

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:

$$B_e = \frac{N_b \times K_o \times K_N \times K_d}{h_m \times h_c} \times T_{\text{нор}} \times C_{\text{ел}}, \quad (3.9)$$

де N_b – встановлена потужність електродвигунів робота, кВт;

K_o – 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);

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

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

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

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

В базовому варіанті:

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{(0,75 \times 0,23 + 0,7 \times 0,04) \times 0,6 \times 0,6 \times 0,4}{0,86 \times 0,92 \times 60} \times 7,5 = 0,0046 \text{ грн.};$$

В проектному варіанті:

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{0,75 \times 0,6 \times 0,6 \times 0,4}{0,86 \times 0,92} \times \frac{0,27}{60} \times 7,5 = 0,0046 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \times R_{\text{м}} \times T_{\text{нор}}}{100} \times K_{\text{п}}, \quad (3.10)$$

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

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

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

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{78,5 \times 0,27}{100 \times 60} \times 0 = 0,0247 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{78,5 \times 0,27}{100 \times 60} \times 0 = 0,0283 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

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

де $\Gamma_{\text{вм}}, \Gamma_{\text{ве}}$ – 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.).

$$B_p^{\text{баз}} = \frac{7 \times 80 + 18 \times 20}{3950} \times \frac{0,27}{60} = 0,0218 \text{ грн.};$$

$$B_p^{\text{пр}} = \frac{8 \times 80 + 20 \times 20}{3950} \times \frac{0,27}{60} = 0,0244 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

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

де F_o – виробнича площа, яку займає робот, включаючи площу його переміщення, м^2 ;

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

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{1,6 \times 0,27}{3950 \times 60} \times 80 = 0,0014 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{2,0 \times 80 \times 0,27}{3950 \times 60} = 0,0018 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію робота:

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

де H_a – норма амортизації, %;

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

Балансову вартість робіт знайдемо за формулою:

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

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:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 142900 \times (1 + 0,06 + 0,05) = 158619 \text{ грн.},$$

нового робота:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} = 149800 \times (1 + 0,06 + 0,05) = 164780 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{баз}} = \frac{158619 \times 20 \times 0,27}{3950 \times 100 \times 60} = 0,0361 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{пр}} = \frac{164780 \times 20 \times 0,27}{3950 \times 100 \times 60} = 0,0375 \text{ грн.}$$

Витрати на переналагодження проєктного робота:

$$B_{\text{н}} = C_{\text{зн}} \cdot (1 + K_{\text{д}})(1 + K_{\text{с}}) \frac{T_{\text{нал}} \cdot A}{60 \cdot N_{\text{д}}}, \quad (3.15)$$

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

A – кількість налагоджень на рік;

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

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

$$B_n^{np} = 90,672 \times (1 + 0,1) \times (1 + 0,22) \times \frac{0,30 \times 2}{60 \times 0000} = 0,0007 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Експлуатаційні витрати

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	0,0046	0,0046
2.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,0247	0,0283
3.	Ремонт робота	B_p	0,0218	0,0244
4.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	0,0014	0,0018
5.	Амортизація робота	B_a	0,0361	0,375
6.	Переналагодження робота	B_n		0,0007
Загальна сума		B_e	0,0886	0,4348

3.5 Розрахунок показників економічної ефективності

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

$$E_{рв} = (C_{опт}^{пр} - C_{пов}^{пр}) \times I_v - E_n \times K_v, \quad (3.16)$$

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

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

I_v – програма виробництва робіт, шт./рік;

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

K_B – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_{\epsilon} = B_{\text{ПК}} + B_{\text{Т}}, \quad (3.17)$$

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

$$K_{\epsilon} = 3697,83 + 3975,80 = 7673,63 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рв}} = (149800 - 124847) \times 0,16 \times 7673,63 = 23800 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект у споживача розрахуємо за формулою:

$$E_{\text{рсп}} = (P_{\epsilon}^{\text{баз}} - P_{\epsilon}^{\text{пр}}) \times N_{\text{д}} - E_{\text{н}} \times K_{\text{сп}}, \quad (3.18)$$

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

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

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

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

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

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

$$K_{\text{сп}} = 164780 \times 158619 \times 2 = -152458 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{pсн}} = (0,0886 - 0,4348) \times 10000 - 0,16 \times (-93897) = 20900 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника

$$T_{\text{окв}} = \frac{K_{\text{с}}}{(C_{\text{опт}}^{\text{пр}} - C_{\text{пов}}^{\text{пр}}) \times I_{\text{в}}} = \frac{7674}{(149800 - 124847) \times 0,16} = 0,31 \text{ року} = 3,7 \text{ міс.} \quad (3.20)$$

