Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

Аналіз можливих структурних варіантів будови промислових роботів

An analysis of possible structural configurations for industrial robots

Виконала здобувачка вищої освіти
2 курсу магістратури групи ПМ-25М-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності G9 «Прикладна механіка»
_____ Анна МАЖАРА

Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ

Рецензент:
канд. техн. наук, доцент
_____ Любов ОЛІЙНІЧЕНКО

Завідувач кафедри ММР
канд. техн. наук, доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА

Кр

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
Мажара Анна Віталіївна
Сертифікат: 18DF2C9B93CEA20404000000B5943C0063B47406
Дійсний з 19.11.2026 21:58:33 по 19.11.2027 21:58:32

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Другий (магістерський) рівень вищої освіти
Галузь знань – G Інженерія, виробництво та будівництво
Спеціальність – G9 Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма – Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
машинобудування,
мехатроніки і робототехніки
канд. техн. наук, доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА

Завдання на кваліфікаційну роботу
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
Мажарі Анні Віталіївні

Тема роботи:
Аналіз можливих структурних варіантів будови промислових роботів
Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент Олександр СКІБІНСЬКИЙ
Затверджено наказом ЦНТУ від 10 серпня 2026 року № 35-13
Строк подання роботи до захисту:
20 грудня 2026 р.
Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Розробити теоретичні основи визначення загальної кількості можливих варіантів промислових роботів з різною кількістю ланок і кінематичних пар.

Провести кількісний аналіз, який передбачає проведення структуризації та групування кінематичних схем з метою суттєвого зменшення кількості варіантів кінематичних схем доцільних до подальшого розгляду й виділення варіантів, які пропонуються до реалізації на практиці.

Для вирішення питань кількісного аналізу, а саме, визначення кількості теоретично можливих варіантів кінематичних схем промислових роботів та розподілу варіантів схем за ступенем доцільності і визначення їх кількості розробити спеціалізоване програмне забезпечення.

Розробити програму для кількісного аналізу варіантів кінематичних схем промислових роботів з розподілом структурнх формул та варіантів кінематичних схем по групам доцільності.

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	к.т.н., доцент Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
Розділ 2	к.т.н., доцент Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
Розділ 3	к.т.н., доцент Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
Розділ 4	к.е.н, доцент Ірина ЖУРИЛО		

Календарний план

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання роботи	Примітка
1	Опрацювання літератури по тематиці роботи	18.09.2026 р.	
2	Виконання першого розділу	18.09.2026 р.	
3	Виконання другого розділу	09.10.2026 р.	
3	Виконання третього розділу	01.11.2026 р.	
4	Виконання четвертого розділу	19.11.2026 р.	
5	Виконання графічної частини роботи	27.11.2026 р.	
6	Перевірка роботи на академічний плагіат	01.12.2026 р.	
7	Рецензування роботи	04.12.2026 р.	

Дата видачі завдання
01 вересня 2026 р.

Здобувачка вищої освіти _____ Анна МАЖАРА

Керівник роботи _____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ

АНОТАЦІЯ

Мажара А. В. Аналіз можливих структурних варіантів будови промислових роботів : кваліфікаційна магістерська робота : спец. G9 «Прикладна механіка» ОПП «Прикладна механіка» / наук. кер. О. І. Скібінський. Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2026. - 66 с.

Графічна частина – 9 аркушів формату А1.

Актуальність роботи. Роботизовані комплекси мають багатоваріантні виконання за конструктивними та технологічними ознаками. Значною мірою це стосується особливостей використовуваних роботів (портальні, встановлені на верстаті, встановлені на підлозі, одно- чи двозахватні і ін.), допоміжних пристроїв (подавальні, приймальні, подавально-приймальні), а також їх конструктивного і компонувального виконання. Аналіз структурних варіантів будови промислових роботів є актуальною проблемою.

Мета роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності використання промислових роботів в складі роботивованих комплексів за рахунок проведення аналізу структурних варіантів будови та встановлення доцільності їх використання для відповідних умов роботи.

Практична цінність. Розроблено теоретичні основи визначення загальної кількості можливих варіантів промислових роботів з різною кількістю ланок і кінематичних пар та умов їх з’єднання в завершену конструкцію.

Проведено кількісний аналіз, який передбачає проведення структуризації та групування кінематичних схем з метою суттєвого зменшення кількості варіантів кінематичних схем доцільних до подальшого розгляду й виділення варіантів, які пропонуються до реалізації на практиці.

Для вирішення питань кількісного аналізу, а саме, визначення кількості теоретично можливих варіантів кінематичних схем промислових роботів та розподілу варіантів схем за ступенем доцільності і визначення їх кількості було розроблено блок-схему відповідно до якої надалі розроблено спеціалізоване програмне забезпечення яке є шляхом до пришвидшення циклу розробки робототехнічних систем.

Розроблена програма для кількісного аналізу варіантів кінематичних схем промислових роботів. Результатом роботи якої є структурні формули варіантів кінематичних схем по групам доцільності.

Розроблено стартап. Це експертна система на базі штучного інтелекту, яка інтегрує наукові методики аналізу кінематичних та динамічних характеристик.

промисловий робот, структурна формула, роботизований комплекс, кінематична схема, кількісний аналіз

ANNOTATION

Mazhara A. V. An analysis of possible structural configurations for industrial robots : qualification work for the educational level "Master's" : specialty G9 "Applied Mechanics" EPP "Applied Mechanics" / scientific director O. I. Skibinskyi. Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi: CUNTU, 2026. - 66 p.

Graphic part - 9 sheets of A1 format.

Relevance of the Work. Robotic systems have multi-variant designs based on structural and technological features. To a large extent, this concerns the specifics of the robots used (gantry, machine-mounted, floor-mounted, single- or double-gripper, etc.), auxiliary devices (feeding, receiving, or combined feeding-and-receiving units), as well as their structural and layout designs. The analysis of structural variants of industrial robot configurations remains a highly relevant problem.

Purpose of the Work. The objective of this qualification work is to improve the operational efficiency of industrial robots within robotic systems by analyzing structural design variants and determining the feasibility of their application for specific operating conditions.

Scientific Novelty and Practical Value. Theoretical foundations have been developed for determining the total number of possible industrial robot configurations with varying numbers of links and kinematic pairs, as well as the conditions for their assembly into a complete structure.

A quantitative analysis has been performed, involving the structuring and grouping of kinematic schemes. This significantly reduces the number of variants considered for further evaluation and identifies the specific configurations proposed for practical implementation.

To address the issues of quantitative analysis—specifically, determining the number of theoretically possible kinematic schemes and distributing them by feasibility levels—a flowchart was developed. Based on this flowchart, specialized software was created to accelerate the development cycle of robotic systems.

Software for the quantitative analysis of industrial robot kinematic schemes has been developed. The output of this software includes structural formulas for kinematic scheme variants, categorized by feasibility groups.

A startup has been developed: an AI-based expert system that integrates scientific methodologies for analyzing kinematic and dynamic characteristics.

industrial robot, structural formula, robotic complex, kinematic diagram, quantitative analysis

ЗМІСТ

ВСТУП 7

1 СТРУКТУРНА БУДОВА ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ 10

1.1 Постановка задачі та аналіз літературних джерел з проблематики 12
дослідження 14

1.2 Розробка методики дослідження 17

2 КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ВАРІАНТІВ БУДОВИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ 21

2.1 Створення передумов для проведення аналізу можливих варіантів 24
будови промислових роботів

2.2 Розробка програми для кількісного аналізу варіантів будови 26
промислових роботів

2.3 Аналіз можливих варіантів будови промислових роботів 28

3 ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ВАРІАНТІВ БУДОВИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ 38

3.1 Аналіз варіантів кінематичних схем промислових роботів

3.2 Аналіз робочих зон промислових роботів 40

3.3 Висновки 55

4 РОЗРОБКА СТАРТАПУ

4.1 Проблема та обґрунтування рішення 56

4.2 Технічна архітектура продукту 58

4.3 Аналіз ризиків та конкурентне середовище 68

4.4 Майбутні перспективи та стратегія масштабування 69

ВИСНОВКИ

ЛІТЕРАТУРА

ВСТУП

Актуальність теми

Роботизовані комплекси мають багатоваріантні виконання за конструктивними та технологічними ознаками. Значною мірою це стосується особливостей використовуваних роботів (портальні, встановлені на верстаті, встановлені на підлозі, одно- чи двозахватні і ін.), допоміжних пристроїв (подавальні, приймальні, подавально-приймальні), а також їх конструктивного і компонувального виконання. Аналіз структурних варіантів будови промислових роботів є актуальною проблемою.

Сучасні реалії вимагають швидкої переналадки виробництва випуск нової продукції. Дослідження структурних варіантів (роботи з паралельною кінематикою, дельта-роботи, SCARA, мобільні маніпулятори) дозволяє знайти баланс між жорсткістю конструкції та розміром робочої зони.

Вибір оптимальної кінематичної схеми безпосередньо впливає на продуктивність. Аналіз структурних варіантів дозволяє мінімізувати масу рухомих частин при збереженні необхідної вантажопідйомності, що є критичним для сталого розвитку промисловості.

Мета і завдання дослідження

Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності використання промислових роботів в складі роботивованих комплексів за рахунок проведення аналізу структурних варіантів будови та встановлення доцільності їх використання для відповідних умов роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити теоретичні основи визначення загальної кількості можливих варіантів промислових роботів з різною кількістю ланок і кінематичних пар;

- провести кількісний аналіз, який передбачає проведення структуризації та групування кінематичних схем з метою суттєвого зменшення кількості варіантів кінематичних схем доцільних до подальшого розгляду й виділення варіантів, які пропонуються до реалізації на практиці;

- для вирішення питань кількісного аналізу, а саме, визначення кількості теоретично можливих варіантів кінематичних схем промислових роботів та розподілу варіантів схем за ступенем доцільності і визначення їх кількості розробити спеціалізоване програмне забезпечення;

- розробити програму для кількісного аналізу варіантів кінематичних схем промислових роботів з розподілом структурних формул та варіантів кінематичних схем по групам доцільності.

Практична цінність

1. Розроблено теоретичні основи визначення загальної кількості можливих варіантів промислових роботів з різною кількістю ланок і кінематичних пар та умов їх з'єднання в завершену конструкцію.

2. Проведено кількісний аналіз, який передбачає проведення структуризації та групування кінематичних схем з метою суттєвого зменшення кількості варіантів кінематичних схем доцільних до подальшого розгляду й виділення варіантів, які пропонуються до реалізації на практиці.

3. Для вирішення питань кількісного аналізу, а саме, визначення кількості теоретично можливих варіантів кінематичних схем промислових роботів та розподілу варіантів схем за ступенем доцільності і визначення їх кількості було розроблено блок-схему відповідно до якої надалі розроблено спеціалізоване програмне забезпечення яке є шляхом до пришвидшення циклу розробки робототехнічних систем.

4. Розроблена програма для кількісного аналізу варіантів кінематичних схем промислових роботів. Результатом роботи якої є структурні формули варіантів кінематичних схем по групам доцільності.

5. Розроблено стартап RoboFit AI. Це експертна система на базі штучного інтелекту, яка інтегрує наукові методики аналізу кінематичних та динамічних характеристик. Система автоматично проводить крос-аналіз технічного завдання замовника та існуючих на ринку структурних схем маніпуляторів, видаючи техніко-економічне обґрунтування.

1 СТРУКТУРНА БУДОВА ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

1.1 Постановка задачі та аналіз літературних джерел з проблематики дослідження

Структурний аналіз промислових роботів є фундаментальним етапом проєктування, що визначає відповідність кінематичної схеми та жорсткості конструкції заданим технологічним вимогам [3]. Проведення розрахунків напружено-деформованого стану дозволяє ідентифікувати критичні точки концентрації напружень, запобігаючи передчасному втомному руйнуванню механічних вузлів.

Оптимізація масо-габаритних характеристик на основі результатів аналізу сприяє зменшенню інерційності системи [4], що безпосередньо підвищує енергоефективність та продуктивність роботизованого комплексу. Крім того, структурне моделювання дозволяє врахувати вплив температурних деформацій та зовнішніх навантажень на геометричну точність маніпуляцій у реальних виробничих умовах.

Застосування методу скінченних елементів у межах структурного аналізу забезпечує високу точність моделювання динамічної поведінки маніпулятора під час виконання високошвидкісних операцій. Оцінка власної частоти коливань ланок робота є необхідною умовою для уникнення резонансних явищ, які можуть критично знизити точність позиціонування робочого органа.

Ретельний аналіз механічної структури є запорукою надійності системи, оскільки він дозволяє мінімізувати люфти та деформації, що є критичним для прецизійних галузей, таких як мікроелектроніка чи аерокосмічне будування. Таким чином, структурний аналіз виступає науковим підґрунтям для створення інтелектуальних робототехнічних систем нового покоління з прогнозованим життєвим циклом та гарантованою безпекою експлуатації [9].

Питанням структурного аналізу промислових роботів займалися як відчезняні, так і закордонні вчені. Великий внесок у розвиток цього питання вніс

професор Іван Павленко [3], який запропонував розділити структуру на кінематичну, конструктивну та кінематично-конструктивну складову.

В роботі [5] розглянуто використання кінематичної структури промислових роботів, яка враховує ступені рухомості робота та їх розподіл між функціональними механізмами. Розроблена узагальнена структура виконавчих механізмів роботів та виділені їх відмінні ознаки.

Запропонована конструктивна структура промислових роботів, яка враховує кількість, умови приєднання та взаємне направлення ланок пристрою розглянути в роботі [6]. Там же приведена структура приєднання захватних пристроїв до ланок пристрою.

Робота [7] є значною мірою об'єднуючою та присвячена конструкторсько-кінематичній структурі промислових роботів, які призначені для здійснення завантажування і розвантаження металообробних верстатів. В роботі зазначається, що кінематична структура не вказує на особливості будови та роботи промислового робота. Запропоновано головну увагу приділити ступеням рухомості Для вирішення поставленого завдання необхідно в конструктивну структуру двозахватного пристрою [6] ввести необхідні кінематичні пари. В роботах, в основному, використовуються кінематичні пари п'ятого класу. Тож авторами пропонується використання конструктивно-кінематичних схем та розробка структурних формул.

Також вічизняні вчена, зокрема Павленко І.І., Мажара В.А., Годунко М.О. та інші займалися питанням кількісного аналізу варіантів виконань промислових роботів. Так в статті [8] було розроблено методику, яка дозволяє визначити кількість теоретично можливих варіантів схем та встановити напрямок пошуку найбільш доцільних варіантів. В основу вирішення цієї задачі покладені всі відмінні ознаки, які оцінюють можливі різновиди конструкцій двозахватних пристроїв.

Ще один підхід у використання структурного аналізу полягає у питання проектування роботизованих комплексів в залежності від виконання технологічного обладнання, промислових роботів та допоміжних пристроїв. У

роботі [10] пропонується використання планувальної, конструктивно-планувальної, конструктивно-функціональної та інших структур. В продовження цього питання, в статті [11] запропоновано для пошуку доцільних виконань роботизованих комплексів використання структурного методу, що враховує характеристики оброблюваних деталей, виконуваної операції, особливості використовуваного технологічного обладнання, промислових роботів, допоміжних пристроїв тощо. Розроблено багатоваріантну структуру функціонування роботизованого комплексу, яка є основою для розгляду питань щодо планувальної структури, логіки функціонування тощо.

Питання підвищення продуктивності роботизованих комплексів висвітлювалося в різних джерелах [12-17]. Впровадження промислових роботів у структуру виробничих комплексів забезпечує істотне зростання коефіцієнта технічного використання обладнання завдяки здатності систем функціонувати у безперервному циклі з мінімальними часовими витратами на допоміжні операції. Висока динамічна стабільність та прецизійність маніпуляторів дозволяють значно інтенсифікувати технологічні процеси, скорочуючи тривалість виробничого такту без втрати якісних показників готової продукції.

Ефект від впровадження робототехнічних систем полягає у мінімізації впливу людського фактора та оптимізації логістичних потоків усередині комплексу, що в сукупності веде до радикального підвищення загальної пропускної здатності підприємства [18].

Отже, актуальність структурних досліджень промислових роботів зумовлена необхідністю забезпечення високої динамічної точності та надійності мехатронних систем в умовах переходу до високошвидкісних та інтелектуальних виробничих циклів.

Проведення такого аналізу дозволяє на етапі проектування виявити резерви для зниження металомісткості та підвищення жорсткості конструкції, що є критичним для енергоефективності та довговічності роботизованих комплексів.

1.2 Розробка методики дослідження

Без ретельного аналізу неможливо забезпечити високу прецизійність (точність позиціонування), яка в сучасних роботах сягає мікронних значень. Роботи піддаються значним динамічним навантаженням. Структурний аналіз дозволяє виявити слабкі ланки, де виникають пружні деформації, що негативно впливають на траєкторію руху. Аналіз допомагає розрахувати моменти інерції та гравітаційні складові. Це критично для підбору приводів (сервомоторів) та розробки алгоритмів керування, які компенсують інерційні сили при високих швидкостях.

Традиційні методи аналізу, що виконуються "вручну", мають низку критичних недоліків, зокрема експоненціальна складність, тобто зі збільшенням кількості осей кількість тригонометричних рівнянь зростає в геометричній прогресії. Людський фактор при складанні матриць трансформації розмірністю 4 х 4 часто призводить до некоректних результатів у розрахунках прямої та зворотної задач кінематики. Зміна довжини хоча б однієї ланки потребує повного перерахунку всієї математичної моделі.4.

Створення спеціалізованого програмного забезпечення є єдиним шляхом до пришвидшення циклу розробки робототехнічних систем. Архітектура програми для структурного аналізу повинна включати модуль символьних обчислень.

Для вирішення питань кількісного аналізу, а саме, визначення кількості теоретично можливих варіантів кінематичних схем промислових роботів та розподілу варіантів схем за ступенем доцільності і визначення їх кількості було розроблено блок-схему відповідно до якої надалі буде розроблено програму.

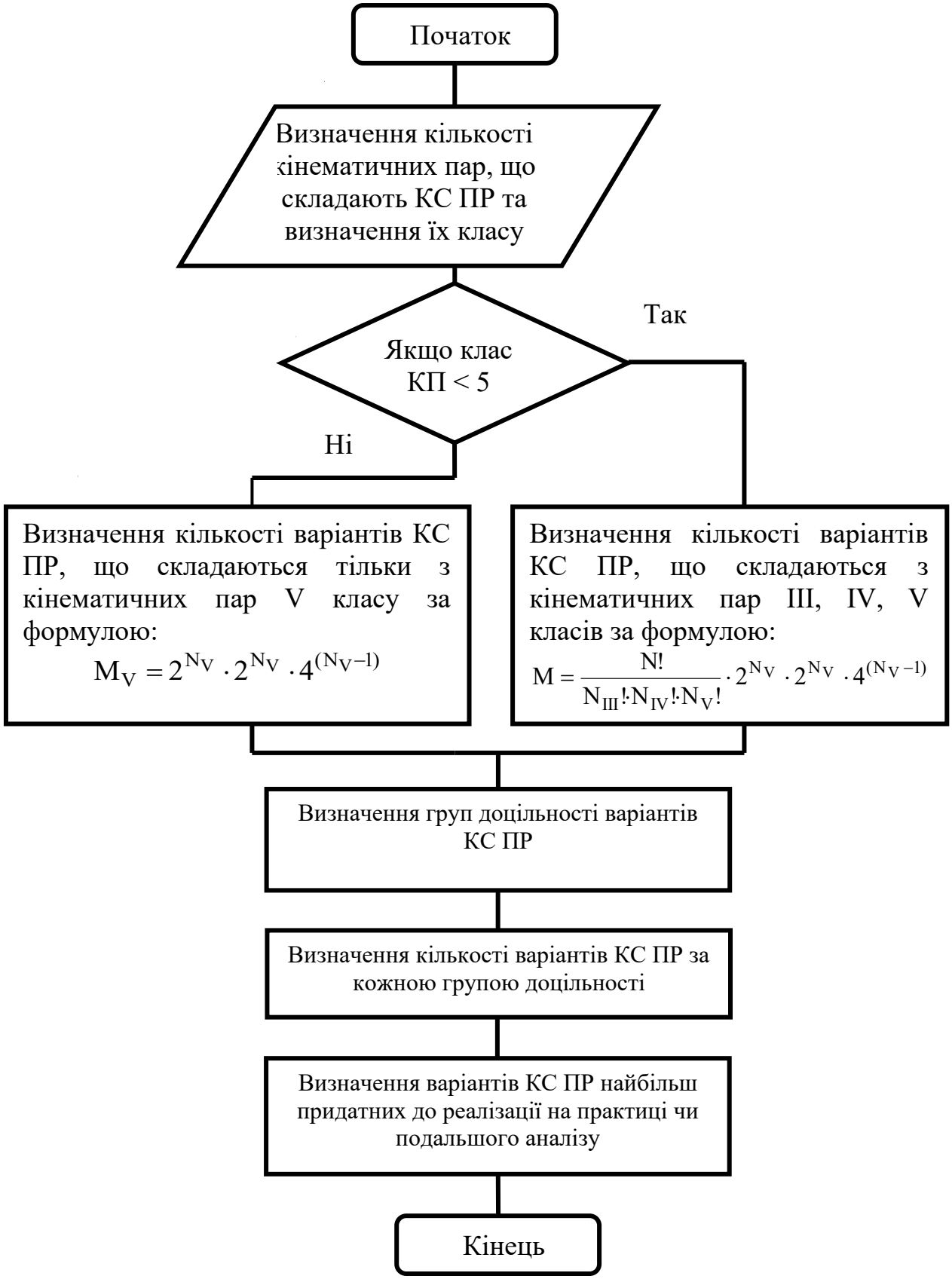


Рисунок 1.1 – Алгоритм проведення кількісного аналізу варіантів кінематичних схем ПР

Програма має з використанням бібліотек для символьної математики отримувати аналітичний вигляд рівнянь кінематики, що значно швидше за числові методи при багаторазовому використанні.

Інтеграція з графічними рушіями дозволяє будувати структурні схеми робота та візуалізувати його робочий простір. Це дає можливість візуально оцінити структуру на наявність колізій та ефективність конфігурації ланок.

Автоматизація структурного аналізу за допомогою програмного забезпечення не лише скорочує час проєктування з тижнів до годин, а й відкриває шлях до використання методів топологічної оптимізації. Це означає, що алгоритм може самостійно підбирати оптимальні розміри ланок та типи з'єднань під конкретне технологічне завдання (наприклад, зварювання в обмеженому просторі або високошвидкісне пакування).

У підсумку, структурний аналіз є фундаментом, на якому будується вся подальша логіка керування та експлуатації промислового робота. Створення вітчизняного або використання адаптованого міжнародного ПЗ для автоматизації цих розрахунків є критичною умовою для розвитку сучасного машинобудування.

2 КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ВАРІАНТІВ БУДОВИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

Визначення кінематики робота з необхідними параметрами являє собою складну та багатоступінчасту задачу. Для отримання оптимальних варіантів конструкції робота треба використовувати, серед інших, методи структурного та кінематичного аналізу і синтезу. Результатом проведення структурного аналізу та синтезу є кінематична схема промислового робота. Структурні дослідження умовно було поділено на два етапи :

— кількісний аналіз кінематичних схем промислових роботів;

— якісний аналіз кінематичних схем промислових роботів.

2.1 Створення передумов для проведення аналізу можливих варіантів будови промислових роботів

Кількісний аналіз передбачає проведення структуризації та групування кінематичних схем (КС) з метою суттєвого зменшення кількості варіантів КС доцільних до подальшого розгляду й виділення варіантів, які пропонуються до реалізації на практиці. В теорії можливе існування дуже значної кількості варіантів кінематичних схем ПР. Це добре видно при аналізі табл. 2.1; розрахунки для якої зроблено за наступною формулою [3, 9]:

$$M = \frac{N!}{N_{III}! \cdot N_{IV}! \cdot N_V!} \cdot 2^{N_V} \cdot 2^{N_V} \cdot 4^{(N_V - 1)}, \qquad (2.1)$$

де $N = \sum_{j=III}^{V} N_j$ — загальна кількість кінематичних пар, що використовуються в кінематичній схемі робота ;

N_{III}, N_{IV}, N_V — кількість кінематичних пар відповідно III , IV та V класу ;

Перший множник формули $(\frac{N!}{N_{III}!\cdot N_{IV}!\cdot N_V!})$ визначає кількість кінематичних схем робота в залежності від класу кінематичних пар та їх сполучення.

Другий множник формули (2^{N_V}) вказує кількість КС в залежності від виду руху в кінематичних парах V класу. Третій множник формули (2^{N_V}) вказує кількість КС в залежності від конструктивного виконання цих же пар V класу. Четвертий множник $(4^{(N_V-1)})$ визначає кількість КС в залежності від напрямку руху між сусідніми парами V класу. Можливі слідуючи види напрямку рухів:

1) перпендикулярний — ⊥;

2) перехресний — X;

3) паралельний — ||;

4) співвісний — |.

При такій великій кількості варіантів неможливо провести повний та якісний їх аналіз. Тому доцільно застосувати метод розподілу загальної структури робота на кінематичні групи. За цим способом кінематика маніпулятора розподіляються на слідуючи структурні групи:

а) кінематика основи;

б) кінематика руки;

в) кінематика кисті.

Таблиця 2.1 – Кількість теоретично можливих варіантів кінематичних схем промислових роботів

Умови визначення варіантів	Кількість ступенів рухомості N								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Кількість варіантів M								
Загальна кількість варіантів за видом видів руху, що використовуються (П,О) та порядку їх розміщення : $M = 2^{N_V}$,	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
тільки “П” варіанти	1	1	1	1	1	1	1	1	1
тільки “О” варіанти	1	1	1	1	1	1	1	1	1
комбіновані варіанти, загальна кількість:	2	6	14	30	62	126	254	510	1022
в т.ч. (N- 1)”П”+ 1 ”О”	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(N- 2)”П”+ 2 ”О”	—	3	6	10	15	21	28	36	45
(N- 3)”П”+ 3 ”О”	—	—	4	10	20	35	56	84	120
(N- 4)”П”+ 4 ”О”	—	—	—	5	15	35	70	126	210
(N- 5)”П”+ 5 ”О”	—	—	—	—	6	21	56	126	252
(N- 6)”П”+ 6 ”О”	—	—	—	—	—	7	28	84	210
(N- 7)”П”+ 7 ”О”	—	—	—	—	—	—	8	36	120
(N- 8)”П”+ 8 ”О”	—	—	—	—	—	—	—	9	45
(N- 9)”П”+ 9 ”О”	—	—	—	—	—	—	—	—	10
За характером конструктивного виконання кінематичних пар (П',О'): $M = 2^{N_V}$	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
За напрямком руху сусідніх пар : $M = 4^{(N_V-1)}$	4	16	64	256	1024	4096	16384	65536	262144
Всього для пар тільки п'ятого класу:	64	1024	$163*10^4$	$262*10^5$	$419*10^6$	$6,71*10^7$	$1,07*10^9$	$1,71*10^{10}$	$2.74*10^{11}$

Усі степені рухомості самого робота складають кінематику основи, ступені рухомості руху, які забезпечують просторове переміщення кінця руки з захватним пристроєм при умові нерухомої основи складають кінематику руки робота, кількість ступенів рухомості, які дозволяють змінювати орієнтацію деталі без зміни положення кінця руки відносяться до кінематики кисті. В результаті розподілу запропонована формула, яка описує кінематичні схеми ПР з урахуванням запропонованих кінематичних груп:

$$N = N_O + N_P + N_K, \tag{2.2}$$

або

$$5...7 = (0...1)_0 + (2...3)_P + (1...3)_K, \tag{2.3}$$

де 5...7 — загальна кількість ступенів рухомості робота;

$(0...1)_0$ — кількість ступенів рухомості основи робота;

$(2...3)_P$ — кількість ступенів рухомості руки робота;

$(1...3)_K$ — кількість ступенів рухомості кисті робота.

Аналогічно до формули 2.1 можна визначити кількість варіантів кінематичних схем по кожній структурній групі:

$$M = M_O \cdot M_P \cdot M_K, \tag{2.4}$$

де $M_O = 1^{N_v} * 2^{N_v} * 4^{N_v}$ — кількість варіантів кінематичних схем основи робота;

$M_P = 2^{N_v} * 2^{N_v} * 4^{(N_v-1)}$ — кількість варіантів кінематичних схем руки робота;

$M_K = 2^{N_v} * 2^{N_v} * 4^{N_v}$ — кількість варіантів кінематичних схем кисті робота.

Всі ці формули (як і всі подальші) мають місце при використанні кінематичних пар п’ятого класу, які найбільш широко використовуються в ПР.

З рівняння (2.3) видно, що максимальна кількість ступенів рухомості по кожній окремій структурній групі дорівнює трьом. Тому найбільший інтерес являє тільки та частина табл. 2.1, де $N_V \leq 3$, яку для зручності можна перенести в окрему таблицю (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Кількість варіантів кінематичних схем промислових роботів при умові використання кінематичних пар п'ятого класу

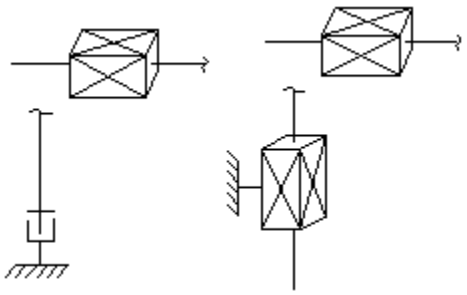
Умови визначення варіантів	Кількість ступенів рухомості N_V	
	Кількість варіантів М	
За видом використовуємих рухів в кінематичних парах (П,О) та порядком їх розміщення: $M = 2^{N_V}$, загальна кількість варіантів:	4	8
Тільки "П" варіанти	1	1
Тільки "О" варіанти	1	1
Комбіновані варіанти, загальна кількість:	2	6
в т.ч. (N-1)"П"+1"О"	2	3
(N-2)"П"+2"О"	—	3
За видом конструкційного виконання кінематичних пар: $M = 2^{N_V}$	4	8
За напрямком руху сусідніх пар: $M = 4^{(N_V-1)}$	4	16
Загальна кількість варіантів для пар п'ятого класу	64	1024

В результаті ми отримуємо обмежену кількість варіантів кінематичних схем роботів для подальшого розгляду. Але це все ж велика кількість варіантів, тому слід й надалі шукати шляхи зменшення їх кількості. З загального числа кінематичних схем не всі являють інтерес до подальшого аналізу чи реалізації на практиці тому, що одні варіанти виявляються більш доцільні за інші. Отже одним з напрямків проведених досліджень з оптимізації є розподіл варіантів схем структурної будови за ступеню доцільності. За цим критерієм запропоновано розділити варіанти КС на п'ять груп :

1. Нереалізуємі варіанти (НР);
2. Недоцільні варіанти (НД);
3. Малодоцільні варіанти (МД);
4. Непрактичні варіанти (НП);
5. Найбільш придатні варіанти до реалізації на практиці чи подальшого аналізу (ПВ).