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

Таблиця 3.6 – Підсумкові техніко-економічні показники проекту

№ п/п	Показники	Оди- ниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,)
1.	Потреба у роботах	шт./рік	2	1	-50,0
2.	Річний випуск виробів	шт./рік	10000	10000	—
3.	Штучний час виконання операцій:				
	механічної обробки	хв.	0,23	0,23	
	транспортування	хв.	0,04	0,04	
	заміна робочого органу та ПЗ	хв.	—	0,30	
4.	Повна собівартість				
	модернізації робота	грн.		18792	
	модернізованого робота	грн.	—	124845	—
5.	Оптова ціна роботу	грн.	142900	149800	+4,8
6.	Експлуатаційні витрати із застосуванням робота (на один виріб)	грн.	0,0886	0,4348	+391
7.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	7674	—
8.	Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника	міс.	—	3,7	—
9.	Річний економічний ефект:				
	а) у виробника	грн.	—	23800	—
	б) у споживача	грн.	—	20900	—

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі за другим (магістерським) рівнем вищої освіти розв'язане важливе науково-технічне завдання визначення силових залежностей п'ятикоординатного робота, побудованого на основі паралельних кінематичних структур, для раціонального підбору двигунів приводів подачі вихідного органу та подальшого розв'язку задач динаміки.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- проведено огляд існуючих типів промислових роботів та виконано підбір прототипів;
- розроблено на рівні схеми конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розроблені схеми навантаження п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- розроблено математичну модель силового навантаження п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур;
- виконано розрахунок силових залежностей в штангах п'ятикоординатного робота для раціонального підбору двигунів приводів подачі вихідного органу та подальшого розв'язку задач динаміки;
- виконано розрахунок економічної ефективності від впровадження результатів роботи.

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 транспортувальне технологічне обладнання, побудоване на основі паралельних кінематичних структур.

Обрані прототипи дали можливість на рівні схеми розробити нову конструкцію п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур.

Розв'язок зворотної кінематичної задачі для розробленого механізму дав можливість розраховувати розташування штанг в просторі при зміні положення вихідного органу.

Задачу визначення внутрішніх силових факторів розділено на дві частини. В першій частині розглядається схема навантаження руки робота, в другій – схема навантаження рухомої платформи. Зв'язок між даними частинами врахований через складові реакції, що виникають у поворотному шарнірі. Результатом створення математичної моделі для кожної зі схем навантаження стали залежності для розрахунку реакцій в штангах механізму. При цьому для рухомої платформи кожна із пар штанг була замінена на еквівалентну штангу. Коректність такої заміни обгрунтована в роботі.

В результаті математичного моделювання отримано графіки залежності внутрішніх силових факторів від параметрів схем навантаження, які можуть бути використанні для побудови методики конструювання механізму за представленою схемою, наприклад, для раціонального підбору двигунів приводів подачі вихідного органу, або для подальшого розв'язку задач динаміки.

Також в роботі проведено розрахунок очікуваної економічної ефективності від впровадження результатів роботи. Очікуваний економічний ефект у виробника продукції в складає 23800 грн, у споживача – 20900 грн. Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника становить 3,7 місяці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. http://wwwcdl.bmstu.com/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. Clavel, R., "Device for the Movement and Positioning of an Element in Space," US Patent No. 4,976,582, December 11, 1990.
5. Вовк М. Визначення конструктивних залежностей п'ятикоординатного робота на основі паралельних кінематичних структур. Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2022. – 72 с.
6. 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.
7. Костюк В.І., Спишу Г.О., Ямпольський Л.С. Робототехніка. – К.: Вища школа, 1994. – 446 с.
8. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Складар Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою.- Кіровоград.2004. - 449с.
9. Кузнецов Ю.Н., Дмитриев Д.А., Диневич Г.Е. Компонировки станок с механизмами параллельной структуры / Под ред. Ю.Н. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2010. – 471 с.

10. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 420 с.
11. Павленко І.І. Рухові характеристики промислових роботів. – Кіровоград: КДТУ, 2000. – 124 с.
12. Павленко І.І. Структура промислових роботів. – Кіровоград: КІСМ, 1998. – 100 с.
13. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. – Житомир, ЖІТІ, 2001. – 612 с.
14. Струтинський В.Б., Мельничук П.П. Математичне моделювання металорізальних верстатів. – Житомир, ЖІТІ, 2002. – 570 с.
15. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання: Навчальний посібник / Ю.В. Кодра, З.А. Стоцько; За ред. З.А. Стоцька. – Львів: Бескид БІТ, 2004. – 466 с.
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 станочные комплексы. – 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.