Розглянемо ці типи варіантів та принцип утворення формул для підрахунку їх кількості:

1. Нереалізуємі конструктивні схеми промислових роботів – такі варіанти КС, які неможливо виконати конструктивно. Наприклад: схеми типу О Х П (рис. 2.1, а), П Х П (рис. 2.1, б) та ін.



а) б)

Рисунок 2.1 – Нереалізуємі конструктивні схеми промислових роботів

Формула для визначення кількості нереалізуемих варіантів:

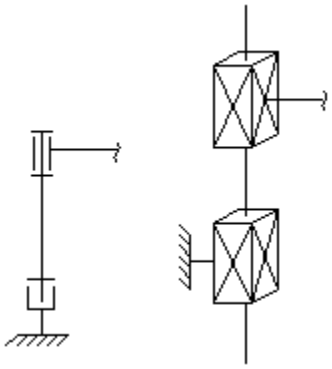
$$M_{HP_2} = 2^{N_V} * 2^{(N_V-1)} * 1^{(N_V-1)}, \quad (2.5)$$

де перший множник – 2^{N_V}, в нереалізуемих КС використовуються обидва види руху та всі варіанти їх сполучень;

другий множник – $2^{(N_V-1)}$, в нереалізуемих КС “вигнута” ланка використовуються тільки вкінці структурної формули;

третій множник – $1^{(N_V-1)}$, в нереалізуемих КС використовуються тільки перехресний вид руху сусідніх пар (Х);

2. Недоцільні варіанти конструктивні схеми промислових роботів – такі КС, які складаються з кінематичних пар однакового виду руху і мають напрямок руху між собою паралельний (||) або співвісний (|). Наприклад: схеми типу О | О’ (рис. 2.2, а), П | П’ (рис.2.2, б) та ін.



а) б)

Рисунок 2.2 – Недоцільні варіанти конструктивні схеми промислових роботів

Формула для визначення кількості недоцільних варіантів :

$$M_{НД_2} = [2^{(N_V-1)} * 2^{N_V} * 2^{(N_V-1)}] - 1, \quad (2.6)$$

де перший множник – $2^{(N_V-1)}$, в недоцільних КС використовуються обидва види руху але сполученя тільки однотипних видів руху ;

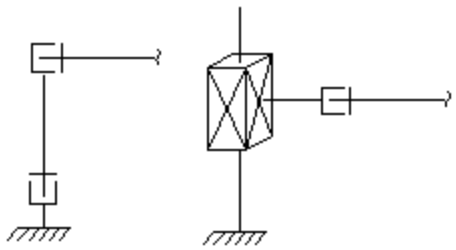
другий множник – 2^{N_V},в недоцільних КС використовуються всі види конструктивного виконання кінематичних пар;

третій множник – $2^{(N_V-1)}$,в недоцільних КС використовуються тільки паралельний та співісний види руху сусідніх пар (|| , |);

“- 1” – виняток складає кінематична схема виконана за структурною формулою О’ || О’ , яка відноситься до найбільш придатних варіантів;

3. Малодоцільні варіанти конструктивні схеми промислових роботів – такі КС, які мають кінематичну пару “О” вкінці.

Наприклад : схеми типу О ⊥ О (рис. 2.3, а), П’ ⊥ О (рис. 2.3, б) та ін.



а) б)

Рисунок 2.3 – Малодоцільні варіанти конструктивні схеми промислових роботів

Формула для визначення кількості малодоцільних варіантів:

$$M_{МД_2} = [2^{(N_V-1)} * 2^{(N_V-1)} * 4^{(N_V-1)}] - 2 - 4 + 1, \qquad (2.7)$$

де перший множник – $2^{(N_V-1)}$, в малодоцільних КС використовуються обидва види руху але тільки сполучення, що закінчуються на кінематичну пару “О”;

другий множник – $2^{(N_V-1)}$, в малодоцільних КС “вигнута” ланка використовуються тільки на початку структурної формули;

третій множник – $4^{(N_V-1)}$, в малодоцільних КС використовуються всі види руху сусідніх пар (Х , ⊥ , || , |);

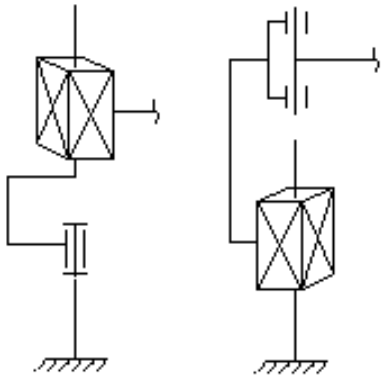
“–2” – виняток складають кінематичні схеми : П Х О та О Х О , які вже були визначені раніш як нереалізуємі;

“–4” – виняток складають кінематичні схеми О | О, О || О, О’ || О та О’ | О, які вже були визначені раніш як недоцільні;

“+1” – виняток складає кінематична схема О | П, яка теж відноситься до групи малодоцільних варіантів;

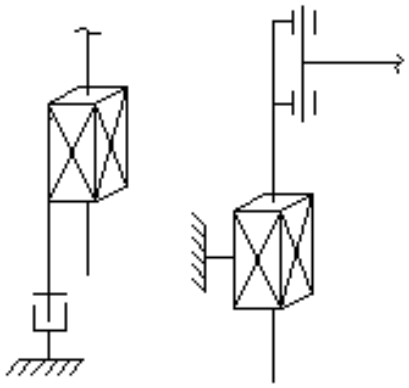
4. Непрактичні конструктивні схеми промислових роботів – такі КС, які можливо виконати конструктивно, але їх виконання потребує використання складних кінематичних пар, що їх можна замінити більш простими ланками без втрати сенсу.

Наприклад : схеми типу О′ | П′ (рис. 2.4 , а), П′ | О′ (рис. 2.4, б), О || П (рис. 2.5, а), П || О′ (рис. 2.5, б) та ін.



а) б)

Рисунок 2.4 – Непрактичні конструктивні схеми промислових роботів



а) б)

Рисунок 2.5 – Непрактичні конструктивні схеми промислових роботів

Формула для визначення кількості непрактичних варіантів:

$$M_{НП_2} = 2^{N_V} * 2^{(N_V-1)} * 2^{(N_V-1)} - 8 - 2, \qquad (2.8)$$

де перший множник – 2^{N_V}, в непрактичних КС використовуються обидва види руху та всі варіанти їх сполучень;

другий множник – $2^{(N_V-1)}$, в непрактичних КС "вигнута" ланка використовуються тільки на початку;

третій множник – $2^{(N_V-1)}$, в непрактичних КС використовуються два види руху сусідніх пар: співвісний та паралельний (|, ||);

"–8" – виняток складають кінематичні схеми П || П, П || П′, О || О, О || О', П′ | П, П′ | П′, О′ | О, О′ | О', які відносяться до недоцільних варіантів ;

"– 2" – виняток складають кінематичні схеми П || О та П' | О, які вже були визначені раніш як малодоцільні.

Всі виведенні формули зводимо до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Формули для визначення кількості варіантів кінематичних схем ПР по групах доцільності (при кількості ступенів рухомості $N_V = 2$)

Код групи доцільності	Формули для обчислення кількості варіантів	Кількість варіантів
$НР_2$	$M_{НР_2} = 2^{N_V} * 2^{(N_V-1)} * 1^{(N_V-1)}$	8
$НД_2$	$M_{НД_2} = [2^{(N_V-1)} * 2^{N_V} * 2^{(N_V-1)}] - 1$	15
$МД_2$	$M_{МД_2} = [2^{(N_V-1)} * 2^{(N_V-1)} * 4^{(N_V-1)}] - 2 - 4 + 1$	11
$НП_2$	$M_{НП_2} = [2^{N_V} * 2^{(N_V-1)} * 2^{(N_V-1)}] - 8 - 2$	6
$ПВ_2$	$M_{ПВ_2} = M_{Заг_2} - [M_{НР_2} + M_{НД_2} + M_{МД_2} + M_{НП_2}]$	24

2.2 Розробка програми для кількісного аналізу варіантів будови промислових роботів

Програма для кількісного аналізу варіантів кінематичних схем промислових роботів наведена нижче [24]. Результат роботи якої — структурні формули варіантів кінематичних схем по групам доцільності на прикладі кінематичних схем з $N_V = 2$ наведено після неї.

```
'OPEN "d:\******\***.dat" FOR OUTPUT AS #1
CLS
REDIM A$(4, 4), B$(4), C$(8, 8), D1$(8, 8), D2$(8, 8)
Dim D3$(8, 8), D4$(8, 8), V1$(8), V2$(15), V3$(11), V4$(6)

A$(1, 1) = "П" + "⊥": A$(1, 2) = "П'" + "⊥"
A$(1, 3) = "О" + "⊥": A$(1, 4) = "О'" + "⊥"
A$(2, 1) = "П" + "Х": A$(2, 2) = "П'" + "Х"
A$(2, 3) = "О" + "Х": A$(2, 4) = "О'" + "Х"
A$(3, 1) = "П" + "||": A$(3, 2) = "П'" + "||"
A$(3, 3) = "О" + "||": A$(3, 4) = "О'" + "||"
A$(4, 1) = "П" + "|": A$(4, 2) = "П'" + "|"
A$(4, 3) = "О" + "|": A$(4, 4) = "О'" + "|"

DATA П, П', О, О'
    FOR I = 1 TO 4
    READ B$(I)
    NEXT

'Нереалізуємі варіанти — 8
V1$(1) = "П" + "Х" + "П"
V1$(2) = "П" + "Х" + "О"
V1$(3) = "П" + "Х" + "П'"
V1$(4) = "П" + "Х" + "О'"
V1$(5) = "О" + "Х" + "П"
V1$(6) = "О" + "Х" + "П'"
V1$(7) = "О" + "Х" + "О"
V1$(8) = "О" + "Х" + "О'"

'Недоцільні варіанти — 15
V2$(1) = "П" + "|" + "П"
V2$(2) = "П" + "|" + "П'"
V2$(3) = "П" + "||" + "П"
V2$(4) = "П" + "||" + "П'"
V2$(5) = "П'" + "||" + "П"
V2$(6) = "П'" + "||" + "П'"
V2$(7) = "П'" + "|" + "П"
V2$(8) = "П'" + "|" + "П'"
V2$(9) = "О" + "|" + "О"
V2$(10) = "О" + "|" + "О'"
V2$(11) = "О" + "||" + "О"
V2$(12) = "О" + "||" + "О'"
V2$(13) = "О'" + "||" + "О"
V2$(14) = "О'" + "|" + "О"
V2$(15) = "О'" + "|" + "О'"
'Малодоцільні варіанти — 11
V3$(1) = "П" + "||" + "О"
V3$(2) = "П" + "|" + "О"
V3$(3) = "П" + "⊥" + "О"
V3$(4) = "П'" + "||" + "О"
V3$(5) = "П'" + "|" + "О"
```

```
V3$(6) = "П'" + "⊥" + "О"
V3$(7) = "П'" + "Х" + "О"
V3$(8) = "О" + "⊥" + "О"
V3$(9) = "О'" + "⊥" + "О"
V3$(10) = "О'" + "Х" + "О"
V3$(11) = "О" + "|" + "П"

'Непрактичні варіанти — 6
V4$(1) = "П" + "||" + "О'"
V4$(2) = "О" + "||" + "П"
V4$(3) = "О" + "||" + "П'"
V4$(4) = "П'" + "|" + "О'"
V4$(5) = "О'" + "|" + "П"
V4$(6) = "О'" + "|" + "П'"

FOR I = 1 TO 4
        FOR J = 1 TO 4
        C$(I, J) = A$(1, I) + B$(J)
        C$(I, J + 4) = A$(2, I) + B$(J)
        C$(I + 4, J) = A$(3, I) + B$(J)
        C$(I + 4, J + 4) = A$(4, I) + B$(J)
        NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO 8
        FOR J = 1 TO 8
        D1$(I, J) = C$(I, J)
            FOR k = 1 TO 8
IF C$(I, J) = V1$(k) THEN D1$(I, J) = "—"
            NEXT k
        NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO 8
        FOR J = 1 TO 8
        D2$(I, J) = D1$(I, J)
            FOR k = 1 TO 15
IF D1$(I, J) = V2$(k) THEN D2$(I, J) = "—"
            NEXT k
        NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO 8
        FOR J = 1 TO 8
        D3$(I, J) = D2$(I, J)
            FOR k = 1 TO 11
IF D2$(I, J) = V3$(k) THEN D3$(I, J) = "—"
            NEXT k
        NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO 8
        FOR J = 1 TO 8
        D4$(I, J) = D3$(I, J)
            FOR k = 1 TO 6
IF D3$(I, J) = V4$(k) THEN D4$(I, J) = "—"
            NEXT k
        NEXT J
NEXT I
PRINT #1,"Нереалізуємі варіанти (НР)"
PRINT " Нереалізуємі варіанти (НР)"
        FOR I = 1 TO 8
        PRINT #1, V1$(I); "     ";
        PRINT V1$(I); "     ";
        NEXT I
        PRINT #1, : PRINT
PRINT #1, “Недоцільні варіанти (НД)”
PRINT Недоцільні варіанти (НД)"
        FOR I = 1 TO 15
        PRINT #1, V2$(I); "     ";
        PRINT V2$(I); "     ";
        NEXT I
        PRINT #1, : PRINT
PRINT #1,”Малодоцільні варіанти (МД)"
PRINT " Малодоцільні варіанти (МД)"
        FOR I = 1 TO 11
        PRINT #1, V3$(I); "     ";
        PRINT V3$(I); "     ";
        NEXT I
        PRINT #1, : PRINT
PRINT #1, "Непрактичні варіанти (НП)"
```

```
    PRINT " Непрактичні варіанти (НП)”
            FOR I = 1 TO 6
            PRINT #1, V4$(I); "     ";
            PRINT V4$(I); "     ";
            NEXT I
            PRINT #1, : PRINT
    PRINT #1,"Найбільш придатні варіанти
    (НпВ)"
    PRINT "Найбільш придатні варіанти (НпВ)"
            FOR I = 1 TO 8
CLOSE #1
END
```

```
PRINT #1, USING "\  \";
PRINT USING "\  \";
FOR J = 1 TO 8
PRINT #1, USING "\     \"; D4$(I, J);
PRINT USING "\      \"; D4$(I, J);
NEXT J
PRINT #1,
PRINT
NEXT I
```

Структурні формули кінематичних схем промислових роботів з кількістю ступенів рухомості $N_V = 2$:

Нереалізуємі варіанти (НР): — 8 варіантів

П Х	П Х	П Х	П Х	О Х	О Х	О Х	О Х
П	О	П′	О′	П	П′	О	О′

Недоцільні варіанти (НД): — 15 варіантів

П || П	П || П′	П | П	П | П′	П′ || П	П′ || П′
О || О	О || О′	О | О	О | О′	О′ || О	
П′ | П	П′ | П′	О′ | О	О′ | О′		

Малодоцільні варіанти (МД): — 11 варіантів

П || О	П | О	П ⊥ О	П′ || О	П′ | О	П′ ⊥ О
П′ Х О	О ⊥ О	О′ ⊥ О	О′ Х О	О | П	

Непрактичні варіанти (НП): — 6 варіантів

П || О′	О || П	О || П′	П′ | О′	О′ | П	О′ | П′

Варіанти, найбільш придатні варіанти до реалізації на практиці чи подальшого аналізу (ПВ): — 24 варіанта

П ⊥ П	П ⊥ П′	—	П ⊥ О′	—	—	—	—
П′ ⊥ П	П′ ⊥ П′	—	П′ ⊥ О′	П′ Х П	П′ Х П′	—	П′ Х О′
О ⊥ П	О ⊥ П′	—	О ⊥ О′	—	—	—	—
О′ ⊥ П	О′ ⊥ П′	—	О′ ⊥ О′	О′ Х П	О′ Х П′	—	О′ Х О′
—	—	—		—	—	—	П | О′
—	—	—	П′ || О′	—	—	—	—
—	—	—	—	—	О | П′	—	—
О′ || П	О′ || П′	—	О′ || О′	—	—	—	—

2.3 Аналіз можливих варіантів будови промислових роботів

Матриці визначення чисельного значення множників у формулах кількості варіантів за групами доцільності наведені нижче.

1. Кількість ступенів рухомості кінематичних схем $N_V = 2$.

Таблиця 2.4 – Перший множник – варіанти кінематичних схем за видом руху та сполученням кінематичних пар

Варіанти КС	Варіанти КС ПР за ступінню доцільності				
	НР	НД	МД	НП	ПВ
П П	+	+	-	+	+
П О	+	-	+	+	+
О П	+	-	-*	+	+
О О	+	+	+	+	+

Таблиця 2.5 – Другий множник – варіанти кінематичних схем за конструктивним виконанням кінематичних пар

Варіанти КС	Варіанти КС ПР за ступінню доцільності				
	НР	НД	МД	НП	ПВ
1	2	3	4	5	6
П П	+	+	Х	Х	+
П' П	-	+	Х	Х	+
П П'	+	+	Х	Х	+
П' П'	-	+	Х	Х	+
П О	+	Х	+	+	-
П' О	-	Х	+	+	-
П О'	+	Х	-	-	+
П' О'	-	Х	-	-	+
О П	+	Х	Х	Х	+
О' П	-	Х	Х	Х	+
О П'	+	Х	Х	Х	+
О' П'	-	Х	Х	Х	+
О О	+	+	+	+	-
О' О	-	+	+	+	-
О О'	+	+	-	-	+
О' О'	-	+ *	-	-	+

Примітки: “Х” – неможливість навіть теоретичного існування варіанту.

* – можливість існування виняткової КС (наприклад: О' || О' , О | П).

Таблиця 2.6 – Третій множник – варіанти кінематичних схем за онструктивним виконанням кінематичних пар за напрямком руху сусідніх кінематичних пар

Варіанти КС	Варіанти КС ПР за ступінню доцільності				
	НР	НД	МД	НП	ПВ
⊥	-	-	+	-	+
Х	+	-	+	-	+
| (||)	-	+	+	+	+

2. Кількість ступенів рухомості КС N_V = 3. (матриці на прикладі утворення недоцільних варіантів)

Таблиця 2.7 – Перший множник – варіанти кінематичних схем за видом руху та сполученням кінематичних пар

Варіанти КС	Варіанти КС ПР за ступінню доцільності					
	$НД_2$– $НР_2$	$НД_2$ – $НД_2$	$НД_2$ – $МД_2$	$НД_2$ – $НП_2$	$НД_2$ – $ПВ_2$	$ПВ_2$ – $НД_2$
П П П	+	+	-	-	+	+
П П О	+	-	+	+	+	-
П О П	-	-	-	-	-	-
О П П	-	-	-	-	-	+
П О О	-	-	-	-	-	+
О П О	-	-	-	-	-	-
О О П	+	-	-	-	+	-
О О О	+	+	+	+	+	+

Таблиця 2.8 – Другий множник – варіанти кінематичних схем за конструктивним виконанням кінематичних пар

Варіанти КС	Варіанти КС ПР за ступінню доцільності					
	$НД_2$– $НР_2$	$НД_2$ – $НД_2$	$НД_2$ – $МД_2$	$НД_2$ – $НП_2$	$НД_2$ – $ПВ_2$	$ПВ_2$ – $НД_2$
П П О	+	Х	+	+	-	Х
П' П О	+	Х	+	+	-	Х
П П' О	-	Х	+	+	-	Х
П П О'	+	Х	-	-	+	Х
П' П' О	-	Х	+	+	-	Х
П' П О'	+	Х	-	-	+	Х
П П' О'	-	Х	-	-	+	Х
П' П' О'	-	Х	-	-	+	Х
О О П	+	Х	Х	Х	+	Х
О' О П	+	Х	Х	Х	+	Х
О О' П	-	Х	Х	Х	+	Х
О О П'	+	Х	Х	Х	+	Х
О' О' П	-	Х	Х	Х	-	Х
О' О П'	+	Х	Х	Х	+	Х
О О' П'	-	Х	Х	Х	+	Х
О' О' П'	-	Х	Х	Х	-	Х
О О О	+	+	+	+	-	-
О' О О	+	+	+	+	-	-
О О' О	-	+	+	+	-	+
О О О'	+	+	-	-	+	-
О' О' О	-	+	+	+	-	+
О' О О'	+	+	-	-	+	-
О О' О'	-	+	-	-	+	+
О' О' О'	-	+	-	-	+	+

При подальшому аналізі структурних формул маніпуляторів промислових роботів з кількістю ступенів рухомості $N_V = 3$ слід зауважити, що СФ КС маніпуляторів з трьома ступенями рухомості можна розділити умовно на дві частини, які являють собою структурні формули КС при $N_V = 2$. Причому ці структурні формули (з $N_V = 2$) можуть відноситися до різних груп доцільності.

Наприклад: структурна формула маніпулятора з $N_V = 3$ – ОХП|П′ відноситься до групи нереалізуємих варіантів ($НР_3$) і складається з двох формул при $N_V = 2$: ОХП та П|П′; перша структурна формула відноситься до групи нереалізуємих варіантів ($НР_2$ при $N_V = 2$), а друга — до групи недоцільних варіантів ($НД_2$ при $N_V = 2$). Тому групи доцільності варіантів КС маніпуляторів з $N_V = 3$ розподілюються за різними сполученнями варіантів КС маніпуляторів з $N_V = 2$.

Ці сполучення наведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Групи доцільності варіантів структурної будови промислових роботів та їх сполучення

Групи доцільності варіантів КС роботів при кількості ступенів рухомості $N_V = 3$				
$НР_3$	$НД_3$	$МД_3$	$НП_3$	$ПВ_3$
Сполучення відповідних груп доцільності варіантів конструктивних схем роботів при кількості ступенів рухомості $N_V = 2$				
$НР_2 – НР_2$	$НД_2 – НР_2$	$МД_2 – НР_2$	$НП_2 – НР_2$	–
$НР_2 – НД_2$	$НД_2 – НД_2$	$МД_2 – НД_2$	$НП_2 – НД_2$	–
$НР_2 – МД_2$	$НД_2 – МД_2$	$МД_2 – МД_2$	$НП_2 – МД_2$	–
$НР_2 – НП_2$	$НД_2 – НП_2$	$МД_2 – НП_2$	$НП_2 – НП_2$	–
$НР_2 – ПВ_2$	$НД_2 – ПВ_2$	–	$НП_2 – ПВ_2$	$ПВ_2 – ПВ_2$
$ПВ_2 – НР_2$	$ПВ_2 – НД_2$	$ПВ_2 – МД_2$	$ПВ_2 – НП_2$	$МД_2 – ПВ_2$

Проведений аналіз показав, що придатними до наступного розгляду чи реалізації на практиці є тільки варіанти з останнього стовпчика.

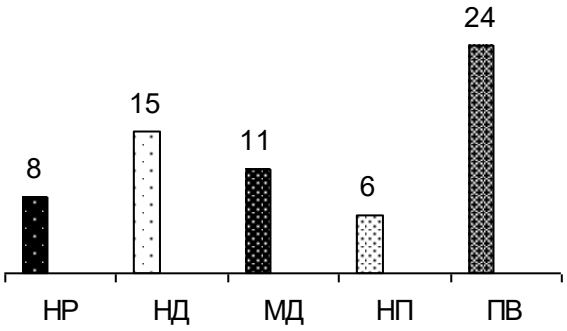
За методикою визначення ступеня доцільності варіантів структурної будови та за аналогією з вищенаведеними формулами виведені відповідні формули для визначення кількості варіантів по групах доцільності, (при кількості ступенів рухомості $N_V = 3$) які наведені в таблиці 2.10.

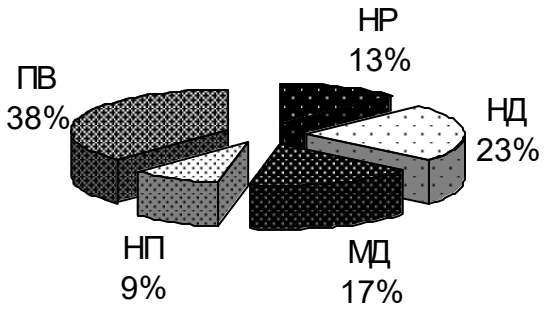
Таблиця 2.10 – Формули для визначення кількості варіантів кінематичних схем промислових роботів по групах доцільності (при кількості ступенів рухомості $N_V = 3$)

Позначення групи доцільності		Формули для обчислення кількості варіантів М	М
$НР_3$	$НР_2 – ХХ_2$	$M_{НР_2-ХХ_2} = 2^{N_V} * 2^{(N_V-1)} * [1^{(N_V-2)} * 4^{(N_V-2)}]$	156
	$ПВ_2 – НР_2$	$M_{ПВ_2-НР_2} = 2^{(N_V-1)} * 2^{(N_V-1)} * [3^{(N_V-2)} * 1^{(N_V-2)}] - 20$	
$НД_3$	$НД_2 – ХХ_2$	$M_{НД_2-ХХ_2} = 2^{(N_V-1)} * 2^{N_V} * [2^{(N_V-2)} * 4^{(N_V-2)}] - 16$	327
	$ПВ_2 – НД_2$	$M_{ПВ_2-НД_2} = 2^{(N_V-1)} * 2^{(N_V-1)} * [3^{(N_V-2)} * 2^{(N_V-2)}] - 9$	
$МД_3$	$МД_2 – ХХ_2$	$M_{МД_2-ХХ_2} = 2^{(N_V-1)} * 2^{(N_V-1)} * [4^{(N_V-2)} * 4^{(N_V-2)}] - 124$	203
	$ПВ_2 – МД_2$	$M_{ПВ_2-МД_2} = 2^{(N_V-1)} * 2^{(N_V-1)} * [3^{(N_V-2)} * 4^{(N_V-2)}] - 25$	
$НП_3$	$НП_2 – ХХ_2$	$M_{НП_2-ХХ_2} = 2^{N_V} * 2^{(N_V-1)} * [1^{(N_V-2)} * 4^{(N_V-2)}] - 32$	129
	$ПВ_2 – НП_2$	$M_{ПВ_2-НП_2} = 2^{(N_V-1)} * 2^{(N_V-1)} * [3^{(N_V-2)} * 1^{(N_V-2)}] - 15$	

Примітки: символ ХХ означає можливість наявності на його місці любої групи доцільності з таблиці 2.10, а числа, що відіймаються в формулах становлять винятки.

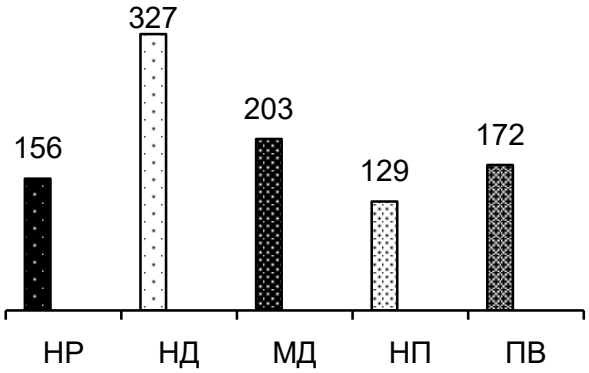
Кількість найбільш придатних варіантів для кінематичних схем маніпуляторів при $N_V = 3$ визначаємо як різницю між загальною кількістю варіантів та сумою груп непридатних варіантів. Результати аналізу графічно наведені на рис.2.6 та рис.2.7. Таким чином вже на першому етапі оптимізації (за критерієм доцільності) значно зменшилась кількість варіантів для подальшого розгляду.

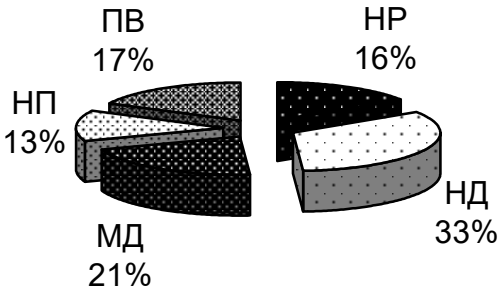




а) б)

Рисунок 2.6 – Кількість варіантів кінематичних схем ПР в залежності від ступеня їх доцільності (а) та частка груп доцільності в загальній кількості варіантів (б) при $N_V = 2$





а) б)

Рисунок 2.7 – Кількість варіантів кінематичних схем ПР в залежності від ступеню їх доцільності (а) та частка груп доцільності в загальній кількості варіантів (б) при $N_V = 3$

Провівши кількісний аналіз ми отримали можливість просто і в повному вигляді проводити якісний аналіз кінематичних схем промислових роботів.

3 ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ВАРІАНТІВ БУДОВИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

3.1 Аналіз варіантів кінематичних схем промислових роботів

Варіанти кінематичних схем маніпуляторів ПР (отримані в результаті кількісного аналізу), що складають групу найбільш придатних варіантів (ПВ) все ж таки представлені в значній кількості. Тому є сенс в подальшому групуванні цих варіантів структурної будови ПР. Розподіл таких варіантів проводився за приналежністю до різних систем координат та до різних робочих зон в межах кожної системи координат. Як зазначалося в [3,9] основний критерій за яким групувалися варіанти кінематичних схем – кількість в структурній формулі маніпулятора ПР різних видів руху (поступального “П” та обертального “О”). В таблиці 3.1 наведені основні види систем координат та можливі сполучення кінематичних пар, що утворюють ці системи.

Таблиця 3.1 – Види систем координат та сполучення видів руху для їх утворення

№ п/п	Назва системи координат	Сполучення видів руху в кінематичних парах
Кількість ступенів рухомості маніпулятора $N_V = 2$		
1	Прямокутна плоска	П П
2	Полярна плоска	П О ; О П
3	Ангулярна плоска	О О
Кількість ступенів рухомості маніпулятора $N_V = 3$		
1	Прямокутна	П П П
2	Циліндрична	П П О ; П О П ; О П П
3	Сферична	О О П ; О П О ; П О О
4	Ангулярна (кутова)	О О О

За допомогою розроблених алгоритмів та програм найбільш придатні варіанти розгруповуються по типах систем координат (СК), а в межах кожної СК по робочим зонам.

Діаграми по результатам роботи програм наведені на рисунках 3.1 та 3.2.

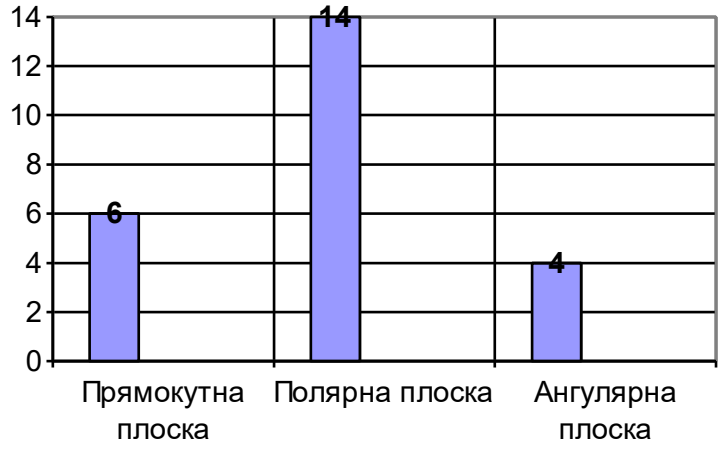


Рисунок 3.1 – Кількість варіантів кінематичних схем промислових роботів в залежності від типу систем координат при $N_V = 2$



Рисунок 3.2 – Кількість варіантів кінематичних схем промислових роботів в залежності від типа систем координат при $N_V = 3$

3.2 Аналіз робочих зон промислових роботів

Для розробки методики утворення робочих зон за основу було взято принцип утворення кінематичних схем наведений в [3,19]. Він полягає в тому, що маючи якусь кінематичну пару (КП) ми приєднуємо до неї з лівої сторони іншу КП з відповідним напрямком руху між ними – отримуємо кінематичну схему маніпулятора ПР з $N_V = 2$; потім приєднуючи до цієї кінематичної схеми наступну кінематичну пару (теж з лівої сторони) з відповідним напрямком руху між ними — отримаємо кінематичну схему маніпулятора з $N_V = 3$ і т.д.

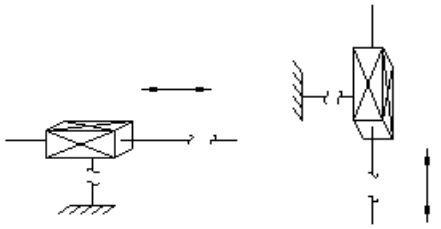
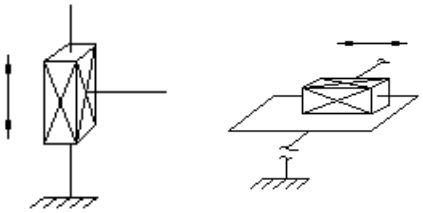
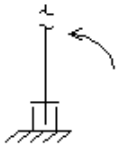
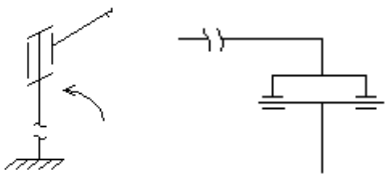
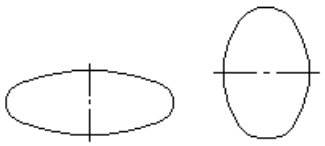
Отримати робочу зону наступного рівня можна векторно перемножуючи робочі зони кінематичних пар, що складають кінематичну схему. Робочі зони існуючих кінематичних пар (робочі зони першого рівня) наведені в таблиці 3.2; робочі зони кінематичних схем з $N_V = 2$ (робочі зони другого рівня) наведені в таблиці 3.3; робочі зони кінематичних схем з $N_V = 3$ (робочі зони третього рівня) наведені в таблиці 3.4. Можна виділити декілька типових кінематичних схем маніпуляторів ПР з $N_V = 2$, які відрізняються робочими зонами, тому розглянемо на прикладі принцип утворення цих зон:

а) кінематична схема П ⊥ П (табл. 3.2, а): при переміщенні робочої зони другої кінематичної пари — лінії (табл. 3.2, з) вздовж робочої зони першої кінематичної пари — лінії (табл. 3.2, і) отримуємо робочу зону у вигляді прямокутної площини (Пп) (табл. 3.3, з);

б) кінематична схема П | О′ (табл. 3.3, б): при переміщенні дуги (табл. 3.2, н) вздовж лінії (табл. 3.2, і) отримуємо робочу зону у вигляді циліндричної поверхні (Цп) (табл. 3.3, і);

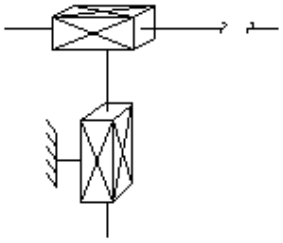
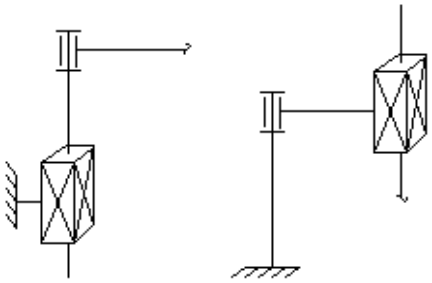
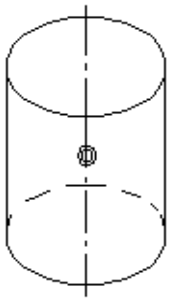
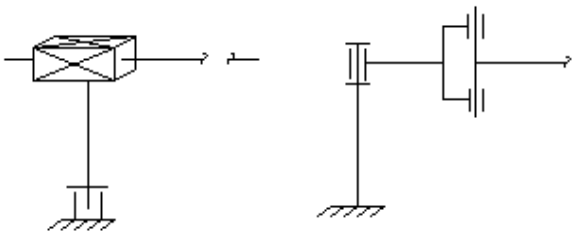
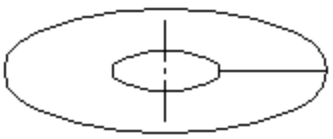
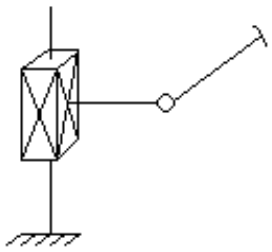
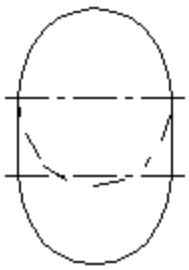
в) кінематична схема О ⊥ П (табл. 3.3, г): при переміщенні лінії (табл. 3.2, з) по дузі (табл. 3.2, н) отримуємо робочу зону у вигляді плоскої кільцевої поверхні (Пк) (табл. 3.3, к);

Таблиця 3.2 – Кінематичні пари які використовуються в промислових роботах та їх робочі зони

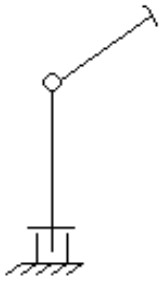
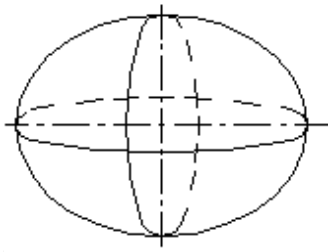
Кінематична пара	Приклад кінематичної схеми	Приклад робочої зони
П	 а) б)	 з) і)
П′	 в) г)	 к) л)
О	 д)	 м)
О′	 е) ж)	 н) о)

г) кінематична схема П′ Х О′ (табл. 3.3, е): при переміщенні дуги (табл. 3.2, н) вздовж лінії (табл. 3.2, і), причому лінія лежить в площині дуги, отримуємо робочу зону у вигляді плоскої кругової поверхні (Пкр) (табл. 3.3, л);

Таблиця 3.3 – Робочі зони, що утворюються кінематичними схемами маніпуляторів ПР з $N_V = 2$

Типові структурні формули	Приклад кінематичної схеми	Приклад робочої зони
1	2	3
П ⊥ П	 а)	 з)
П ⏐ О′ ; О′ ‖ П	 б) в)	 і)
О ⊥ П ; О′ ‖ О′	 г) д)	 к)
П′ Х О′	 е)	 л)

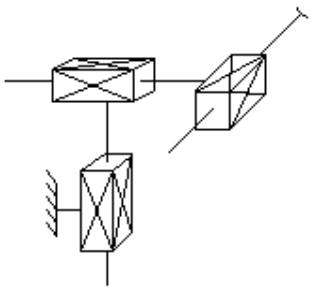
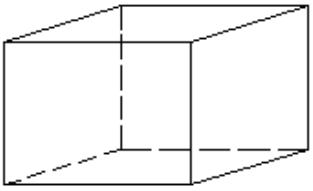
Продовження таблиці 3.3

1	2	3
О ⊥ О′	 ж)	 м)

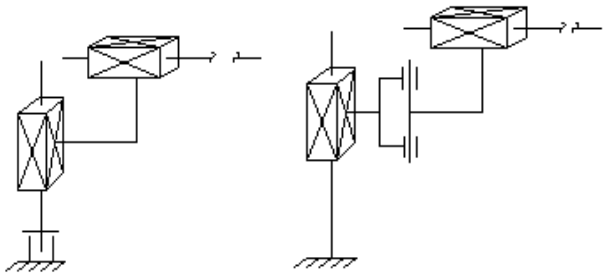
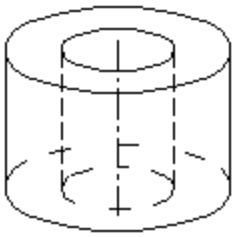
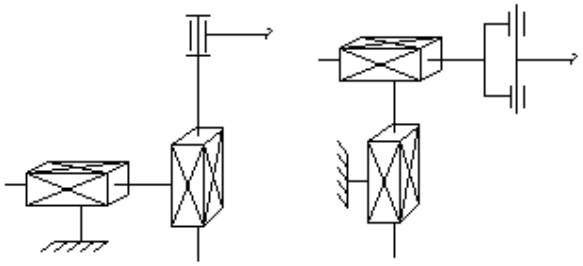
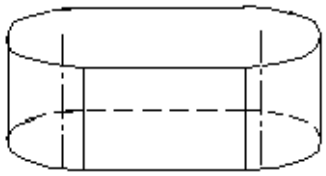
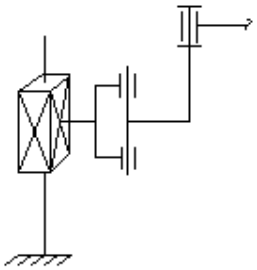
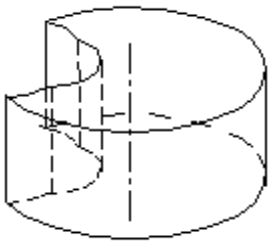
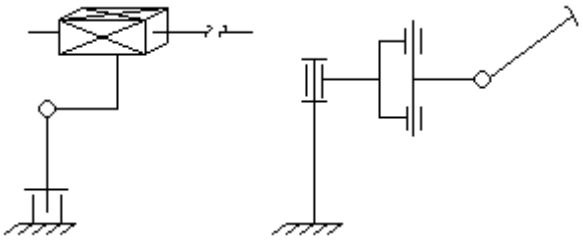
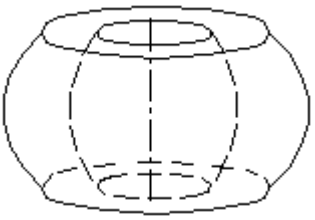
д) кінематична схема О ⊥ О′ (табл. 3.3, ж): при обертанні дуги, яка є робочою зоною другої КП (табл. 3.2, о) навколо центру дуги, яка є робочою зоною першої КП (табл. 3.2, н) отримуємо робочу зону КС у вигляді сферичної поверхні (Сп) (табл. 3.2, м).

За аналогічним принципом утворюються й робочі зони більш високого рівня. На основі запропонованої методики розроблено граф утворення робочих зон кінематичних схем маніпуляторів ПР який наведено в таблиці 3.4.

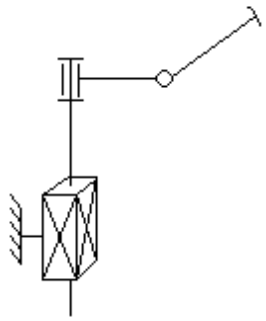
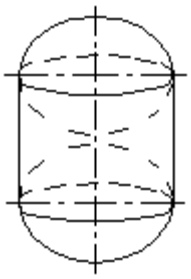
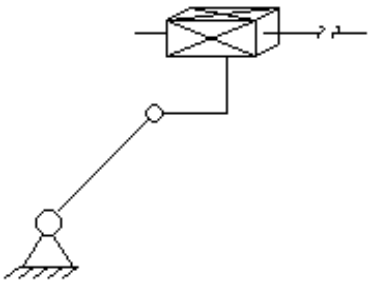
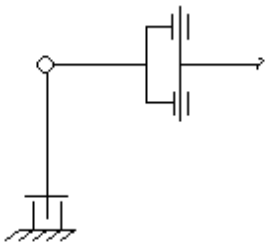
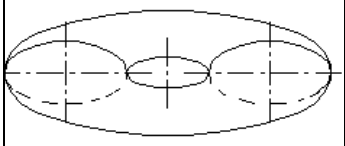
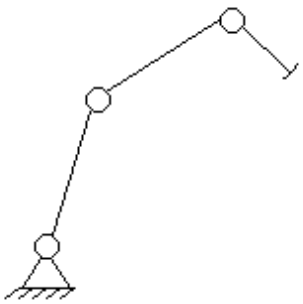
Таблиця 3.4 – Робочі зони, що утворюються кінематичними схемами маніпуляторів ПР з $N_V = 3$

Типові структурні формули	Приклад кінематичної схеми	Приклад робочої зони
1	2	3
П ⊥ П ⊥ П	 а)	 о)

Продовження таблиці 3.4

1	2	3
О | П′ ⊥ П ; П′ || О′ ⊥ П	 б) в)	 п)
П ⊥ П | О′ ; П ⊥ П ⊥ О′	 г) д)	 р)
П′ || О′ || О ′	 е)	 с)
О ⊥ О′ Х П; О′ || О′ Х О′	 ж) з)	 т)

Продовження таблиці 3.4

1	2	3
П | О′ Х О′	 і)	 у)
О′ || О′ Х П	 к)	 ф)
О ⊥ О′ Х О′	 л)	 х)
О′ || О′ || О′	 м)	 ч)

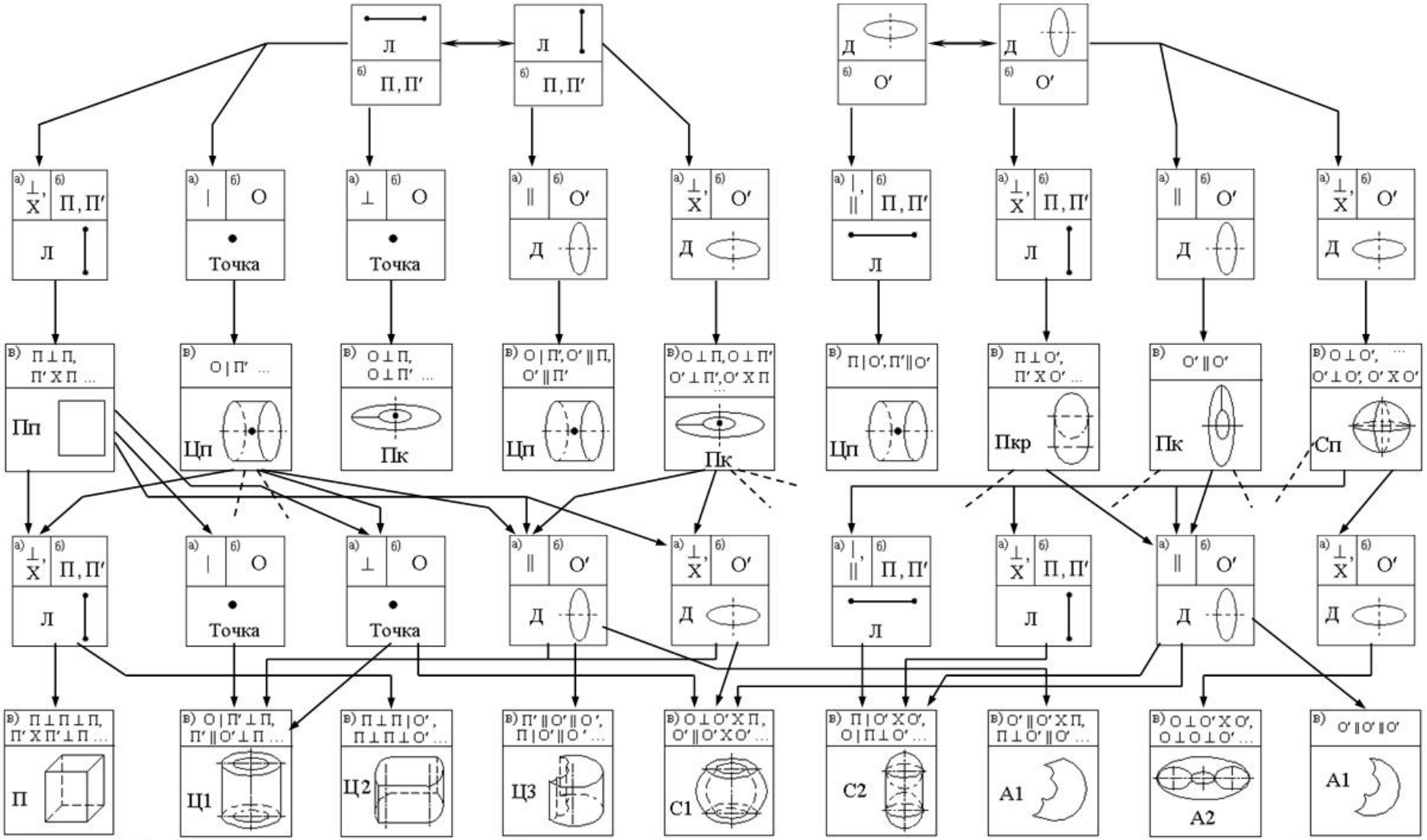


Рисунок 3.3 – Граф утворення структурних формул кінематичних схем модульних промислових роботів та їх робочих зон

Умовні позначення та скорочення для рис. 2.13:

- в ячейках під буквою а) показані позначення виду руху між сусідніми кінематичними парами (⊥ – перпендикулярний, Х – перехресний, || – паралельний, | – співвісний);
- в ячейках під буквою б) наведені позначення кінематичних пар, сполученням яких утворюється кінематична схема робота. Біля кінематичних пар показані їх робочі зони;
- в ячейках під буквою в) приведені приклади типових структурних формул кінематичних схем роботів.

Поряд показані їх робочі зони.

Позначення робочих зон першого рівня: Л — лінія; Д — дуга.

Позначення робочих зон другого рівня:

Пп — прямокутна площина;

Цп — циліндрична поверхня;

Пк — плоска кільцева поверхня;

Пкр — плоска кругова поверхня;

Сп — сферична поверхня.

Позначення робочих зон третього рівня :

П — прямокутний паралелепіпед;

Ц1 — полий циліндр з нерухомою віссю;

Ц2 — циліндр з рухомою віссю;

Ц3 — зрізаний циліндр;

С1 — зрізана сфера;

С2 — сфера з рухомою віссю;

А1 — кутова площина;

А2 — тор.

Стрілками показані шляхи утворення КС ПР та їх робочих зон.

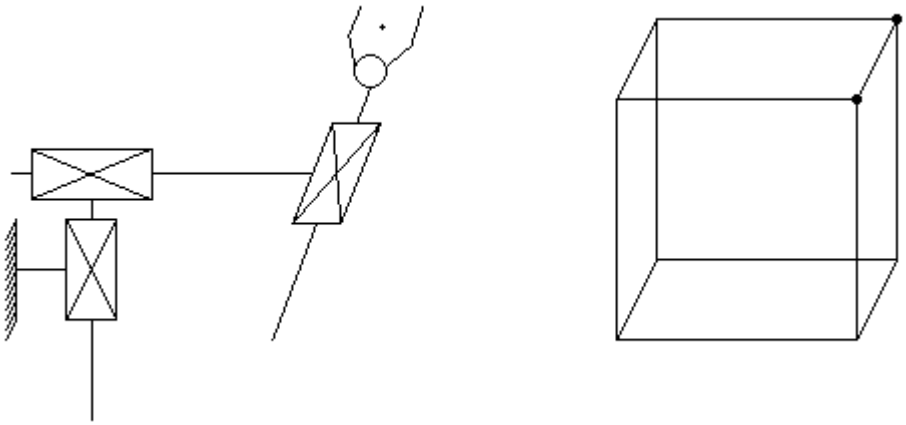
В результаті проведеного якісного аналізу кінематичних схем всі вони були розгруповані по системах координат, а в межах окремих систем координат по

робочим зонам, та визначена їх кількість по кожній групі. Для вирішення цих питань було розроблено відповідні блок-схеми та програми написані на мові QBasic.

Також розроблений пакет програм для ілюстрації принципу утворення кінематичних схем та їх робочих зон за структурною формулою [25-36].

Результат роботи програми побудови робочої зони за структурною формулою робота.

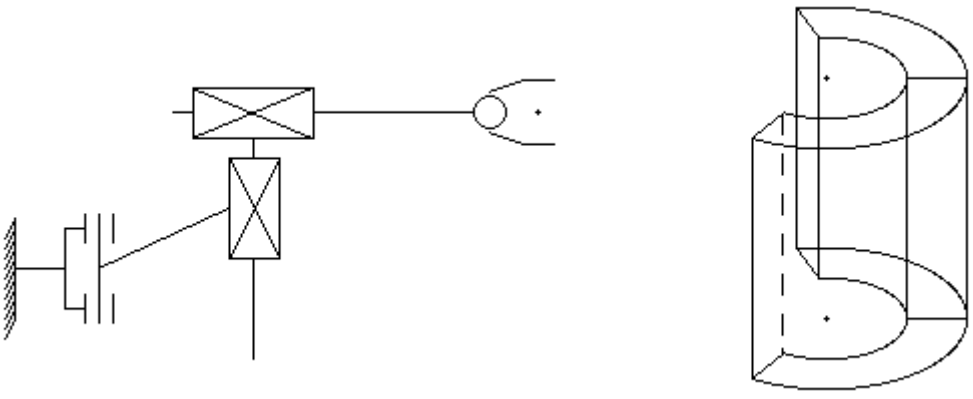
Прямокутна система координат



а) б)

Рисунок 3.4 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

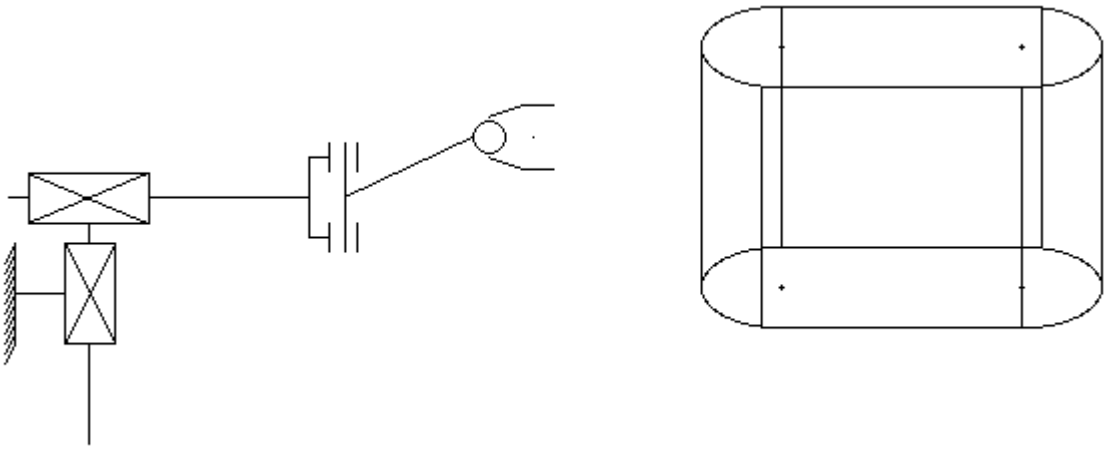
Циліндрична система координат



а) б)

Рисунок 3.5 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

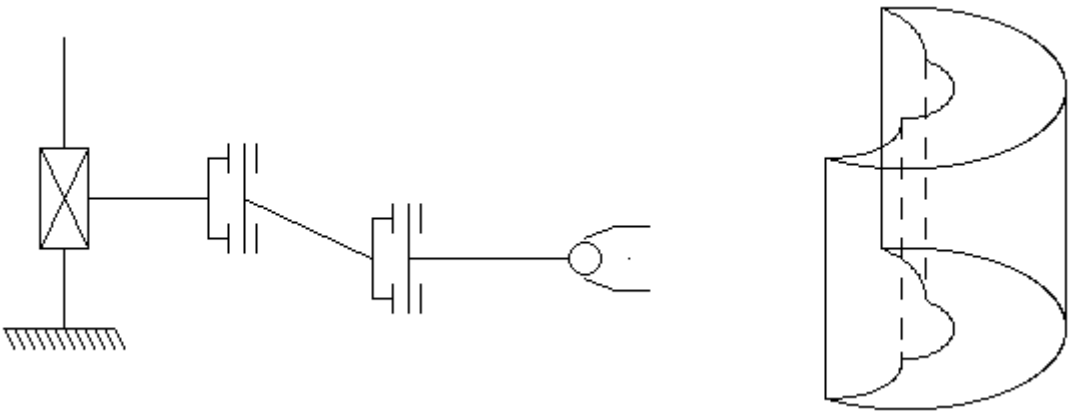
Циліндрична система координат



а) б)

Рисунок 3.6 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

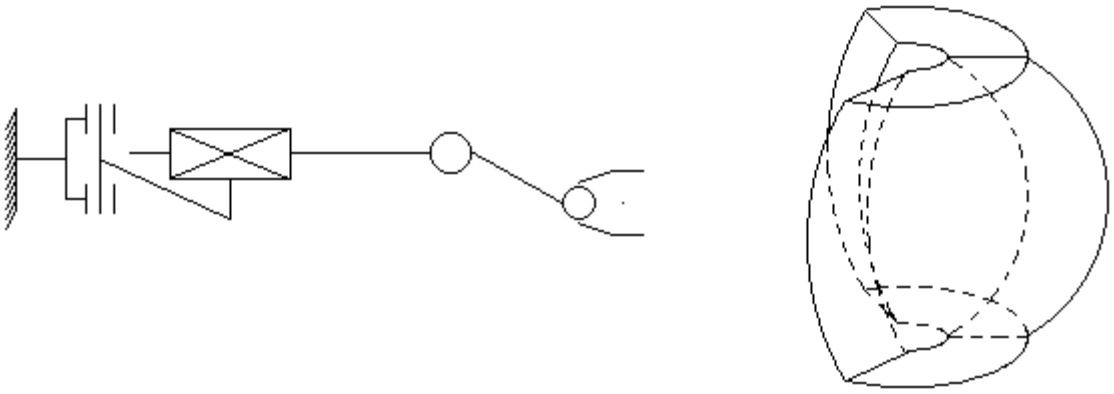
Циліндрична система координат



а) б)

Рисунок 3.7 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

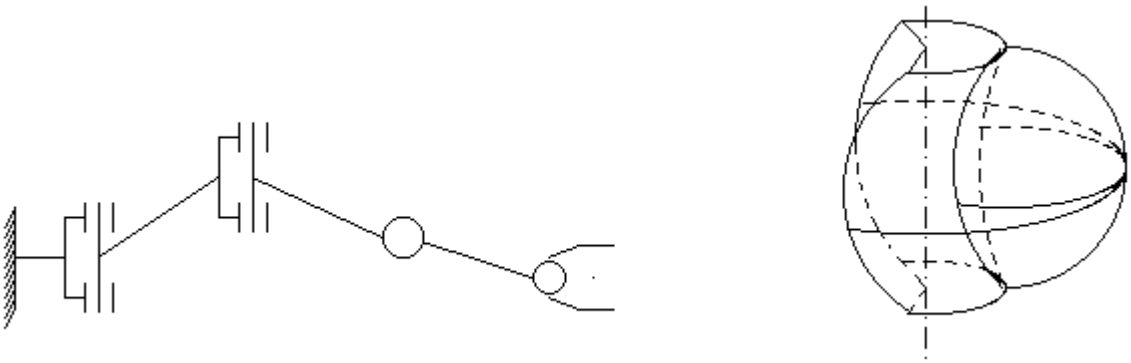
Сферична система координат



а) б)

Рисунок 3.8 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

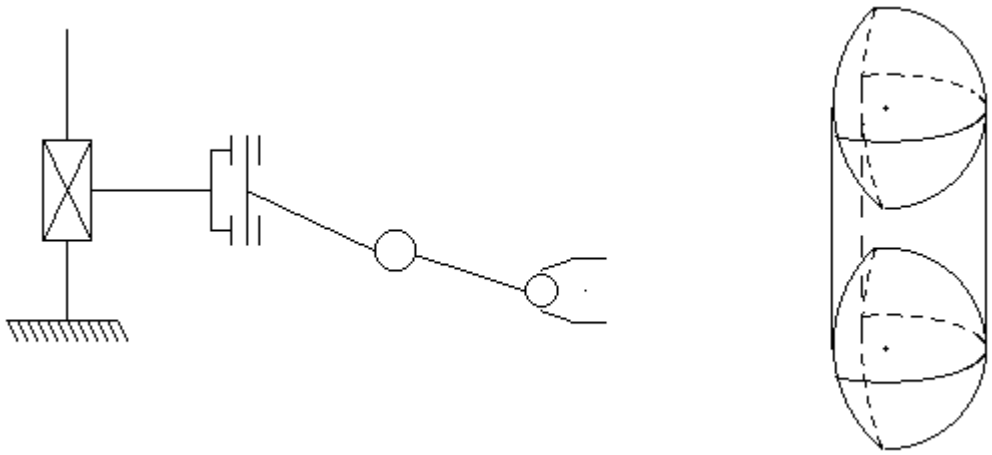
Сферична система координат



а) б)

Рисунок 3.9 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

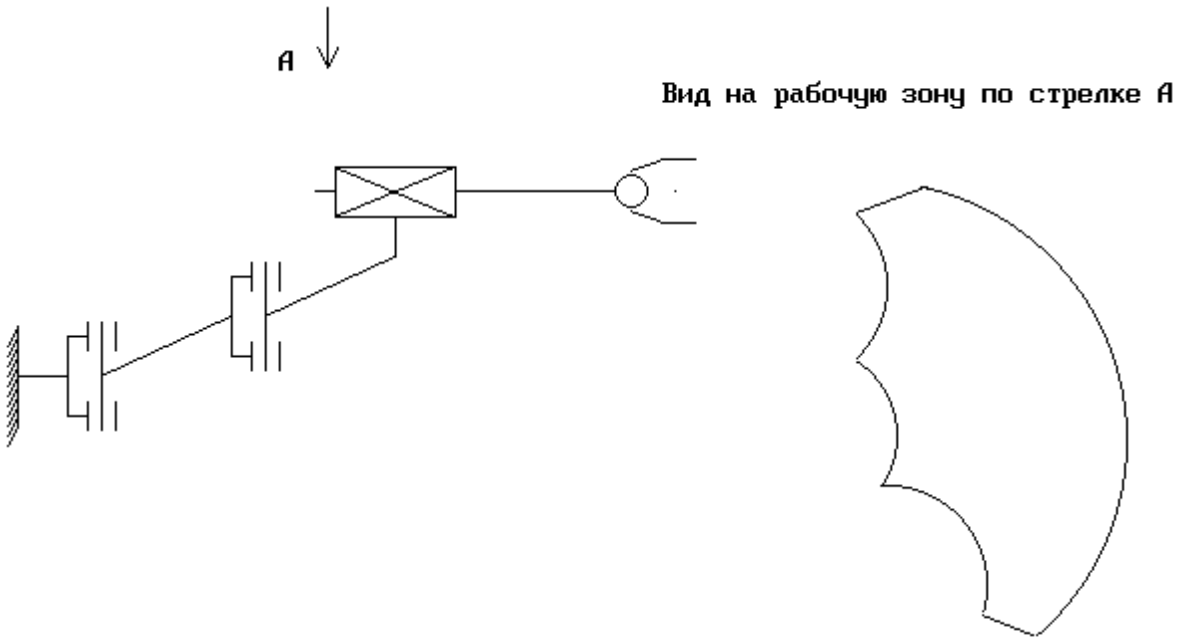
Сферична система координат



а) б)

Рисунок 3.10 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

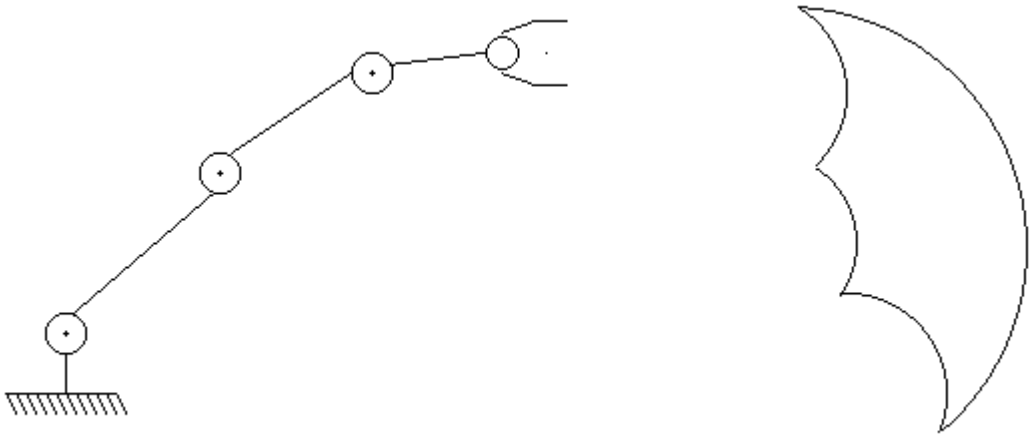
Ангулярна система координат



а) б)

Рисунок 3.11 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

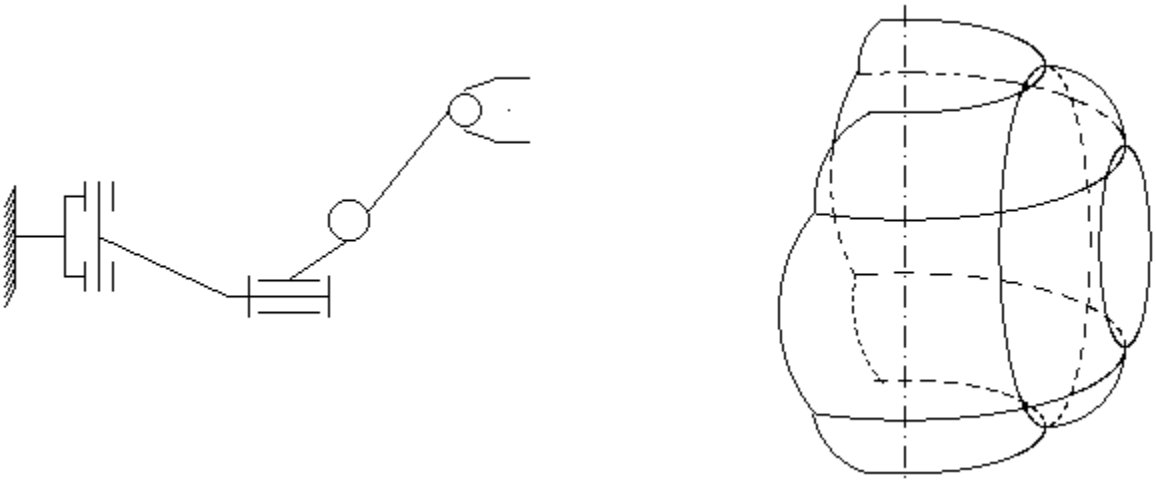
Ангулярна система координат



а) б)

Рисунок 3.12 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

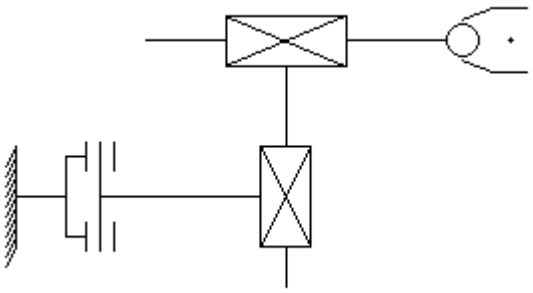
Ангулярна система координат



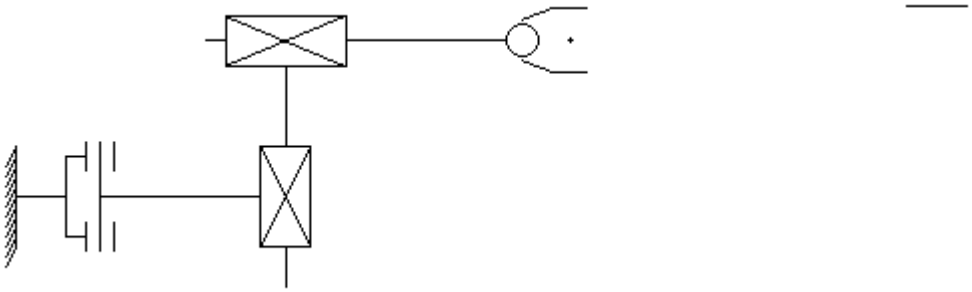
а) б)

Рисунок 3.13 – Кінематична схема ПР (а) та його робоча зона (б)

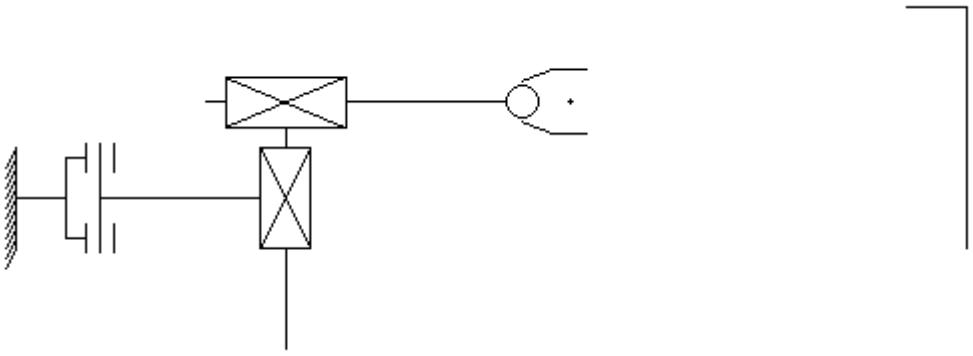
Принцип побудови робочої зони маніпулятора векторним перемноженням робочих зон кожної кінематичної пари на прикладі КС яка працює в циліндричній системі координат.



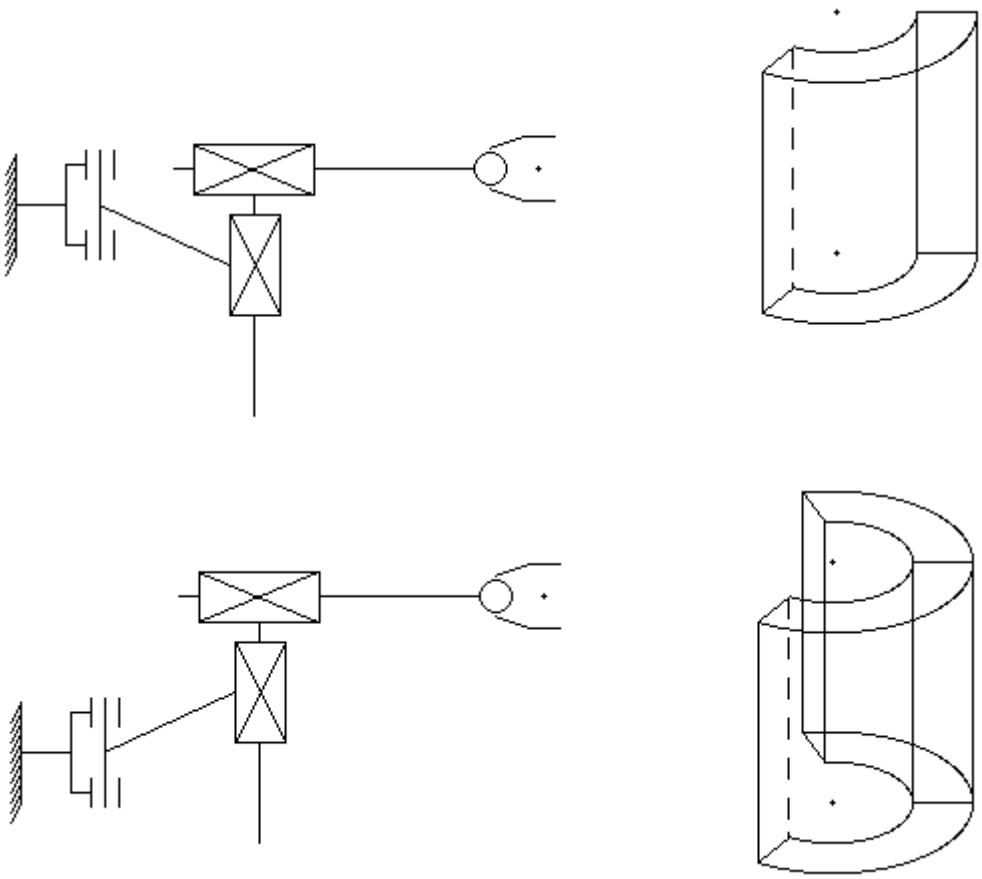
Перший Етап . Початкове положення



Другий Етап . Переміщення першої КП (зі сторони захватного пристрою). Отримуємо РЗ першого рівня



Третій Етап . Переміщення другої КП (зі сторони захватного пристрою). Отримуємо РЗ другого рівня (як перемноження робочих зон першого рівня)



Четвертий Етап . Переміщення третьої КП (зі сторони захватного пристрою). Отримуємо РЗ третього рівня (як перемноження робочої зони другого рівня на РЗ першого рівня)

3.3 Висновки

Проведений комп’ютеризований аналіз варіантів кінематичних схем промислових роботів дає можливість швидко визначити структурні формули, що описують кінематичні схеми, їх кількість.

Подальший розподіл можливих варіантів кінематичних схем за ступеню доцільності (паралельно визначено кількість варіантів по кожній групі) дозволяє суттєво зменшити кількість розглядаємих варіантів, тобто покращати якість аналізу, знаходити найбільш раціональні варіанти будови промислових роботів з загальної їх кількості, систематизувати вимоги за якими визначаються доцільність варіантів кінематичних схем промислових роботів.

При наступному розгляду найбільш доцільних варіантів кінематичних схем вони були розбиті на групи варіантів працюючих в різних системах координат та підгрупи варіантів, що мають різні робочі зони.

За допомогою запропонованого групування можна знаючі систему координат робота чи тип його робочої зони швидко визначити можливі варіанти його кінематичних схем (варіанти будови робота) і навпаки.

4 РОЗРОБКА СТАРТАПУ

4.1 Проблема та обґрунтування рішення

Сучасний ринок промислової робототехніки перенасичений пропозиціями, проте підприємства стикаються з так званим «парадоксом вибору».

Проблема. Більшість інвестиційних проєктів у сфері автоматизації зазнають невдачі або мають надлишковий термін окупності через некоректний структурний аналіз на етапі проєктування. Вибір занадто потужного робота призводить до простою ресурсів, а вибір занадто слабкого – до частих поломок та невідповідності техпроцесу.

Рішення. RoboFit AI – це експертна система на базі штучного інтелекту, яка інтегрує ваші наукові методики аналізу кінематичних та динамічних характеристик. Система автоматично проводить крос-аналіз технічного завдання замовника та існуючих на ринку структурних схем маніпуляторів, видаючи техніко-економічне обґрунтування з мінімальною похибкою.

Ми трансформуємо складний інженерний аналіз у зрозумілий бізнес-інструмент, зокрема:

- об’єктивність аналізу. На відміну від дилерів конкретних брендів, наша платформа проводить незалежний структурний аналіз, базуючись на математичних моделях досяжності, жорсткості конструкції та енергоефективності.

- мінімізація капітальних витрат. Завдяки точному визначенню кількості необхідних ступенів вільності, ми допомагаємо уникнути купівлі дорогих 6-осьових роботів там, де з задачею впорається 4-осьовий SCARA або дельта-робот.

- прогнозованість. Система розраховує не лише вартість заліза, а й витрати на технічне обслуговування, споживання електроенергії та інтеграцію в існуючу IT-інфраструктуру підприємства.

4.2 Технічна архітектура продукту

Архітектура побудована за модульним принципом, що дозволяє гнучко оновлювати алгоритми аналізу без зміни ядра системи. Система базується на хмарних обчисленнях, що забезпечує високу швидкість розрахунків складних кінематичних ланцюгів.

4.2.1 Рівень збору та обробки вхідних даних

Цей модуль відповідає за перетворення технічного завдання замовника у набір числових векторів для аналізу.

- Інтерфейс завантаження CAD-даних: Модуль автоматичного зчитування геометрії робочої зони. Система аналізує перешкоди (стіни, інші верстати) та визначає доступні вектори руху.
- Специфікатор техпроцесу: Користувач задає динамічні параметри:
  - Матриця цільових точок (P_n);
  - Вектор навантаження (маса + інерційні характеристики інструменту);
  - Вимоги до часу циклу (T_{cycle}) та точності позиціонування.

4.2.2 Аналітичне ядро

Це найважливіша частина, де реалізовані ваші наукові розробки. Модуль складається з трьох підсистем:

1. Кінематичний солвер:
   - Проводить інверсну задачу кінематики для різних типів структур (послідовних, паралельних, гібридних).
   - Розраховує коефіцієнт сервісного простору та виявляє «мертві зони» (singularities), де робот втрачає ступені вільності.
2. Динамічний аналізатор:

- Моделює навантаження на кожен суглоб (шарнір) маніпулятора під час руху за заданою траєкторією.

- Визначає енергоспоживання для кожного варіанту структури.

3. Модуль структурного синтезу:

   - На основі вашої методики порівнює, наприклад, 6-осьовий робот із 4-осьовим палетатайзером. Якщо 2 осі є надлишковими для даної траєкторії, система автоматично понижує пріоритет дорожчої моделі.

4.2.3. Рівень інтелектуального підбору

Тут відбувається порівняння розрахованих потреб із реальною базою даних обладнання.

- Global Robot Database: Постійно оновлювана база (SQL/NoSQL), що містить технічні паспорти роботів Fanuc, ABB, Kuka, Universal Robots тощо.
- Алгоритм ранжування: Використовує метод багатокритеріальної оптимізації (наприклад, метод аналізу ієрархій Сааті), щоб звести технічні, економічні та експлуатаційні показники до єдиного Коефіцієнта доцільності (K_{fe}).

4.2.4 Візуалізація та генерація звітності

Результат роботи архітектури подається у вигляді, зрозумілому як інженеру, так і фінансовому директору:

- 3D Scene Viewer: Браузерна візуалізація, що показує «цифровий двійник» обраного робота в робочому оточенні замовника.
- Heatmap Reachability: Теплова карта робочої зони, яка показує, в яких точках точність буде максимальною, а в яких – критично знижуватиметься.
- Auto-TEO Generator: Автоматична генерація техніко-економічного обґрунтування у форматі PDF/XLS, що включає графіки окупності та порівняльну таблицю ТОП-3 варіантів.

4.3 Аналіз ризиків та конкурентне середовище

Рівень "Startup": Одноразовий аналіз одного вузла виробництва (ідеально для малих підприємств).

Рівень "Enterprise": Річна підписка для великих заводів, що планують масштабну реконфігурацію ліній.

White Label: Продаж ліцензії на софт інжиніринговим компаніям, які зможуть використовувати ваш алгоритм під власним брендом.

Ринок: За даними IFR (International Federation of Robotics), попит на коботів та компактні маніпулятори зростає на 15-20% щороку, що створює величезний блакитний океан для сервісів з їх підбору.

4.3.1 Аналіз конкурентного ландшафту

Ринок інструментів для проектування роботизованих систем зараз проходить стадію трансформації. Ми виділяємо три ешелони конкурентів, щодо яких RoboFit AI має унікальне позиціонування.

Екосистеми виробників "Locked-in" (ABB, Fanuc, Kuka)

Ці компанії пропонують найвищу точність симуляції, оскільки мають доступ до закритих параметрів контролерів (цифрові двійники реальних шаф управління).

- Технічний бар'єр: Висока вартість навчання персоналу. Наприклад, щоб якісно працювати в KUKA.Sim, інженер має пройти спеціалізовані курси.
- Стратегічний недолік: Відсутність порівняльного аналізу. Вони ніколи не скажуть: «Наш робот тут не доцільний, візьміть робота конкурента».
- Перевага RoboFit AI: Ми виступаємо як агрегатор та незалежний аудитор, що використовує відкриті кінематичні моделі для об'єктивного порівняння різних брендів в одному вікні.

Важкі CAD/PLM рішення (Dassault Systèmes, Siemens)

Це інструменти для проектування цілих заводів (наприклад, ліній збирання автомобілів).

- Проблема масштабу: Для малого підприємства, якому потрібно поставити одного робота на пакування хліба, ці системи занадто громіздкі. Вони потребують потужних серверних станцій та місяців на розгортання проєкту.
- Перевага RoboFit AI: Наш стартап фокусується на «швидкому вході». Замість моделювання всього заводу, ми концентруємося на структурній доцільності маніпулятора для конкретної операції, що знижує вартість аналізу в 10-15 разів.

  Open Source та Low-cost платформи (RoboDK, Visual Components)

  Це найближчі конкуренти, які також є мультибрендовими.
- Відмінність: Більшість цих програм – це графічні редактори. Вони показують, як робот рухається, але не дають відповіді на питання чи доцільно його використовувати з точки зору ресурсу конструкції та окупності.
- Перевага RoboFit AI: Інтеграція аналітичного модуля. Наш софт не просто малює рух, він проводить ітераційну оптимізацію: «Якщо ми змінимо структуру з антропоморфної на паралельну, продуктивність зросте на 22%, а енерговитрати впадуть на 15%».

4.3.2 Комплексна оцінка та класифікація ризиків

Для наукової роботи важливо не просто перелічити ризики, а оцінити їхній вплив на життєздатність стартапу.

Технологічні ризики: "Ефект чорної скриньки"

- Опис: Використання ШІ для вибору структури робота може сприйматися консервативними інженерами як непрозоре рішення. Якщо алгоритм рекомендує модель без пояснення причин, рівень довіри падає.
- Метод нейтралізації: Впровадження Explainable AI (XAI). Кожна рекомендація RoboFit AI супроводжується математичним звітом: графіками робочих зон,

розрахунками моментів у суглобах та картами похибок. Це перетворює «магію» на доказову інженерію.

Економічні ризики: Подовження циклу продажів

- Опис: Промисловий сектор повільно приймає рішення. Від моменту отримання звіту про доцільність до закупівлі робота може пройти 6-12 місяців.
- Метод нейтралізації: Диверсифікація доходів. Окрім консалтингу, стартап пропонує підписку на базу даних характеристик роботів, яка постійно оновлюється, що забезпечує стабільний Cash Flow (грошовий потік).

Операційні ризики: Якість вхідних даних

- Опис: Якщо замовник надасть некоректні дані про масу вантажу або динамічні навантаження, обраний робот може вийти з ладу.
- Метод нейтралізації: Система верифікації даних. Алгоритм автоматично перевіряє вхідні параметри на фізичну реалістичність і видає попередження, якщо параметри виходять за межі стандартних робочих режимів.

4.4 Економічна оцінка стартапу

В основі алгоритму нашого стартапу лежить інтегральний показник, який враховує технічну та економічну відповідність [22, 23]. Цей показник оисується формулою:

$$Ke = \frac{T \cdot S}{C \cdot L} \tag{4.1}$$

де T (Technical match) – ступінь відповідності зони досяжності та вантажопідйомності;

S (Speed/Throughput): продуктивність (циклів/хв);

C (Cost): загальна вартість володіння;

L (Latency/Integration): складність впровадження.

Результатом стартапу може стати порівняльний аналіз варіантів промислових роботів, який неведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльний аналіз варіантів промислових роботів

Критерій аналізу	Варіант 1: Антропоморфний (6 осей)	Варіант 2: Колаборативний (Кобот)	Варіант 3: Дельта-робот (High-speed)
Структурна схема	Послідовна кінематика, сферична робоча зона	Послідовна з сенсорами зусилля	Паралельна кінематика
Вантажопідйомність	Висока (20-50 кг)	Середня (10-12 кг)	Низька (1-3 кг)
Точність	±0.03 мм (Дуже висока)	±0.1 мм (Середня)	±0.05 мм (Висока)
Швидкість циклу	Висока (потребує огородження)	Низька (безпечна для людей)	Максимальна (до 200 цикл/хв)
Гнучкість переналагодження	Середня (потребує програміста)	Дуже висока (навчання рухом)	Низька (вузька спеціалізація)
Вартість впровадження	Висока (захисні системи)	Середня (без огорож)	Висока (ціна механіки)
Розрахунковий ROI	18-24 місяці	10-14 місяців	14-18 місяців
Висновок RoboFit AI	Доцільно для важких умов та зварювання	Найкращий вибір для малих ліній складання	Тільки для швидкого пакування

4.4 Майбутні перспективи та стратегія масштабування

На першому етапі RoboFit AI працює як статичний порадник. Проте архітектура системи дозволяє розширити функціонал до динамічного управління:

- Інтеграція з цифровими двійниками. Створення повноцінного середовища, де софт не просто обирає робота, а автоматично генерує керуючий код. Це дозволить клієнту завантажити 3D-модель деталі, а система сама «прошиє» обраного робота під цей техпроцес.
- Модуль прогностичне обслуговування. Використання аналізу структурної доцільності для моніторингу реального зносу. На основі даних про моменти в шарнірах, ШІ зможе передбачити поломку редуктора за 2 тижні до її виникнення, аналізуючи відхилення від «ідеальної» математичної моделі.
- Впровадження алгоритмів машинного навчання, які дозволять роботам самостійно коригувати траєкторію в реальному часі при зміні освітлення або положення заготовок на конвеєрі.

В майбутньому платформа може бути доповнена модулем Predictive Maintenance, який на основі структурного аналізу зносу вузлів буде прогнозувати час виходу з ладу конкретних шарнірів робота, що зробить стартап незамінним помічником для головного інженера будь-якого заводу.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено теоретичні основи визначення загальної кількості можливих варіантів промислових роботів з різною кількістю ланок і кінематичних пар та умов їх з’єднання в завершену конструкцію.

2. Проведено кількісний аналіз, який передбачає проведення структуризації та групування кінематичних схем з метою суттєвого зменшення кількості варіантів кінематичних схем доцільних до подальшого розгляду й виділення варіантів, які пропонуються до реалізації на практиці.

3. Для вирішення питань кількісного аналізу, а саме, визначення кількості теоретично можливих варіантів кінематичних схем промислових роботів та розподілу варіантів схем за ступенем доцільності і визначення їх кількості було розроблено блок-схему відповідно до якої надалі розроблено спеціалізоване програмне забезпечення яке є шляхом до пришвидшення циклу розробки робототехнічних систем.

4. Розроблена програма для кількісного аналізу варіантів кінематичних схем промислових роботів. Результатом роботи якої є структурні формули варіантів кінематичних схем по групам доцільності.

5. Розроблено стартап RoboFit AI. Це експертна система на базі штучного інтелекту, яка інтегрує наукові методики аналізу кінематичних та динамічних характеристик. Система автоматично проводить крос-аналіз технічного завдання замовника та існуючих на ринку структурних схем маніпуляторів, видаючи техніко-економічне обґрунтування з мінімальною похибкою.

Кваліфікаційну роботу виконано у відповідності до методичних рекомендацій, що розроблені кафедрою машинобудування, мехатроніки і робототехніки [1] та [2].

ЛІТЕРАТУРА

1. Павленко І. І., Мажара В. А., Скібінський О. І. Методичні рекомендації до кваліфікаційної роботи. – 2021.
2. Мажара, В. А., Гречка, А. І., Святський, В. В., Щербина, К. К., Мірзак, В. Я., Селєхова, В. М., ... & Шмельов, В. М. (2024). Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти. Спец. 131 «Прикладна механіка».
3. Павленко І.І. Структура промислових роботів. Кіровоград: КІСМ, 1998. – 98с.
4. Мажара В. А., Корнєв М. С., Іваненко Р. С. Дослідження інерційних характеристик двозахватних промислових роботів // Перспективні напрямки інформаційних і комп ‘ютерних систем та мереж, комп ‘ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті: Матеріаливсеукраїнської науково-практичної інтернет конференції.- Кропивницький: ЦНТУ, 2019.–162 с. – 2019. – С. 58.
5. Павленко І. І., Мажара В. А. Кінематична структура двозахватних промислових роботів. – 2006. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград : КНТУ, 2006. - Вип. 17. - С. 278-282.
6. Павленко І. І., Мажара В. А. Конструктивна структура двозахватних пристроїв промислових роботів – 2006 // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2006. – Вип. 20. – С. 292–296.
7. Павленко І. І., Мажара В. А. Конструктивно–кінематична структура двозахватних пристроїв промислових роботів. – 2006. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Вип. 19 – Краматорськ – Київ, 2006. – С. 104 – 109.

8. Павленко І., Мажара В. Теоретичні основи аналізу кількості виконань двозахватних промислових роботів //Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – Т. 11. – №. 3. – С. 53-58.
9. Pavlenko I. I. Robotic technological complexes: monograph / I. I. Pavlenko, V. A. Mazhara; under the editorship I. I. Pavlenko. – Kropyvnytskyi: KOD, 2019. – 382 p.
10. Павленко І. І., Мажара В. А., Сторожук М. О. Структурні планувально-компонувальні дослідження роботизованих комплексів //Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2010. – №. 23. – С. 96-100.
11. Павленко І. І., Мажара В. А., Короп В. П. Особливості структури роботизованих технологічних комплексів //Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2010. – №. 40 (2). – С. 221-226.
12. Павленко І. І. и др. Дослідження продуктивності РТК з використанням промислових роботів встановлених на обладнанні //Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2012. – №. 25 (1). – С. 9-14.
13. Павленко І. І., Мажара В. А. Вплив конструктивних особливостей виконання портальних роботів на продуктивність РТК //Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2011. – №. 41 (2). – С. 121-126.
14. Філімоніхін Г. Б., Мажара В. А. Вплив часу відведення інструментальної головки на продуктивність роботизованого комплексу. – 2008. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. - Кіровоград: КНТУ, 2008. - Вип. 38. - С. 129-132.

15. Мажара В.А., Павленко І.І. Дослідження умов зміни захватів місцями в робочій зоні верстату // Збірник наукових праць КНТУ / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип. 21 – Кіровоград: КНТУ, 2008. – С. 150 – 154.
16. Мажара В. А. и др. Визначення кутів повороту ведучих ланок адаптивного захватного пристрою //Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2014. – №. 27. – С. 28-34.
17. Мажара А. В., Мажара В. А. Використання промислових роботів в умовах дрібносерійного типу виробництва //Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: матеріали XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, 11–13 листопада 2025 року.–Житомир: Житомирська політехніка, 2025.–149 с. – 2025. – С. 75.
18. Мажара, В. А., & Годунко, М. О. (2018). Основи гнучкого автоматизованого виробництва. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентами спеціальності “Прикладна механіка”. Кропивницький. ЦНТУ. 2018. – 32 с.
19. Павленко І. І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування //Кіровоград: КНТУ. – 2007.
20. Павленко І.І. Захватні пристрої роботів / І.І. Павленко, М.О. Годунко // Захватні пристрої роботів: монографія. – Кропивницький: «КОД», 2020. – 386 с.
21. Журило І.В., Семикіна М.В. Дипломне проектування з економіки підприємства: особливості, методика та основні етапи: навчально-методичний посібник. Кропивницький: ЦНТУ, 2016. 80 с.
22. Sybirtsev, V., Mazhara, V., & Moskalenko, V. (2020). Analysis of discriminant models in forecasting bankruptcy of enterprises. Bulletin of the Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University. Economic Sciences, (2).

23. MAZHARA V., MOSKALENKO V. Principal component analysis in the forecasting bankruptcy of enterprises // Bulletin of the Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University. Economic Sciences. – 2019. – №. 3.
24. Мажара, В. А., Щербина, К. К., Артюхов, А. М., Тененика, С. А., & Шестаков, І. С. (2024). Система автоматизованого проєктування технологічного оснащення. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12-23.
25. Мажара В. Дослідження впливу тертя в шарнірах захватного пристрою на силу затиску // Наука–виробництву. – 2025. – С. 115.
26. Shcherbyna, K., Hrechka, A., Mazhara, V., & Diachenko, T. (2020). Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks.
27. Мажара, В. А., Годунко, М. О., Кислун, О. А., & Ковальчук, Є. В. (2014). Визначення кутів повороту ведучих ланок адаптивного захватного пристрою.
28. Годунко М.О. Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого захватного пристрою / М.О. Годунко, О.А. Кислун, В.А. Мажара, В.К. Щербина, Р.А. Кравченко, В.В. Клюшкін // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - Вип. 7 (38). – С. 27-33.
29. Mazhara, V., & Shcherbyna, K. Exploring the possibilities of using an adaptive gripping device.
30. Апаракін А.Р. Синтез схем навантаження силових елементів кулькогвинтового гідропідсилювача з аксіальною структурою приводу / А.Р. Апаракін, П.М. Єрьомін, В.А. Мажара // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – Кропивницький: ЦНТУ, 2024. – Вип. 9 (40). - Ч. ІІ. – С. 23-31.
31. Годунко М.О. Дослідження можливості підвищення точності захватного пристрою робота за рахунок компенсуючої ланки затискного важеля.

Годунко М.О., Мажара В.А., Кислун О.С., Щербина В.К., Писанка С.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2024. – Вип. №3. – С. 52-56.

32. Щербина К., Заїка А., Заїка С., Мажара В., Скібінський Я. Управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділеним на дві частини профілем інструментильної рейки // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2025. - №2 (349). - С.364-370.
33. Мажара В. А., Тененика С. А. Використання двозахватних промислових роботів на позиціях допоміжних пристроїв. Харків : НАУ «ХАІ», 2025. – С. 106-108.
34. Щербина К., Мажара В., Торчілов Д., Заїка А., Масляніков В. Дослідження повздовжньої сталості пружно-гвинтового хону з гвинтовими канавками // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2025. - №2 (349). - С.493-499.
35. Щербина К.К. Експериментальне дослідження деформації пружногвинтового хона / К.К. Щербина, М.М. Підгаєцький, В.А. Мажара, А.І. Гречка, Т.В. Дяченко // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – Вип. 5 (36). – Ч. 2. – С. 31-38.
36. Filimonikhin, G., Pirogov, V., Hodunko, M., Kisilov, R., & Mazhara, V. (2021). The dynamics of a resonance single-mass vibratory machine with a vibration exciter of targeted action that operates on the Sommerfeld effect. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (7 (111), 51–58.